



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ÉCOLE SUPÉRIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

Mention : Agriculture Tropicale et Développement Durable

Parcours : Bio-fonctionnement des Sols et Environnement

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome au grade
Master II

PRATIQUES DE FERTILISATION INNOVANTES POUR UNE INTENSIFICATION DES PROCESSUS ECOLOGIQUES DU SOL EN RIZICULTURE PLUVIALE DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Présenté par RAHANTARIVELO Salohimanana Danie Elisa

Promotion : Andrarangy Mahasedra (2018-2023)

Soutenu publiquement le 31 Janvier 2024 devant le jury composé de :

- Président : Professeur Jaona Harilala ANDRIAMANIRAKA
- Examineur : Professeur Norsoa Christine RAZAFINDRAMANANA
- Maitres de stage : Docteur Bertrand MULLER
Docteur/HDR Éric BLANCHART
- Encadrant : Docteur/HDR Hery Manantsoa RAZAFIMAHATRATRA
- Co-encadrant : Docteur Onja Hasinahary RATSIATOSIKA



REMERCIEMENTS

« Give thanks to the lord, for He is good, His love endures forever. » 1 Chronicles 16 : 34.

Au terme de la réalisation de ce mémoire, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à sa réalisation. J'adresse particulièrement mes sincères remerciements aux membres du jury :

- Professeur Harilala ANDRIAMANIRAKA, Enseignant – Chercheur à la Mention Agriculture Tropicale et Développement Durable, qui nous a fait l'honneur de présider le jury malgré ses nombreuses responsabilités.
- Docteur/HDR Norosoa Christine RAZAFINDRAMANANA, Enseignant – Chercheur à la Mention Agriculture Tropicale et Développement Durable, voulant témoigner l'intérêt de ce travail en acceptant de siéger parmi les membres de jury en tant qu'examineur. Votre expertise ajoutera plus de valeur à ce travail.
- Docteur/HDR Éric BLANCHART, Docteur/HDR en Sciences de la Vie, Chercheur IRD, UMR Eco&Sols Montpellier, Directeur adjoint de l'École Doctorale GAIA – Université de Montpellier, chercheur en accueil au LRI, mon encadrant professionnel. Je ne saurai assez-vous remercier pour tout le temps que vous m'avez accordé durant ce stage, malgré vos nombreuses occupations. Merci pour vos enseignements, vos conseils et vos encouragements. Merci pour la patience et la bienveillance dont vous avez fait preuve à mon égard durant ces multiples mois.
- Monsieur Bertrand MULLER, PhD, CIRAD (UMR AGAP) /FOFIFA, Coordinateur du projet DINAAMICC, membre du dP SPAD Madagascar, mon maître de stage. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour le temps que vous m'avez consacré pendant ce stage, en dépit de vos responsabilités. Votre disponibilité a été inestimable, et je ne saurais suffisamment vous remercier.
- Monsieur Hery Manantsoa RAZAFIMAHATRATRA, Docteur/HDR en Sciences agronomiques (Agro-Pédologie), Enseignant – Chercheur à l'ESSA et responsable de la mention AT2D, mon encadrant. Je vous adresse mes sincères remerciements, Monsieur, pour l'ensemble de vos conseils et enseignements. Que ce soit durant ce stage ou lors de vos cours, vos réflexions ont toujours représenté une source inestimable d'instruction pour moi. Merci infiniment pour votre patience et votre bienveillance, même en dépit de vos multiples engagements.
- Madame Onja Hasinahary RATSIATOSIKA, Docteur en Sciences agronomiques, Enseignant – Chercheur à l'ESSA, postdoctorante au LRI, mon co-encadrant. Merci pour tous les efforts que vous avez déployés pour le bon déroulement de mon stage. Merci pour tous vos précieux conseils et vos encouragements. Merci pour votre appui inestimable et surtout pour votre implication active tout au long de mon stage, malgré vos nombreuses occupations.

Bien qu'elles ne soient pas parmi les membres de jury, certaines personnes ont contribué activement à la réalisation de mon stage mémoire. J'adresse mes pensées les plus sincères à :

- Madame Tantely RAZAFIMBELO, Professeur titulaire et Directrice du LRI, qui a bien voulu m'accueillir en tant que stagiaire au sein du laboratoire. Merci également pour votre implication dans ce travail et pour tous les conseils que vous avez donnés.
- Madame Laetitia BERNARD, Docteur en Océanologie biologique, chercheur à l'UMR Eco&Sols – IRD, chercheur en accueil au LRI. Merci pour votre implication dans ce travail et pour tous les conseils que vous avez donnés.
- Monsieur Damase Hilaire Andrianantenaina RAZAFIMAHAFALY, Ingénieur d'étude en Biologie du sol en charge du Laboratoire Biologique du LRI. Merci d'avoir bien voulu m'aider durant toute la réalisation de l'expérimentation sur le terrain et aussi pour les analyses du sol au laboratoire et le travail post-récolte. Votre aide m'a été très précieuse.
- Monsieur Mamy, technicien de laboratoire au sein du LRI et qui m'a beaucoup aidé pour la réalisation de toutes mes analyses en laboratoire. Votre aide a été d'une importance capitale pour moi.
- Toky Nantenaina RANDRIANTSOA, Doctorant au sein du LRI, et qui m'a beaucoup aidé que ce soit sur le terrain lors de la réalisation de l'expérimentation ou lors des travaux post-récolte et aussi pour les analyses en laboratoire ainsi que pour la réalisation de ce manuscrit. Votre aide m'a été très indispensable et précieuse.

Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à :

- Tous les chercheurs, les personnels techniques et administratifs du LRI, pour leur chaleureux accueil et leur contribution directe ou indirecte à la réalisation de ce mémoire.
- Tous les personnels administratifs et pédagogiques de l'ESSA, notamment de la Mention AT2D sans lequel nous ne serions pas arrivés aux termes de notre cursus universitaire.
- Les doctorants et les stagiaires du LRI, particulièrement Oliva, Marco, Tiavina, Telina, Fandresena, Manitra, Andy, et Nancy. Merci pour ces moments plaisants passés au LRI.
- Mes amis et camarades de la promotion ANDRARANGY Mahasedra, et aussi mes autres amis qui m'ont constamment soutenu depuis mes débuts à l'ESSA.
- Ma famille pour sa contribution de quelque forme qu'elle soit, au soutien durant mes études. Merci infiniment.

Elisa

SOMMAIRE

LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	d
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	f
GLOSSAIRE.....	g
RÉSUMÉ.....	h
INTRODUCTION.....	1
1. MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	3
1.1. Présentation de la zone d'étude.....	3
1.2. Matériel végétal.....	5
1.3. Dispositif expérimental et facteurs étudiés.....	5
1.4. Opérations culturales.....	8
1.5. Mesures effectuées.....	9
1.6. Traitement de données et analyse statistiques.....	12
2. RÉSULTATS.....	13
2.1. Analyse des paramètres pluviométriques sur la croissance du riz.....	13
2.2. Analyse de l'effet des différentes pratiques sur les paramètres agronomiques du riz et écologiques du sol.....	14
2.3. Analyse de l'effet du décalage de semis sur les paramètres agronomiques du riz.....	29
2.4. Corrélation entre paramètres agronomiques et paramètres écologiques du sol.....	35
3. DISCUSSIONS.....	41
3.1. Impacts des différentes pratiques SFR sur les performances agronomiques du riz et écologiques du sol.....	41
3.2. Impacts du décalage de semis sur les paramètres agronomiques du riz.....	46
3.3. Impacts de l'interaction entre les pratiques SFR et le décalage de semis.....	48
4. RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES.....	50
4.1. Recommandations sur les pratiques SFR les plus performantes et résilientes face au changement climatique.....	50
4.2. Limites de l'étude et perspectives pour les recherches futures.....	51
CONCLUSION.....	53

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures

Figure 1 : Carte de localisation du site expérimental	3
Figure 2 : Diagramme ombrothermique de GAUSSEN (2012-2021).....	4
Figure 3 : Évolution des précipitations annuelles de 2013-2022	4
Figure 4 : Dispositif expérimental du site Imerintsiatosika.....	6
Figure 5 : Cumul (en mm) de la quantité de pluie pour les deux dates de semis D1 et D2 au cours des différents stades phénologiques du riz	13
Figure 6 : Nombre de talles	15
Figure 7 : Hauteur de riz pendant les deux stades phénologiques : début et fin de tallage	16
Figure 8 : Durée pour atteindre 50% de floraison depuis la date de semis pour différents traitements	17
Figure 9 : Rendement en grain (jaune), pourcentage en grain plein (marron foncé) rendement en paille (en vert) rendement total (marron clair) en Tms.ha ⁻¹	19
Figure 10 : Effet des traitements SFR sur la quantité de phosphore contenue dans les grains	21
Figure 11 : pH eau du sol sur deux profondeurs, 0 - 10 et 10 - 20 cm	22
Figure 12 : Phosphore résine (en mgP.kg ⁻¹ sol) dans le sol sur un horizon de 0 à 10 cm de profondeur	23
Figure 13 : Densité et biomasse de vers de terre sur deux horizons 0 à 10 cm et 10 à 20 cm de profondeur	25
Figure 14 : Densité et biomasse des macrofaunes sur deux horizons différents, 0 à 10 et 10 à 20 cm de profondeur.....	27
Figure 15 : Hauteur au début et à la fin de tallage pour les deux dates de semis	31
Figure 16 : Floraison entre les deux dates de semis D1 et D2 avec son Delta.....	32
Figure 17 : Rendement en grain et pourcentage en grain plein pour les deux dates de semis et leur Delta respectif (%).....	33
Figure 18 : Rendement en paille et rendement total pour les deux dates de semis et son delta respectif	34
Figure 19 : Quantité de phosphore dans les grains pour les deux dates de semis	35
Figure 20 : Corrélation des paramètres agronomiques et écologiques du sol projetés sur Dim1 et Dim2 (à gauche) - Projection des moyennes des observations selon les paramètres agronomiques et pédologiques en fonction des facteurs et modalités sur Dim1 et Dim2 (à droite).....	37
Figure 21 : Corrélation entre les valeurs moyennes de delta des paramètres agronomiques avec celui des paramètres écologiques du sol, à gauche se situe le graphe des variables et à droite celui des individus.....	38
Figure 22 : Corrélation entre les paramètres agronomiques et écologiques du sol	39
Figure 23 : Comparaison des différentes pratiques SFR retenues comme ayant une performance agronomique meilleure sur les deux dates de semis et aussi sur leur performance écologique	50

Figure 24 : Localisation des monolithes.....	xvii
Figure 25 : Localisation de la mesure des hauteurs et nombre de talles	xviii
Figure 26 : Les différents modalités pour la corrélation entre les paramètres agronomiques du riz et écologiques du sol pour les deux dates de semis D1 et D2	xxiii
Figure 27 : Dimensions des axes	xxiii
Figure 28 : Graphes des individus avant correction, mise en évidence des trois individus	xxiv

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques chimiques du sol d’Imerintsiatosika	5
Tableau 2 : Caractéristiques granulométriques du sol d’Imerintsiatosika.....	5
Tableau 3 : Composition des 25 traitements	7
Tableau 4 : Caractéristiques chimiques des matières organiques et minérales utilisées	8
Tableau 5 : Quantité de pluie reçue par le site au cours de l’expérimentation et quantité moyenne mensuelle de pluie dans la zone sur une durée de 10 ans.....	13
Tableau 6 : Tableau des valeurs propres	36
Tableau 7 : Caractéristiques des sols de l’Imerintsiatosika (<i>Source</i> : Raminoarison, 2021)	ix
Tableau 8 : Données pluviométriques du site (du 16 octobre 2022 au 13 mai 2023)	x
Tableau 9 : Moyenne et écart type de l’indice de Shannon et de l’équitabilité pour chaque traitement.....	xx
Tableau 10 : Indicateurs agronomiques pour D1 et D2 et indicateurs écologiques	xxi
Tableau 11 : Résultats des analyses statistiques.....	xxii

Liste des clichés

Cliché 1 : Les différentes étapes pour le prélèvement des monolithes.....	xvii
Cliché 2 : Mesure de la Hauteur au stade de début tallage et pendant la récolte	xviii
Cliché 3 : Exemple des pratiques SFR montrant l’attaque des vers blancs sur D1	xix

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACP	: Analyse en Composante Principale
ANOVA	: Analysis of Variance (Analyse de la Variance)
FAO	: Food and Agriculture Organization (Organisation pour l'alimentation et l'Agriculture)
GES	: Gaz à effet de Serre
JAS	: Jour après Semis
ODD	: Objectif du Développement Durable
PAM	: Programme Alimentaire Mondiale
LRI	: Laboratoire des Radioisotopes
MF	: Matière Fertilisante
MOS	: Matière Organique du Sol
MS	: Matière Sèche
SECuRE	: Soil ECological function REstoration (restauration de la fonction écologique du sol)
SFR	: Soil Function Restoration (Restauration de la fonction du Sol)
TSBF	: Tropical Soil Biology and Fertility
VDT	: Vers de terre

GLOSSAIRE

Atténuation : Intervention humaine visant à réduire les sources ou à renforcer les puits de gaz à effet de serre (GES). Elle cherche à évaluer les interventions humaines qui visent à réduire les sources d'autres substances et qui peuvent contribuer directement à limiter le changement climatique (IPCC, 2014).

Adaptation : Ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets pour atténuer les effets néfastes ou en explorer les opportunités bénéfiques (GIEC, 2013).

Agroécologie : Ensemble de pratiques consistant à améliorer les performances de l'agriculture par l'intégration des principes écologiques dans la gestion des exploitations et des systèmes (Wezel *et al.*, 2015).

Changement climatique : Variation de l'état du climat qu'on peut déceler par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés. Cette variation qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus (GIEC, 2013).

Fonction écologique du sol : Ensemble de processus écologiques par lesquels le sol fournit des services écosystémiques.

Intensification écologique du sol : Ensemble de technique s'attachant à maximiser la fourniture des services écosystémiques par la biodiversité des sols, tout en minimisant l'impact des mécanismes écologiques conférant aux agrosystèmes une meilleure résilience écologique et une plus grande durabilité (Yachi & Loreau, 1999)

Résilience : capacité à s'adapter aux perturbations ou à revenir à un régime de routine face à un milieu changeant (Oliveira et al., 2019).

Sécurité alimentaire : Situation qui garantit à tout moment à une population, l'accès à une nourriture à la fois sur le plan qualitatif et quantitatif (FAO, 2017).

Semis tardif : Semis qui se réalise au plus tard que le semis normal.

Services écosystémiques : Services rendus par l'écosystème. Ils constituent les services d'approvisionnement, de régulation, de soutien et culturel.

Stress hydrique : situation dans laquelle l'extraction d'eau des racines est inférieure à la perte d'eau des plantes qui est déterminée par la demande d'évaporation de l'atmosphère (Hall, 1993).

RÉSUMÉ

Sur les Hautes Terres centrales de Madagascar, le riz pluvial fait partie des principales cultures pluviales. Comme toutes les autres cultures, le riz est vulnérable aux effets du changement climatique. Les problèmes liés à la faible fertilité des Ferralsols limitent sa performance productive. Pour améliorer la fertilité et lutter contre le changement climatique, plusieurs pratiques innovantes de fertilisation ont été proposées et puis testées expérimentalement. La présente étude a pour objectif de tester l'effet des pratiques innovantes de fertilisation sur la résilience climatique du riz pluvial en introduisant expérimentalement un décalage de semis. Dans le contexte d'une diminution des précipitations liée au changement climatique et d'un retard dans le début de la saison des pluies, deux semis ont été réalisés, comprenant un semis normal en novembre (D1) et un semis tardif en décembre (D2). À cette fin, un essai sur terrain a été mené à Imerintsiatosika durant la saison culturale 2022-2023 a été mené. Deux facteurs ont été étudiés, notamment (i) les pratiques SFR (Soil Function Restoration) avec 25 modalités et le décalage de semis avec 2 modalités (D1 vs D2). Les résultats montrent que les pratiques utilisant le lombricompost ($6\text{tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$), les fumiers traditionnels ($18\text{tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$) et les assemblages de matières présentent les meilleures performances agronomiques. Pour la performance écologique, les pratiques SFR 31 à SFR 38, SFR 5 et SFR 17 présentent la meilleure performance. Toutefois, cette performance varie en fonction de chaque variable dont pour le cas du phosphore disponible, c'est le SFR 17 qui présente la teneur la plus élevée ($15,16\text{ mgP}\cdot\text{Kg}^{-1}$). La qualité de chaque matière constituante, ses modes d'apport, son antécédent cultural et les attaques des vers blancs jouent un rôle déterminant dans la performance agronomique de chaque pratique SFR. Quant au décalage de semis, le semis tardif présente une meilleure performance agronomique que le semis normal. La floraison arrive plus tôt sur D2 que sur D1 et sur le rendement en grains, le semis tardif présente une augmentation de +40% par rapport au semis normal. Un fort taux d'attaque des vers blancs a été aussi observé plus fortement sur D1 que sur D2. Les pratiques avec des lombricompost à $6\text{tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ ou des fumiers traditionnels à $18\text{tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ affichent une meilleure résilience face au décalage de semis. Toutefois, des recherches plus approfondies sont nécessaires pour mieux évaluer les pratiques les plus résilientes face au changement climatique.

Mots clés : Décalage de semis, Performance, Retard des pluies, Semis tardifs.

ABSTRACT

In the central highlands of Madagascar, rainfed rice is one of the main rainfed crops. Like all other crops, rice is vulnerable to the effects of climate change. Problems linked to the low fertility of Ferralsols limit its productive performance. To improve fertility and combat climate change, several innovative fertilization practices have been proposed and then experimentally tested. The aim of this study is to test the effect of innovative fertilization practices on the climatic resilience of rainfed rice by experimentally introducing a staggered sowing period. In the context of reduced rainfall linked to climate change and a delay in the start of the rainy season, two sowings were carried out, comprising a normal sowing in November (D1) and a late sowing in December (D2). To this end, a field trial at Imerintsiatosika during the cropping season 2022-2023. Two factors were studied, namely (i) SFR (Soil Function Restoration) practices and sowing offset (D1 vs D2) at 25 treatments. The results show that practices using vermicompost ($6\text{tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$), traditional manures ($18\text{tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$) and material blends offer the best agronomic performance. For ecological performance, the new practices SFR 31 to SFR 38, SFR 5 and SFR 17 showed the best performance, but this performance depended on each variable. In the case of available phosphorus, SFR 17 had the highest content ($15.16\text{ mgP}\cdot\text{Kg}^{-1}$). The quality of each component, the methods used to apply it, the crop history and grub attacks play a decisive role in the agronomic performance of each SFR practice. As for the sowing interval, late sowing gives better agronomic performance than normal sowing. Flowering occurred earlier on D2 than on D1, and grain yields were 40% higher on late sowing than on normal sowing. A high rate of grub attack was also observed more strongly on D1 than on D2. Practices using vermicompost at $6\text{tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ or traditional manure at $18\text{tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ showed greater resilience to delayed sowing. However, further research is needed to better assess which practices are most resilient to climate change.

Keywords: Sowing delay, Performance, Rain delay, Late sowing.

FINTINA

Manana anjara toerana lehibe amin'ny fambolena eto Madagasikara ny voly vary an-tanety. Toy ny voly an-tanety rehetra dia misedra olana io fambolena io ankehitriny noho ny fiovan'ny toetr'andro. Etsy andaniny, anisan'ny mampihena ny vokatra ihany koa ny toetran'ny tany eto an-toerana indrindra ny eto ampovoan-tany. Mba hanarenana izany faharatsian'ny tany izany ary koa hiadiana amin'ny fiovaovan'ny toetr'andro, maro ny karazana zezika sy teknika naroso sy nanaovana fanadramana. Noho ny fihenan'ny habetsaky ny rotsa-korana ary koa noho ny fahataran'ny fahatongavan'ny rotsa-korana voalohany dia natao ny fambolem-bary in-droa miatoana, ny voalohany novolena ny volana Novembre (D1) tahaka ny fanaon'ny tantsaha any an-toerana ary ny faharoa novolena iray volana taorian'ny voalohany (D2). Ny tanjon'ity asa fikarohana ity dia ny mba ahafantatra ny vokatry ny fampiasaina ny karazana zezika amin'ny voly vary izay novolena in-droa miatoana. Mba ho fanatotosaina izany dia nisy ny fanandramana izay natao teny Imerintsiasosika nandritra ny taom-pambolena 2022-2023. Antony roa no nodinihina dia ireo karazana teknika fanao ekolojika (pratiques SFR) ary ny fanelanelanana ny fotoana fambolena vary. Ny valiny ny fikarohana dia nahita fa ny kaomposta azo avy amin'ny kakana (6tMS.ha), ny zezim-pahitra azo avy omby (18tMS.ha) na ihany koa ny fanambarana ireo singa ireo no nahazoana vokatra tsara indrindra tamin'ny fambolena vary. Raha ny resaka fahatsaran'ny tany indray anefa dia hita fa ny zezika kaomposta azo avy amin'ny kakana (SFR 31 à 38), ny zezi-pahitra nohatsaraina ary ny zezika azo avy amin'ny kisoa no tsara indrindra. Izany anefa dia miakina betsaka amin'ny kasinga tiana hasongadina. Raha ny tahan'ny "phosphore" afaka alain'ny voly ao anatin'ny tany no jerena dia ny teknika mampiasa zezika kisoa no nahitana taha ambony indrindra (15,16 mgP.Kg⁻¹). Ny hatsara na haratsin'ny teknika tsirairay avy dia miakina amin'ny kalitaon'ny ireo kasinga mandrafitra azy tsirairay, ny fomba fampiasaina azy ary ihany koa ny ny voly naniry na ny teknika nampiasaina teo aloha. Raha ny fotoam-pambolena indray no asiana resaka dia hita fa ny fambolena natao ny volana Desambra, izany hoe ilay natao faharoa no nahazoana vokatra tsaratsara kokoa noho ilay natao voalohany. Raha ny voka-bary no jerena dia hita fa nahazoana vokatra mihoatra ny 40% noho ilay novolena voalohany (D1) ilay faharoa (D2). Hita nandritra ny fotoam-pambolena ihany koa fa dia maro tamin'ireo voly tao amin'ny D1 no simban'ny bibikely (vers blancs). Ny teknika ekolojika mampiasa kaomposta azo avy amin'ny kakana sy ny zezim-pahitra no nahazoana vokatra tsara indrindra ary koa tsy nahitana fiovana firy ny vokatra azo teo amin'ny D1 sy D2. Na izany aza anefa, ilaina ny manao fikarohana lalina kokoa mba ahitana ny teknika tena tsara sy mahazaka tsara ny fiovan'ny toetr'andro.

Teny manan-danja : Fanelanelanana ny fotoam-pamafazana, Fahatsarana, Fahataran'ny rotsak'orana, Voly afara.

INTRODUCTION

L'alimentation et l'agriculture sont au carrefour de multiples enjeux impactant le développement durable : sécurité alimentaire, sécurité nutritionnelle, atténuation et adaptation au changement climatique, perte de biodiversité, dégradation des terres, santé et bien-être humains. Dans le cadre des objectifs du développement durable (ODD), le secteur agricole doit relever plusieurs défis, notamment celui d'assurer la sécurité alimentaire tout en minimisant les impacts négatifs sur l'environnement (FAO, 2015). Le changement climatique constitue l'un des défis majeurs, avec des répercussions directes et indirectes sur les systèmes agroalimentaires en raison des variations imprévisibles des conditions météorologiques et de l'augmentation des phénomènes extrêmes, ainsi que l'émergence de ravageurs et de maladies. Face à ces défis, l'adoption de modèles de production agricole alternatifs à l'agriculture conventionnelle est impérative pour assurer une production suffisante et renforcer la résilience au changement climatique (Grosclaude *et al.*, 2006 ; Altieri, 2009 ; Joyeux & Enjalric, 2014). Dans ce contexte, l'agroécologie se présente comme une solution pertinente, reposant sur l'intensification des processus écologiques au sein des agrosystèmes. L'agroécologie, reconnue comme une approche basée sur la nature, vise à créer des sociosystèmes plus souhaitables (Griffon, 2013 ; Tiftonell, 2015). Selon la FAO, l'intensification écologique peut transformer les systèmes de production agricole en améliorant l'efficacité de l'utilisation des ressources et en minimisant les impacts environnementaux, renforçant ainsi la résilience des écosystèmes face au changement climatique (Altieri *et al.*, 2015, Leippert *et al.*, 2020).

L'agroécologie, en tant qu'approche intégrée, applique des notions écologiques et sociales à la gestion des systèmes agricoles. Elle vise à revoir les liens entre l'agriculture et les écosystèmes, avec la préservation des ressources naturelles comme objectifs principaux (Francis *et al.*, 2003). Ces fonctions, telles que (i) la dynamique de la matière organique (ii) le recyclage des nutriments (iii) le maintien de la structure du sol et (iv) la régulation des bioagresseurs, influencent positivement les systèmes agroécologiques (Altieri, 1999 ; Bender et Beller, 2016). La restauration de ces fonctions est nécessaire pour améliorer la productivité et la durabilité agricoles. Deux approches peuvent être adoptées : (i) améliorer le sol en tant qu'habitat du biote du sol ou (ii) inoculer directement les organismes du sol (Blanchart & Trap, 2020).

L'agriculture à Madagascar, axée sur l'agriculture familiale et principalement dédiée au riz, rencontre des défis importants tels que des conditions climatiques imprévisibles, une fertilité limitée des sols, des pratiques agricoles sous-optimales et des rendements faibles en riz. Le changement climatique risque d'aggraver l'insécurité alimentaire (PAM, 2018). Les Ferralsols des Hautes Terres sont caractérisés par une pauvreté en nutriment, limitant le développement des plantes (Raminoarison *et al.*, 2019). Des ateliers avec des agriculteurs ont mis en évidence leur perception négative des engrais chimiques et leur forte attirance pour les ressources organiques riches en nutriments tels que le fumier, les composts ou les lombricomposts (Raharimalala &

Audouin, 2021). Le projet « SECuRE » (2017-2021) a testé des pratiques de restauration de la fertilité des sols pour améliorer le riz pluvial dans les Hautes Terres de Madagascar. Les chercheurs ont également proposé des alternatives pour optimiser la fertilité des sols en utilisant les ressources naturelles. Les précisions de retard de pluies liées au changement climatique soulignent l'importance de trouver des solutions résilientes pour la riziculture pluviale.

La question de recherche qui se pose est la suivante : quelles pratiques agricoles de restauration de la fertilité du sol permettraient d'améliorer la résilience climatique du riz pluvial. L'objectif de cette étude est de tester l'effet des pratiques innovantes de fertilisation sur la résilience climatique du riz pluvial en introduisant expérimentalement un décalage de semis. Ainsi les objectifs spécifiques de l'étude sont de :

- OS1 : Mesurer l'effet des différentes pratiques de fertilisation (SFR) sur les paramètres agronomiques et écologiques du sol,
- OS2 : Evaluer l'effet du décalage du semis sur les paramètres agronomiques du riz,
- OS3 : Déterminer les pratiques les plus performantes et résilientes au changement climatique.

Trois hypothèses sont émises pour répondre à ces objectifs :

- ✓ H1 : les pratiques SFR les plus performantes au niveau des paramètres agronomiques et écologiques sont celles associant plusieurs matières fertilisantes,
- ✓ H2 : le décalage de 1 mois de semis affecte les paramètres agronomiques,
- ✓ H3 : les pratiques qui ont une meilleure performance écologique sont également les plus résilientes au changement climatique.

En termes d'organisation, le présent mémoire s'articule en trois principaux chapitres :

Chapitre 1 : Matériels et méthodes

Chapitre 2 : Résultats

Chapitre 3 : Discussions et recommandations

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

1.1. Présentation de la zone d'étude

1.1.1. Localisation

Le site expérimental est situé dans la région Itasy – district Arivonimamo – commune rurale Imerintsiatosika – Fokontany Alatsinainy Loharano (Figure1). Le site se trouve à une vingtaine de kilomètres du chef-lieu de la commune. Ses coordonnées géographiques sont les suivantes : 19°05'40''S de latitude sud, 47°25'65''E de longitude est, avec une altitude de 1296 mètres.

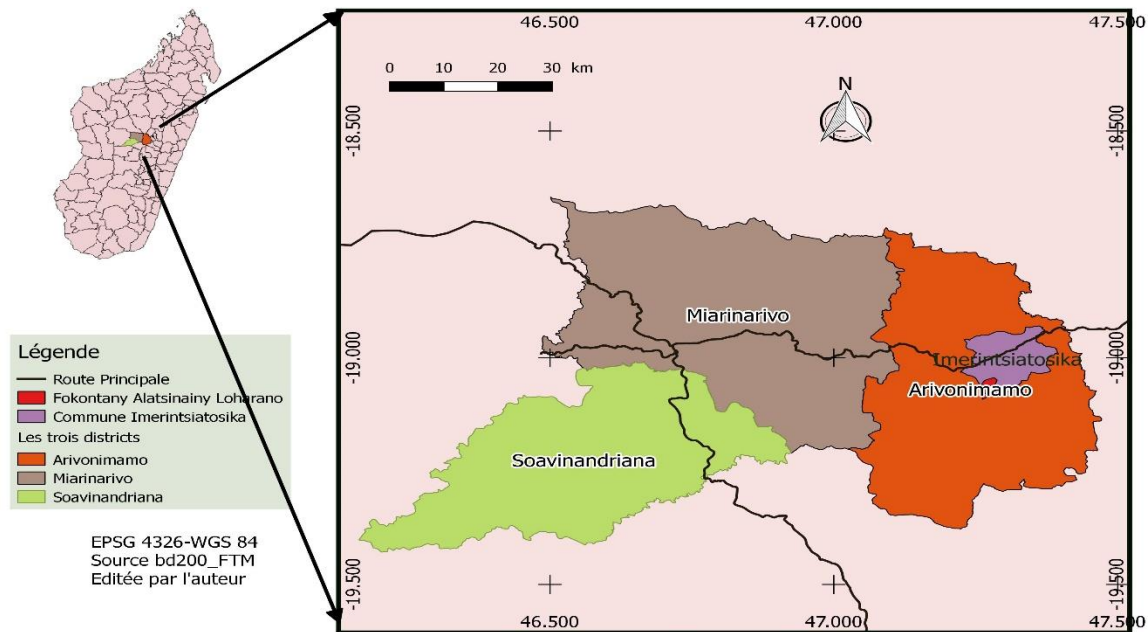


Figure 1 : Carte de localisation du site expérimental

1.1.2. Milieu physique

1.1.2.1. Climat

Le climat de la région est caractérisé par un climat tropical d'altitude. Deux saisons nettement distinctes sont constatées selon le diagramme ombrothermique de Gaussen dont :

- Une saison chaude et humide d'octobre à avril,
- Une saison fraîche et sèche de mai à septembre.

Le diagramme ci-dessous (figure 2) a été élaboré à partir des données climatiques collectées sur une période de 10 ans (2012-2021) sur la station météorologique d'Arivonimamo qui est proche du site expérimental. Les précipitations atteignent un cumul annuel de 1246mm. Quant à la température, la moyenne mensuelle est de 18°C. La température la plus basse est observée au mois de juillet avec une moyenne de 14,4°C et la plus chaude est au mois de décembre avec une moyenne de 22,5°C.

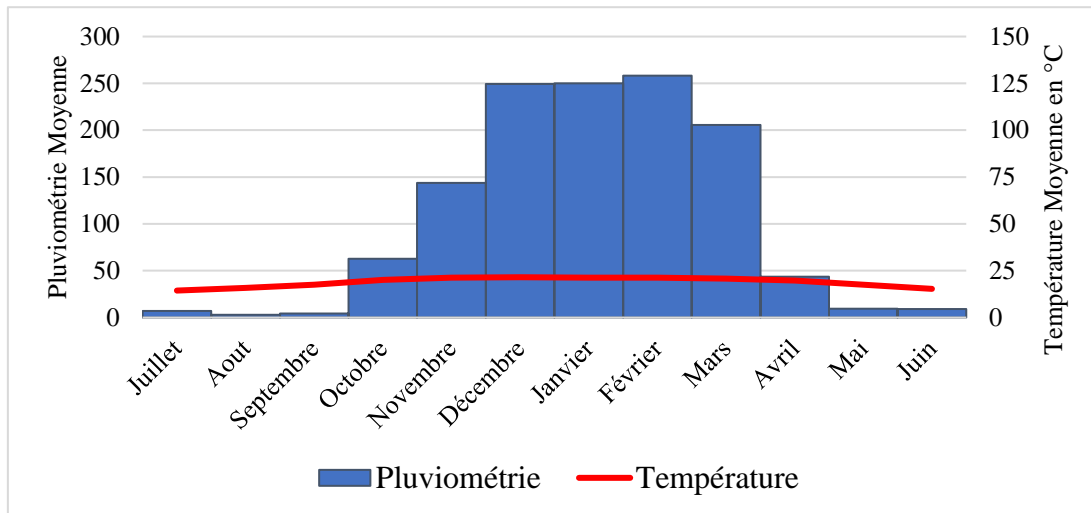


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de GAUSSEN (2012-2021)

Source : Direction générale de la Météorologie, 2023

La figure 3 présentée ci-dessous représente la moyenne annuelle des précipitations sur la période de 2013 à 2022. Cette illustration nous permet de comprendre comment la quantité de pluie varie au fil du temps, en montrant clairement les années où il y a eu un excédent de précipitations et celles où il y a eu un déficit. D’après ce graphe, il est à noter que les années 2014, 2016, 2020 et 2021 ont connu des précipitations en dessous de la moyenne (1264mm), tandis que l’année 2015 a en enregistré un fort excédent de précipitations.

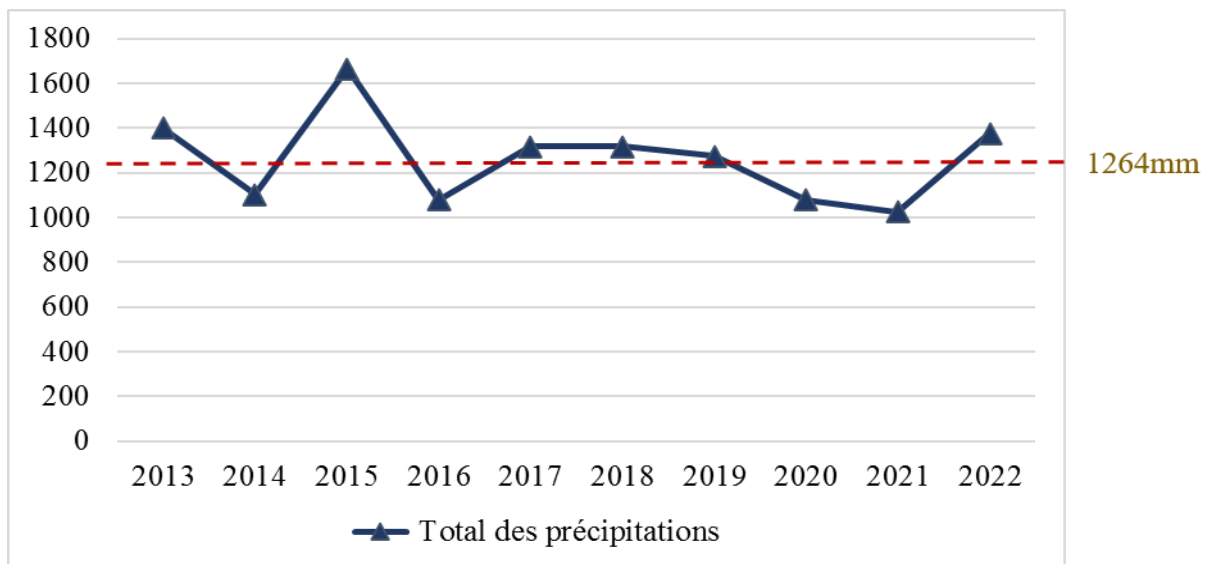


Figure 3 : Évolution des précipitations annuelles de 2013-2022

Source : Direction générale de la Météorologie, 2023

1.1.3. Type de sols

La région d'Itasy est dominée par des Ferralsols. Ces derniers sont caractérisés par une forte altération de l'horizon (≥ 30 cm d'épaisseur), entraînant une décomposition presque complète des minéraux altérables (cf. Annexe 1), composés d'argile de type kaolinite (phyllosilicates de type 1/1) et des sesquioxydes de fer et d'aluminium principalement dans la fraction argileuse (Van Wambeke, 1974). Le sol d'Imerintsiatosika a les propriétés physico-chimiques suivant :

Tableau 1 : Caractéristiques chimiques du sol d'Imerintsiatosika

Éléments	C total (g.kg ⁻¹)	N total (g.kg ⁻¹)	P total (g.kg ⁻¹)	pH eau	CEC (cmol+ kg ⁻¹)	P Olsen (mg. kg ⁻¹)
Valeurs	29,2	2,07	1,43	4,7	1,73	3,76

Source : Raminoarison *et al.*, 2021

Tableau 2 : Caractéristiques granulométriques du sol d'Imerintsiatosika

Éléments	Argile (%)	Limons fins (%)	Limons grossiers (%)	Sables fins (%)	Sables grossiers (%)
Valeurs	28,9	42,4	15,3	8,6	4,6

Source : Raminoarison *et al.*, 2021

D'après ce tableau, le sol présente un pH acide (< 5), une faible teneur en P Olsen de 3,8 mg.kg⁻¹, une faible CEC (< 2 cmol⁺kg⁻¹). Une faible teneur en N total est également observée ($< 2,5$ g.kg⁻¹). La concentration de carbone organique dans le sol est relativement modérée avec 29,2 g.kg⁻¹. Sa texture était dominée par des fractions fines (argile + limons) qui est caractérisé par une texture limoneux argilo fin.

1.2. Matériel végétal

La variété de riz utilisée lors de cette expérimentation est la « *Chhomrong Dhan* », qui est une variété d'origine népalaise. Elle a été introduite à Madagascar pour sa capacité à bien développer des feuilles même sur des terres moins fertiles (Raboin, 2013). Cette variété se caractérise par des panicules ouvertes de longueur moyenne. Les grains sont jaunes ou rouges (cf. Annexe 3). Du point de vue des caractéristiques agronomiques, c'est une variété pluviale qui se développe bien entre 1000 et 1800 m d'altitude. La durée du cycle est de 165 jours et la production moyenne observée en essai est de 5,3 t.ha⁻¹. Cette variété est sensible à la verse, mais assez résistante à la pyriculariose du riz.

1.3. Dispositif expérimental et facteurs étudiés

1.3.1. Historique des parcelles

Le dispositif expérimental est similaire au projet SECuRE (2017-2021). La première année, 16 pratiques de restauration des fonctions écologiques des sols (SFR) ont été testées. Neuf nouvelles

pratiques ont été ajoutées au cours de la deuxième année, et 11 des 16 pratiques de la première année ont été inoculées avec des vers de terre et des mycorhizes. La troisième année, ces 25 pratiques se sont poursuivies. La quatrième année, 20 pratiques SFR ont été alternées avec la culture du voandzou, à l'exception de 5 pratiques qui restent dédiées au riz. Au cours de l'année 5, toutes les parcelles sont revenues à la culture du riz, mais les pratiques ont changé pour les SFR 1, SFR 21, SFR 23 et SFR 25. Au cours de l'année 6, le modèle de l'année 5 a été reproduit sur deux dates de semis (D1 et D2), explorant l'impact du changement climatique sur la résilience des pratiques SFR. Les détails sont exposés dans l'annexe 4.

1.3.2. Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est formé par 4 blocs complets (4 répétitions) en split plot. Chaque bloc comporte 25 pratiques SFR numérotées selon les traitements. Chaque parcelle (pratique SFR) s'étend sur une superficie de 16 m² (4 m × 4m) et est séparée les unes des autres par une distance de 1 m. Les parcelles encadrées en jaunes sont les parcelles en lombricompost inoculées avec des vers de terre et celles en vert les parcelles en lombricompost sans inoculation de vers de terre. Chaque parcelle a été subdivisée en deux sous-parcelles de 8 m² afin de bien différencier le décalage de semis pour chaque traitement étudié (cf. Annexe 6).

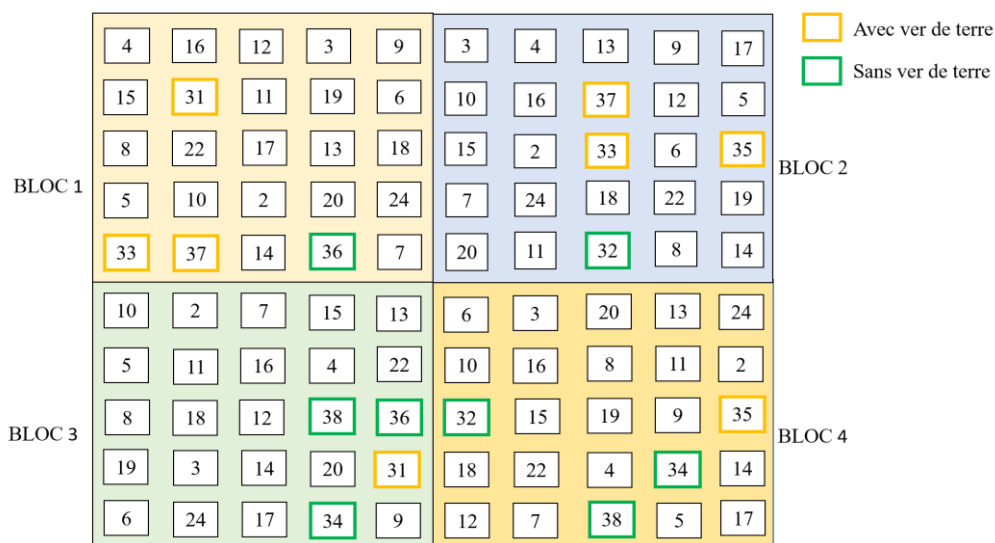


Figure 4 : Dispositif expérimental du site Imerintsiatosika

1.3.3. Facteurs étudiés

Pour la saison culturale 2022 - 2023, deux facteurs ont été étudiés :

- Décalage de semis à deux modalités :
 - o D1, le premier semis réalisé les 21,22,23 novembre 2022
 - o D2, le deuxième semis réalisé les 19,20,21 décembre 2022, soit un mois après le premier

- Les pratiques SFR comprennent 25 traitements dont 4 traitements issus des pratiques paysannes, 19 traitements issus des innovations scientifiques et 2 traitements en tant que contrôles.

Tableau 3 : Composition des 25 traitements

Traitements	Pratique	Matière	Dose
SFR2	Paysanne	Fumier traditionnel	3t MS/ha
SFR3	Paysanne	Fumier traditionnel NPK (11- 22- 16)	3t MS/ha 40kg/ha
SFR4	Scientifique	Fumier traditionnel	6t MS/ha
SFR5	Scientifique	Fumier amélioré	6t MS/ha
SFR6	Scientifique	Compost	6t MS/ha
SFR7	Scientifique	Lombricompost	6t MS/ha
SFR8	Contrôle positif	NPK (11- 22- 16) Urée (46%)	100kg/ha 100kg/ha
SFR9	Scientifique	Fumier traditionnel Dolomie	6t MS/ha 500kg/ha
SFR10	Scientifique	Fumier traditionnel Cendres	6t MS/ha 500kg/ha
SFR11	Scientifique	Fumier traditionnel Prochimad	6t MS/ha 500kg/ha
SFR12	Scientifique	Fumier traditionnel Compost Lombricompost	2t MS/ha 2t MS/ha 2t MS/ha
SFR13	Scientifique	Fumier traditionnel Compost Lombricompost Cendres	2t MS/ha 2t MS/ha 2t MS/ha 500kg/ha
SFR14	Scientifique	Fumier traditionnel Compost Lombricompost Prochimad	2t MS/ha 2t MS/ha 2t MS/ha 500kg/ha
SFR15	Scientifique	Fumier traditionnel Compost Lombricompost Guanomad	2t MS/ha 2t MS/ha 2t MS/ha 500kg/ha
SFR16	Contrôle négatif	Témoin négatif	
SFR17	Paysanne	Fumier de porc	3t MS/ha

		Cendres	500kg MS/ha
SFR18	Scientifique	Fumier traditionnel	18t MS/ha
SFR19	Scientifique	Fumier traditionnel	6t MS /ha
		Compost	6t MS /ha
		Lombricompost	6t MS /ha
SFR20	Scientifique	Fumier traditionnel	6t MS /ha
SFR22	Scientifique	Fumier traditionnel	18t MS/ha
SFR24	Scientifique	Fumier traditionnel	2t MS/ha
		Compost	2t MS/ha
		Lombricompost	2t MS/ha
		Fientes	500kg/ha
SFR31, 33, 34, 35, 36, 37, 38	Scientifique	Lombricompost	6t MS/ha

Chaque matière organique a ses propres caractéristiques chimiques (tableau4)

Tableau 4 : Caractéristiques chimiques des matières organiques et minérales utilisées

Échantillon	Cendre %	C%	N%	P%
Cendre de balles de riz	95,99	0,06	0,06	0,15
Fientes	31,41	30,25	2,25	0,89
Fumier amélioré	22,65	30,43	1,64	0,43
Fumier traditionnel	27,30	28,60	1,16	0,22
Fumier Porc	29,90	28,53	2,39	1,89
Guano (Guanomad)	68,71	3,51	1,12	4,60
Compost (Madacompost)	65,77	17,85	1,67	0,33
Lombricompost (Tata)	57,23	13,05	1,52	0,34
Urée	0,14	19,31	45,22	**
NPK	53,89	3,31	34,92	2.22
Dolomie	88,31	0,06	0,06	**
Hyperphos	88,44	0,48	0,06	4,86

1.4. Opérations culturales

1.4.1. Préparation du sol

Le travail du sol a été effectué manuellement avec un « *angady* ». L'ensemble de la parcelle a été préparé un mois avant le premier semis (D1). Il consiste à effectuer un labour, plus précisément à retourner le sol sur une profondeur de 10-15 cm.

1.4.2. Fertilisation

Les apports en fertilisant pour chaque traitement SFR ont été effectués lors du semis pour les sous-parcelles D1 et D2. Des apports localisés (en poquet) ont été réalisés pour chaque traitement. Pour la pratique SFR 20 qui est composée d'un apport de fumier traditionnel à 6t MS. ha⁻¹, l'apport a été fait en 3 temps avec le premier apport au moment du semis, le second un mois après le semis et le troisième deux mois après le semis. Et pour le SFR 8, l'apport de l'urée a été fait 1 mois après le semis.

1.4.3. Semis

La date de semis a été espacée de 29 jours entre D1 et D2. Pour D1, le semis a été effectué les 21, 22 et 23 novembre 2022 et pour D2 les 19,20 et 21 décembre 2022.

Le semis a été réalisé en poquet, et pour chacune des parcelles D1 et D2, 200 poquets ont été formés soit 400 poquets par pratique SFR (25 poquets au mètre carré). La distance entre les pieds de riz (poquets) est de 20 cm * 20 cm et le nombre de grains semés est de 6 à 8 par poquet.

1.4.4. Entretien

Le désherbage a été effectué un mois après chaque date de semis au cours de la phase végétative.

1.4.5. Inoculation de vers de terre

L'espèce inoculée est un ver endogé géophage *Pontoscolex corethrurus* ou « *kankamena* », une espèce locale qui a été collectée manuellement autour du site expérimental. L'inoculation a été réalisée respectivement 60 jours après semis ou JAS pour D1 et 27 JAS pour D2 sur 8 parcelles des SFR31-33 et SFR35-37. La densité de vers introduite était de 50 vers de terre/m².

1.5. Mesures effectuées

Les mesures effectuées visent à caractériser les propriétés agronomiques, pédologiques et biologiques. Les paramètres pédologiques et biologiques sont englobés dans le paramètre écologique du sol.

1.5.1. Paramètres agronomiques

Les mesures des propriétés agronomiques comprennent l'évaluation des paramètres de rendement et de croissance du riz.

- **Hauteur et nombre de talles**

Pour chaque parcelle, 28 poquets ont été mesurés : 14 sur la sous-parcelle D1 et 14 sur la sous-parcelle D2, toutes deux situées dans le carré de rendement (cf. annexe 6). Selon le stade physiologique de la plante, deux mesures ont été réalisées, dont le début et la fin du tallage. Pour D1, les mesures ont été prises à 64 JAS et 92 JAS, et pour D2, les mesures ont été prises à 57 JAS et 85 JAS.

○ **Rendement en grains et en pailles**

La récolte a été effectuée pendant la maturation physiologique de l'épi, à 148 jours après semis (JAS), pour chaque sous-parcelle D1 et D2. Un carré de rendement de 2m² a été délimité dans chaque sous-parcelle, contenant 50 poquets. Dans ce carré, 7 poquets ont été choisis pour évaluer la productivité. La tige et les panicules ont été séparées et pesées individuellement. Les pieds de riz restant dans le carré, après vannage, ont été pesés pour obtenir le poids frais de la paille et des grains. Ces éléments ont ensuite été placés dans une étuve à 60°C pendant 1 semaine afin de calculer le poids de matière sèche (MS) et déterminer le rendement en grains et en paille pour chaque traitement. Pour D1, en raison des attaques de grêle juste avant la récolte, les grains ont été ramassés.

○ **Suivi de la floraison**

La floraison a été suivie pendant le stade physiologique de la plante : 92JAS pour D1 et 64JAS pour D2. Des comptages de nombres de pieds qui fleurissent ont été effectués tous les 2 à 3 jours pour chaque traitement pendant 51 jours.

○ **Quantité de phosphore dans les grains**

La détermination de la quantité de phosphore dans les grains comporte trois étapes : (i) minéralisation (ii) extraction et (iii) détermination de la quantité de phosphore. Pour la minéralisation, les échantillons sont broyés, pesés, puis soumis à une séquence de températures croissantes. Après refroidissement, l'échantillon est sorti de l'étuve et humidifié avec 2 à 3 ml d'eau distillée, puis additionné de 1 ml d'HCl concentré, puis extrait. A chaque extrait, deux réactifs A et B sont ajoutés. Ensuite, des mesures spectrophotométriques sont réalisées. La quantité de phosphore est calculée à partir de la teneur obtenue pour chaque échantillon, ajustée en fonction de la matière sèche. La formule est la suivante.

Quantité en phosphore dans les grains = teneur (g.kg⁻¹ MS) x poids secs (kg MS)

1.5.2. Paramètres pédologiques

Sur chaque parcelle, des monolithes mesurant 25x25cm de côté ont été collectés (cf. Annexes 6). À partir de ces monolithes, des échantillons de sol ont été prélevés sur 0-10 cm et 10-20 cm de profondeur. Ces sols prélevés ont ensuite été séchés à l'air libre puis broyés pour les analyses en laboratoire (pH eau et P résine).

○ **pH eau**

Le sol est broyé, tamisé à 2 mm, puis 5g de sol sont pesés. Ensuite, 12,5 ml d'eau distillée sont ajoutés, et le mélange est agité sous un agitateur pendant 30 minutes avant de procéder à la lecture du pH sur le pH-mètre.

○ **Phosphore résine**

Avant l'extraction, une régénération de la résine a été effectuée. Pour l'extraction, la résine fraîchement préparée a été agitée avec 2g de sol et 30 ml d'eau distillée pendant 16 heures pour fixer le phosphore. Le phosphore du sol a été repris dans une solution de HCl 0,1 M mélangé avec du NaCl 0,1 M, agité pendant 2 heures. L'extrait a été prélevé avec les réactifs, suivi d'une période de repos de 16 heures avant la lecture sur le spectromètre.

○ **Macrofaune**

L'échantillonnage de la macrofaune du sol a été réalisé à partir des monolithes prélevés sur chaque parcelle. La méthode TSBF (Tropical Soil Biology and Fertility) a été employée, consistant à récolter tous les invertébrés du sol visibles à l'œil nu dans un monolithe de 25 cm², à deux profondeurs : 0-10 et 10-20 cm. Après tri manuel, les invertébrés ont été conservés dans des piluliers avec de l'alcool à 70°C. Au laboratoire, chaque pilulier a été traité : (i) identification, (ii) pesée, (iii) comptage, et (iv) classification des organismes récoltés au niveau des Ordres pour constituer la macrofaune.

Pour déterminer le niveau de structure de peuplement des espèces, deux indices ont été définis par la formule suivante :

● **Indice de Shannon**

L'indice de Shannon donne une mesure de la biodiversité en tant que quantité d'information dont la formule est la suivante :

$$H = \sum_{s=i}^s ps \ln ps$$

ps : Probabilité d'apparition d'un échantillon donnée

H : indice de Shannon

i : espèces

● **Équitabilité**

Le coefficient d'équitabilité de Pielou traduit le degré de diversité atteint par rapport au maximum possible, sa valeur est comprise entre 0 et 1. Son expression est la suivante :

$$E = \frac{H}{Hmax} = \frac{H}{\ln(S)}$$

H : indice de Shannon

H max : ln (S) où S désigne le nombre d'ordres, il représente la valeur théorique de la diversité maximale pouvant être atteinte dans chaque groupement.

1.5.3. Paramètres pluviométriques

Une station pluviométrique a été mise en place sur le site expérimental pour suivre les précipitations depuis le début de la première pluie jusqu'à la dernière. Ces données ont été utilisées pour quantifier la quantité de pluie reçue par la plante.

1.6. Traitement de données et analyse statistiques

Sur la base des résultats obtenus et des observations faites sur le terrain lors de l'expérimentation, l'élimination des résultats du bloc 1 a été faite, car ce bloc était fortement attaqué par les vers blancs (cf. Annexe 7), ce qui pourrait affecter très fortement les résultats.

Afin d'atteindre le premier objectif spécifique, visant à mesurer l'effet des pratiques SFR sur les paramètres agronomiques et écologiques du sol, des tests statistiques sur les données issues du semis normal (D1) ont été réalisés. Les deuxième et troisième objectifs ont été abordés par des tests statistiques sur les deux dates de semis, D1 et D2. Une différence relative entre D2 et D1 $((D2-D1) * 100/D1)$, appelée Delta a été calculée pour évaluer la variation des données entre les deux dates de semis et pour déterminer l'impact significatif sur les paramètres agronomiques du riz. Les analyses statistiques ont évalué les effets des pratiques SFR et du décalage de semis sur les paramètres agronomiques du riz et les caractéristiques écologiques du sol. Quatre tests ont été appliqués en fonction de la distribution des données : (i) l'ANOVA (ii) le MODÈLE MIXTE (iii) le test de KRUSKAL-WALLIS et le (iv) PERMANOVA. L'ANOVA a été utilisée pour les données suivant une loi normale, confirmée par les tests de Shapiro-Wilk et de Levene pour l'homoscédasticité de la variance (p -value > 0,05). Lorsque les données ne suivent pas une loi normale, elles sont transformées par box-cox ou par $\log(x+1)$. Après cette étape, le test de normalité a été reconduit. Pour les données transformées normales, l'ANOVA a été utilisée. Le MODÈLE MIXTE a été adopté pour les données où le facteur bloc a eu un effet significatif sur la variable, le considérant comme un facteur aléatoire. Les tests de KRUSKAL et le PERMANOVA qui sont des tests non paramétriques, ont été employés pour les variables ne suivant pas une loi de distribution normale, KRUSKAL pour les données à un facteur et PERMANOVA pour celles à deux facteurs. Des tests de comparaisons par paires ont été réalisés après les tests statistiques en cas d'effets significatifs. Le seuil de significativité a été fixé à 5%.

Une analyse en Composante Principale (ACP) a été réalisée pour voir la corrélation entre les variables et les différentes pratiques SFR. Une ACP portant sur le taux d'attaque des vers blancs a également été effectuée afin d'identifier les pratiques SFR et les variables les plus fortement corrélées avec les attaques, en tenant compte du stade de développement du riz.

2. RÉSULTATS

2.1. Analyse des paramètres pluviométriques sur la croissance du riz

Le site a enregistré une quantité totale de 1200 mm de précipitations au cours de la saison culturale 2022-2023, s'étendant de la fin du mois d'octobre au mois d'avril, couvrant ainsi la période allant de la première à la dernière pluie. L'arrivée de la première pluie pour cette année culturale a été conforme à la normale, débutant en octobre (43 mm), et sa distribution a également suivi une tendance normale, avec un pic observé en janvier. La dernière pluie a été observé en mois de mai (27mm).

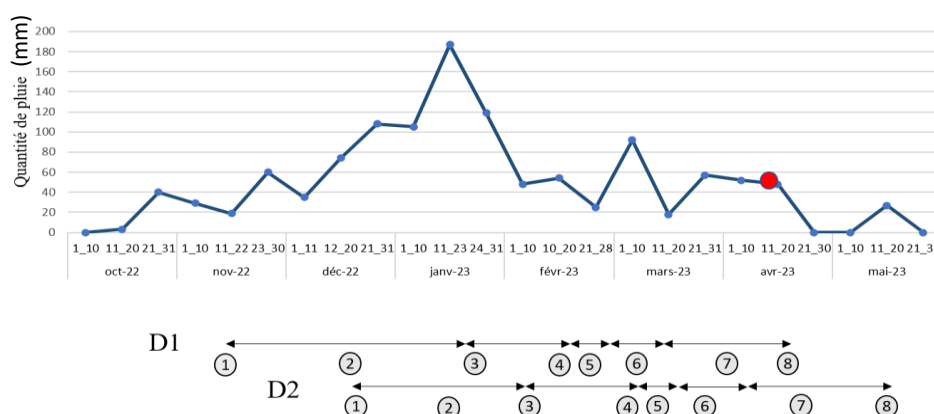


Figure 5 : Cumul (en mm) de la quantité de pluie pour les deux dates de semis D1 et D2 au cours des différents stades phénologiques du riz

Les chiffres représentent les différents stades phénologiques du riz : 1 (semis), 2 (levée), 3 (début de tallage), 4 (fin de tallage), 5 (initiation paniculaire), 6 (floraison), 7 (remplissage et maturation des grains), 8 (récolte) et D1 pour la première date de semis et D2 pour le second date de semis, et le point rouge représente le moment de la grêle

Tableau 5 : Quantité de pluie reçue par le site au cours de l'expérimentation et quantité moyenne mensuelle de pluie dans la zone sur une durée de 10 ans

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Total
Quantité sur le site en 2022 - 2023 (mm)	43	108	217	411	127	167	100	27	1200
Moyenne mensuelle sur 10ans (mm)	64,7	143,1	251,1	275,8	249,6	214,9	34,1	7,8	1241,1

Pour les deux dates de semis, la quantité de pluie reçue par le riz est différente selon le stade phénologique :

✓ **Pendant la phase végétative**

La phase végétative s'étend du semis jusqu'au début de la formation des organes reproducteurs ou fin du tallage. Dans notre étude, la durée de cette période varie en fonction des deux dates de semis D1 et D2. Pour la première date de semis (D1), elle commence en mi-novembre et se termine en mi-février, tandis que pour la deuxième date de semis (D2), elle s'étend entre mi-décembre au début mars. Les résultats indiquent que la quantité de précipitations est normale pendant la phase végétative, correspondant aux besoins de la plante, et est également comparable à la moyenne mensuelle des précipitations observée au cours des dix dernières années. Cependant, pour cette année 2022-2023, on observe une forte quantité de pluie enregistrée au mois de janvier (411 mm), dépassant largement la moyenne mensuelle observée au cours des dix dernières années (275,8 mm). Cette période coïncide avec le début du tallage pour D1 et le stade de levée pour D2. À la fin de la phase de tallage, en février et mars, on constate une légère diminution de la quantité de pluie par rapport à la moyenne mensuelle observée au cours des dix dernières années. La quantité totale de pluie reçue par D1 au cours de la phase végétative est égale à 738 mm tandis que pour D2 elle est égale à 765 mm ce qui fait une différence de 27 mm de précipitations.

✓ **Pendant la phase reproductive et de maturation**

La phase reproductive correspond à la période au cours de laquelle les organes de reproduction, appelés panicules, commencent à se former, elle se poursuit jusqu'à la floraison. En ce qui concerne la maturation, les grains se remplissent pour atteindre la maturité du cycle. Pour ces phases, elles débutent en mi-février pour D1 et se terminent en avril, tandis que pour D2, elles commencent en mi-mars et se concluent en mai, marquant ainsi la saison de récolte. Pendant ces phases, la quantité de précipitations enregistrée sur le site au cours de cette année culturale est nettement inférieure à la moyenne mensuelle observée au cours des dix dernières années pourtant, quelques jours avant la récolte de D1, on a été confronté à une chute de grêles. Au total pendant la phase reproductive D1 a reçu une quantité totale de pluie de 346 mm et D2 une quantité de pluie de 231 mm.

Les quantités reçues pendant chaque stade phénologique pour les deux dates de semis sont présentées dans le tableau dans l'annexe (cf. Annexe 2)

2.2. Analyse de l'effet des différentes pratiques sur les paramètres agronomiques du riz et écologiques du sol

2.2.1. Effet des pratiques SFR sur les propriétés agronomiques du riz

2.2.1.1. Nombre de talles

La figure 6 montre le nombre de talles du riz à deux stades phénologiques (début et fin de tallage) pour chaque pratique SFR. Au début du tallage, aucun effet significatif de la pratique SFR n'a été observé (valeur $p = 0,115$). Cependant, à la fin de la période de tallage, nous avons observé un effet fortement significatif entre les pratiques SFR (valeur $p < 0,001^{***}$).

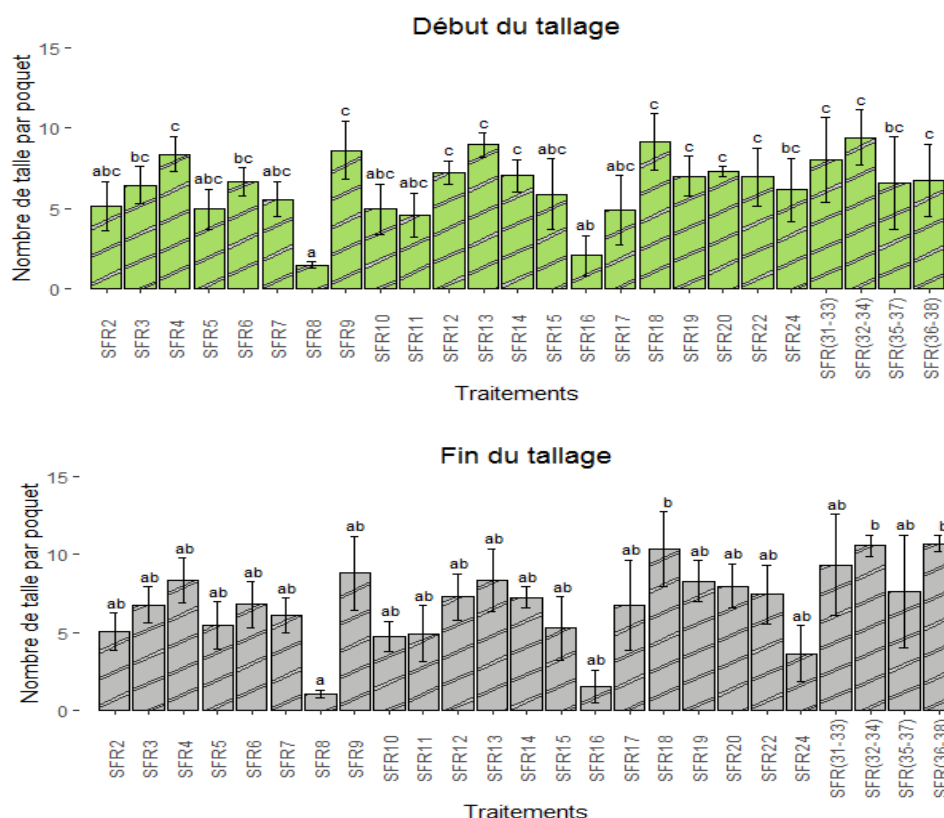


Figure 6 : Nombre de talles

Les barres d'erreurs sont représentées par les erreurs types et la lettre « a , b et c » indique la présence de différence significative entre les traitements au seuil de 5% au stade de fin tallage.

Au stade de début tallage, le SFR 32-34, constitué de lombricompost sans inoculation de vers de terre, affiche la valeur la plus forte en nombre de talles avec une moyenne de $9,41 \pm 2,96$ talles par pieds. Les autres SFR présentant également des formations importantes de talles sont le SFR 18 ($9,11 \pm 3,07$ talles), SFR 13 ($8,95 \pm 1,27$ talles), SFR 9 ($8,62 \pm 3,16$ talles), SFR 4 ($8,38 \pm 1,9$ talles), et SFR 31-33 ($8,01 \pm 4,6$ talles). Ces SFR impliquent soit des mélanges de matières soit des fumiers traditionnels, soit du lombricompost. En revanche, les pratiques présentant la plus faible formation de talles sont observés dans les SFR 8 et SFR 16, où le SFR 8 est fertilisé par des matières minérales (NPK et urée), et SFR 16 est un témoin négatif (sans apports). Les SFR 11, SFR 17, SFR 5 et SFR 10 affichent également un faible nombre de talles au stade de début du tallage, avec une valeur moyenne de 4,7 talles pour ces quatre traitements. Au stade de fin du tallage, les SFR montrant le plus grand nombre de talles sont le SFR 36-38, le SFR 32-34 et le SFR 18, avec des valeurs respectives de $10,71 \pm 0,89$, $10,57 \pm 1,17$ et $10,36 \pm 4,11$ talles. Les deux premières pratiques comprennent du lombricompost à $6 \text{ tMS} \cdot \text{ha}^{-1}$ sans inoculation de vers, tandis que le SFR 18 est composé de fumier traditionnel avec une quantité de $18 \text{ tMS} \cdot \text{ha}^{-1}$, apportée tous les 3 ans. En revanche, les SFR 8 et SFR 16 continuent de présenter le plus faible nombre de talles, avec des valeurs de $1,05 \pm 0,45$ talle et $1,54 \pm 1,83$ talles respectivement. Les SFR 10 et SFR 11

maintiennent également une formation faible en nombre de talles même à la fin du tallage, avec des valeurs de $4,74 \pm 1,71$ talles et $4,93 \pm 3,11$ talles. En termes de comparaisons par paires, aucun effet significatif n'a été observé entre les différents SFR sauf sur les SFR 18 et SFR 32-34 avec le SFR 8.

2.2.1.2. Hauteur

La Figure 7 illustre la mesure de la hauteur du riz à deux stades distincts, tant au début qu'à la fin du tallage. Les résultats de l'ANOVA révèlent que les pratiques SFR ont un impact fortement significatif sur la hauteur du riz, aussi bien au début qu'à la fin du tallage, avec une valeur de $p < 0,001^{***}$.

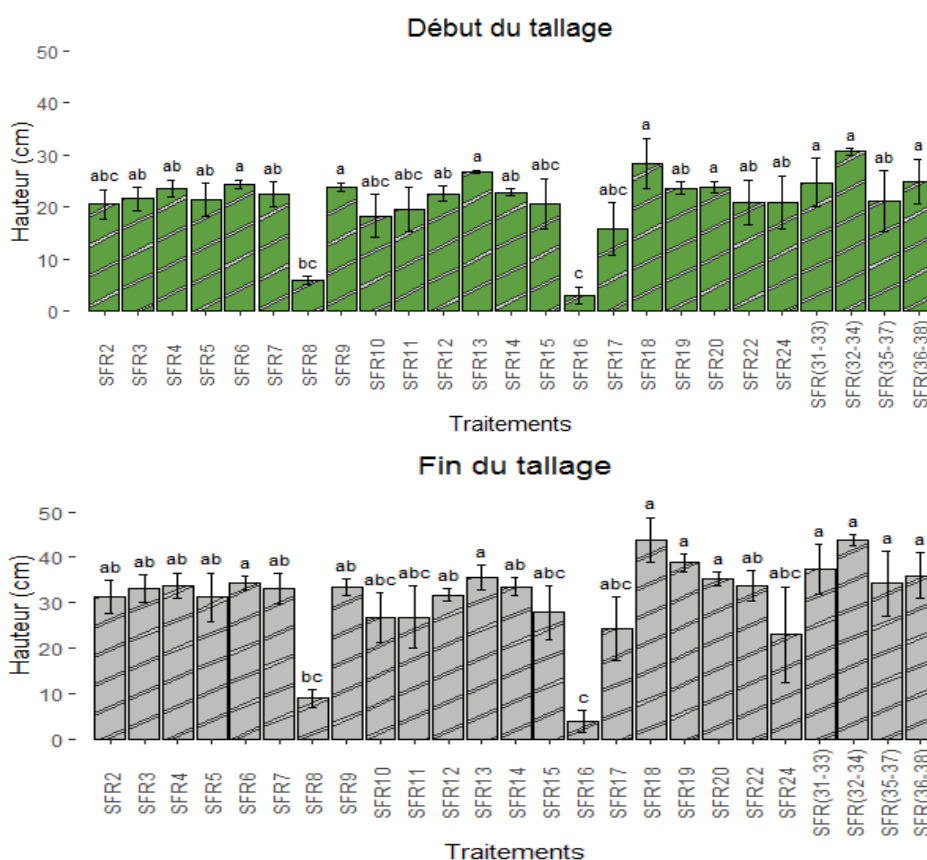


Figure 7 : Hauteur de riz pendant les deux stades phénologiques : début et fin de tallage

Les barres d'erreurs sont représentées par les erreurs types et les lettres (a, b et c) indiquent les différences significatives entre les traitements au seuil de 5%.

Au début du tallage, la hauteur la plus importante a été observée dans le SFR 32-34, atteignant $30,64 \pm 1,14$ cm. Après le SFR 32-34, les pratiques présentant les performances les plus élevées en termes de hauteur sont les suivantes : SFR 18 ($28,53 \pm 8,28$ cm), SFR 13 ($26,74 \pm 0,64$ cm), SFR 31-33 ($24,71 \pm 8,03$ cm), SFR 36-38 ($24,85 \pm 7,51$ cm), SFR 6 ($24,40 \pm 1,43$ cm), SFR 20 ($23,83 \pm 2,00$ cm), SFR 9 ($23,83 \pm 1,41$ cm). Ils sont composés soit d'assemblages de matières organiques,

soit de compost ou de fumier traditionnel. Les comparaisons par paires de Tukey indiquent qu'aucune différence significative n'est observée entre ces SFR, ce qui signifie qu'ils appartiennent tous au même groupe. En ce qui concerne la croissance la plus faible en hauteur, elle a été constatée dans le SFR 8 et le SFR 16. Entre ces deux SFR, une comparaison par paire de Tukey ne révèle aucune différence significative. Les SFR 17, SFR 10 et SFR 11 présentent également une croissance en hauteur plus faible que les autres pratiques, avec des valeurs respectives de $15,78 \pm 8,74$ cm, $18,23 \pm 7,23$ cm et $19,47 \pm 7,47$ cm.

Au stade de fin tallage, le SFR ayant la hauteur la plus élevée est celui avec du fumier traditionnel à 18 tMS.ha^{-1} (SFR 18), atteignant une hauteur de $43,81 \pm 8,61$ cm. Il est suivi par les pratiques suivantes : SFR 32-34, SFR 19, SFR 31-33, SFR 36-38, SFR 13, SFR 20, SFR 6 et SFR 35-37. Ces différentes pratiques sont principalement composées d'assemblages de matières organiques, mais comprennent également des fumiers traditionnels, du compost, ou du lombricompost uniquement. Les comparaisons par paires de Tukey indiquent que toutes ces différentes pratiques appartiennent au même groupe et ne présentent aucune différence significative entre elles. La croissance en hauteur la plus faible est observée dans le SFR 16, avec une hauteur de $3,86 \pm 4,17$ cm.

2.2.1.3. Floraison

La période de floraison a été observée depuis l'apparition de la première fleur jusqu'à 100% de floraison pour certains SFR, bien que cette observation n'ait pas été effectuée pour l'ensemble. En général, tous les SFR ont atteint la floraison à hauteur de 50%. La Figure 8 illustre le nombre de jours écoulés depuis le semis jusqu'à l'atteinte de 50% de floraison pour toutes les SFR. L'analyse statistique ANOVA a révélé un effet fortement significatif ($p\text{-value} < 0,001^{***}$) sur la durée de la floraison entre les différentes SFR.

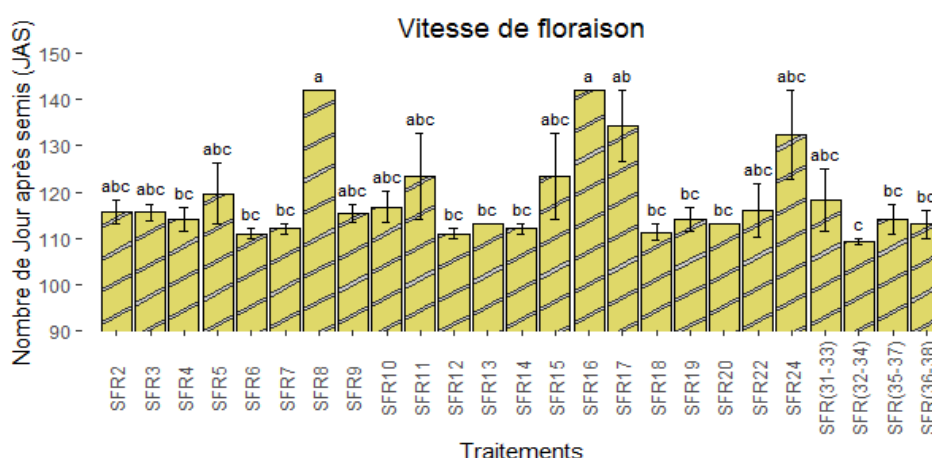


Figure 8 : Durée pour atteindre 50% de floraison depuis la date de semis pour différents traitements

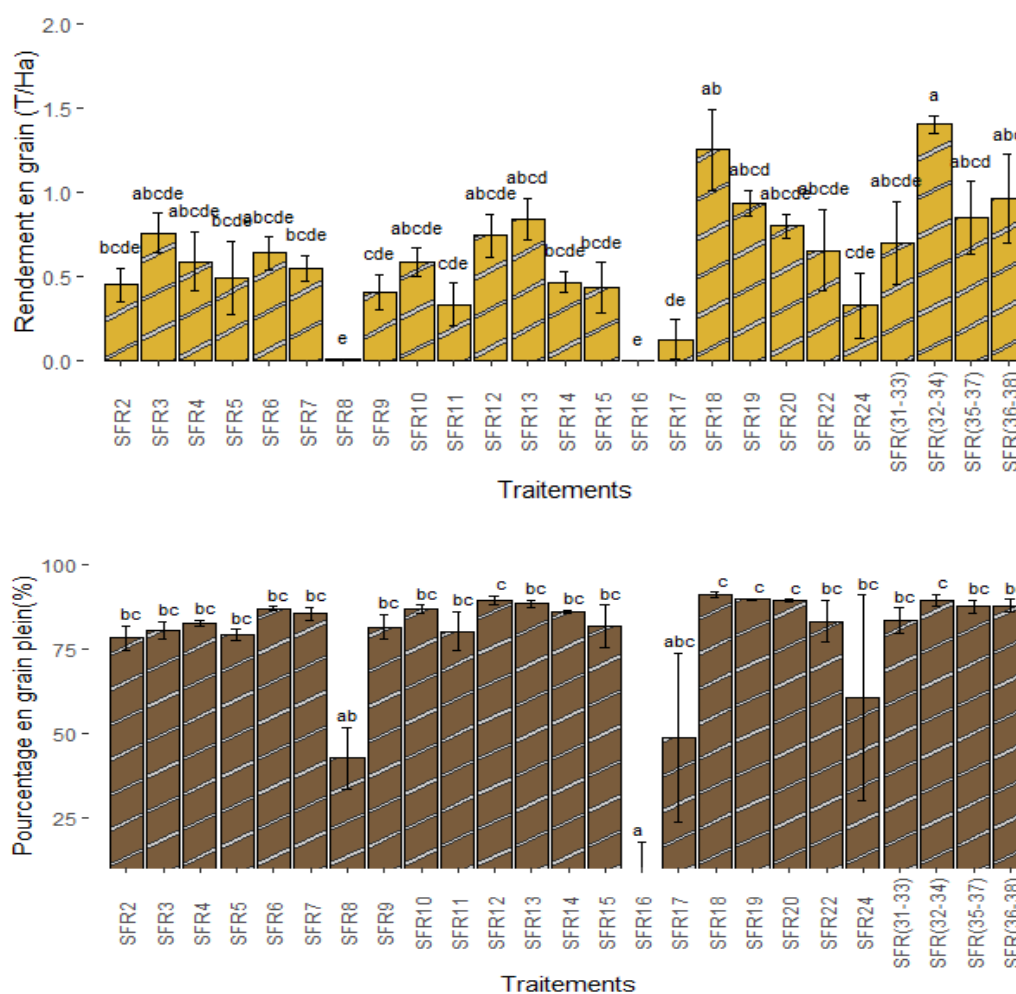
Les barres d'erreurs sont représentées par les erreurs types et les lettres (a, b et c) indiquent les différences significatives entre les traitements au seuil de 5%.

Le SFR présentant la durée de floraison la plus courte est le SFR 32-34, composé de lombricompost, avec une durée moyenne de 109 jours après le semis (JAS). Ensuite viennent les SFR 6, SFR 12, SFR 18, SFR 7, SFR 14, SFR 36-38, SFR 20 et SFR 13. Ces différents SFR sont principalement composés d'assemblages de matières organiques et contiennent tous des composts ou du lombricompost, à l'exception de SFR 18 et SFR 20, qui sont composés de fumiers traditionnels. Les comparaisons par paires de Tukey ont montré qu'entre ces différentes pratiques aucune différence significative n'a été observée. Le SFR 16 et le SFR 8 présentent la durée de mise en place de la floraison (à 50%) la plus longue, avec une moyenne de plus de 142 JAS. La comparaison par paire de Tukey n'a pas montré de différence significative entre ces deux pratiques. Pour les autres pratiques, leur durée de floraison varie de 115 à 134 JAS.

2.2.1.4. Rendement

La figure 9 ci-dessous présente les rendements en grain, en paille, le pourcentage en grain plein et le rendement total pour les différents SFR. L'analyse des résultats montre que les pratiques SFR ont un impact fortement significatif sur le rendement ($p\text{-value} < 0,001^{***}$) et un effet moyennement significatif sur le pourcentage de grains pleins ($p\text{-value} = 0,002^{**}$).

RENDEMENTS



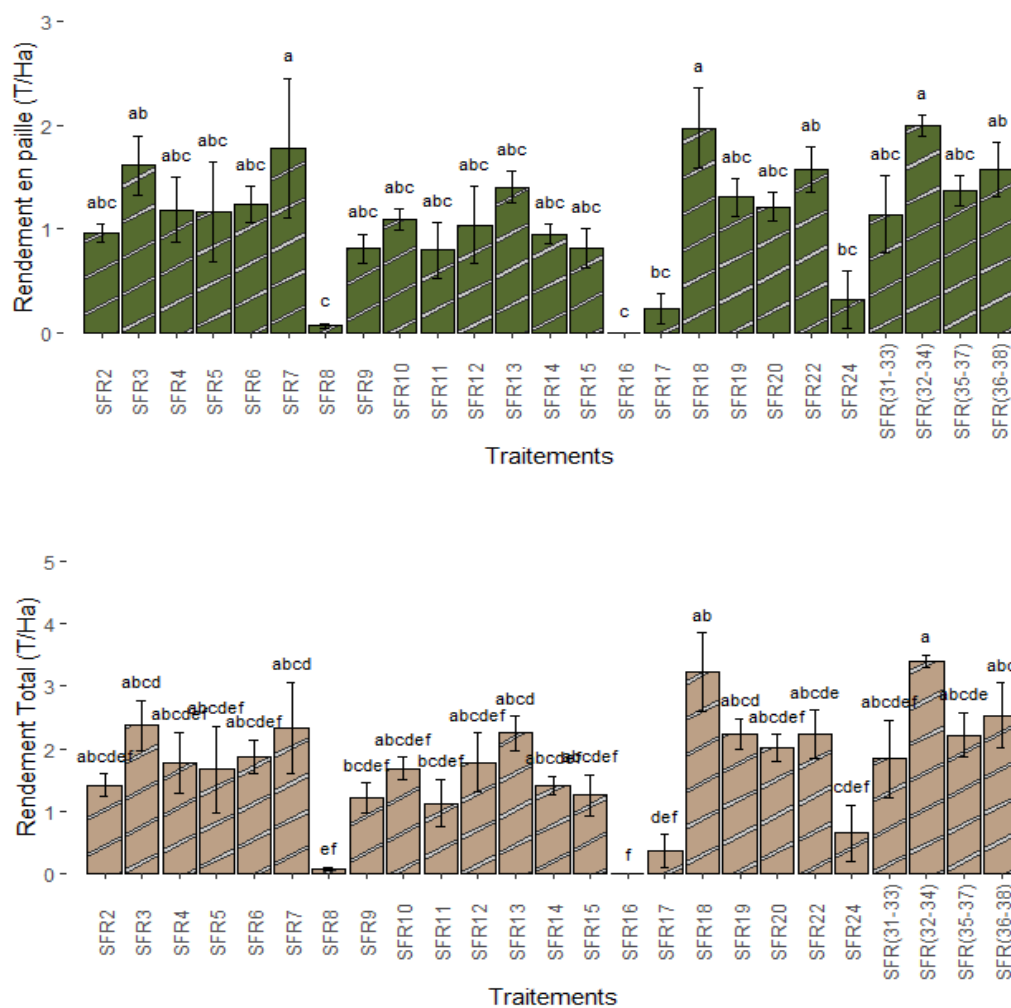


Figure 9 : Rendement en grain (jaune), pourcentage en grain plein (marron foncé) rendement en paille (en vert) rendement total (marron clair) en Tms.ha⁻¹

Les barres d'erreurs sont représentées par les erreurs types et les lettres (a, b, c, d, e et f) indiquent les différences significatives entre les traitements au seuil de 5%.

Le SFR 32-34 avec l'apport de lombricompost de 6 tMS.ha⁻¹ affiche le rendement en grains le plus élevé (1,40 ± 0,08 tMS.ha⁻¹). Ce SFR est significativement différent de nombreuses autres pratiques, comme démontré par des comparaisons par paires de Tukey. Après le SFR 32-34, les SFR qui présentent les meilleurs rendements sont le SFR 18 et le SFR 36-38 avec des rendements respectifs de 1,25 ± 0,41 tMS.ha⁻¹ et 0,96 ± 0,45 tMS.ha⁻¹. Ces pratiques sont composées de fumiers traditionnels à 18 tMS.ha⁻¹ ainsi que de lombricompost à 6 tMS.ha⁻¹. Entre ces deux pratiques, aucune différence significative n'est observée. Après le SFR 16 et le SFR 8, des rendements faibles sont également observés sur le SFR 17 (0,12 ± 0,20 tMS.ha⁻¹), SFR 24 (0,32 ± 0,33 tMS.ha⁻¹) ainsi que le SFR 11 (0,33 ± 0,21 tMS.ha⁻¹). Ces pratiques sont toutes composées d'assemblages de matières. Les comparaisons par paires de Tukey n'ont montré aucune différence significative entre

ces trois SFR. Cependant, même s'ils présentent des rendements faibles, ils diffèrent des pratiques témoins (SFR 8 et SFR 16), mais la différence n'est pas significative.

Le SFR 18 affiche la meilleure performance en termes de pourcentage en grains pleins, atteignant $90,94 \pm 1,31$ %. Il est composé par un apport de fumier traditionnel à $18 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$. Ensuite viennent le SFR 19 ($89,55 \pm 0,28\%$), le SFR 20 ($89,35 \pm 0,46\%$), SFR 32-34 ($89,31 \pm 3,29\%$) et le SFR 12 ($89,29 \pm 2,35\%$). Ces pratiques sont composées d'un apport de fumier traditionnel, ainsi que d'un assemblage de matières organiques ou de lombricompost. Les comparaisons par paires ne montrent aucune différence significative entre ces différentes pratiques. Le SFR 16 présente le plus faible pourcentage en grains pleins, avec une valeur très minime de $8,91 \pm 15,43\%$.

Les SFR 32-34, SFR 18, et SFR 7 affichent les meilleures performances en termes de rendement en paille par rapport à tous les SFR, avec des rendements respectifs de $1,99 \pm 0,17 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$, $1,97 \pm 0,66 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ et $1,78 \pm 1,15 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$. Ils sont composés de fumier traditionnel pour le SFR 18 et de lombricompost pour le SFR 7 et le SFR 32-34. Entre ces trois SFR, aucune différence significative n'a été observée. Le SFR 3 ($1,63 \pm 0,49 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$), SFR 22 ($1,57 \pm 0,37 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$) et le SFR 36-38 ($1,57 \pm 0,45 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$) présentent également des rendements en paille élevés, et ils sont composés d'apports de fumier traditionnel ou de lombricompost. Entre ces SFR, aucune différence significative n'est observée. Après les SFR témoins (SFR 8 et SFR 16), le SFR 17 et le SFR 24 présentent les rendements les plus faibles avec des valeurs de $0,32 \pm 0,46 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ et $0,23 \pm 0,25 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$. Ces pratiques sont composées d'un assemblage de fumier de porc à $3 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ + cendres à $500 \text{ kg MS}\cdot\text{ha}^{-1}$ issue des pratiques paysannes (SFR 17), et d'un assemblage de fumier traditionnel à $2 \text{ t MS}\cdot\text{ha}^{-1}$, de compost à $2 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$, de lombricompost à $2 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ et de fientes de volailles à $500 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour le SFR 24. Entre ces deux pratiques, aucune différence significative n'est observée.

Le rendement total est obtenu en additionnant le rendement en grain et le rendement en paille. La pratique affichant la meilleure performance en biomasse aérienne est le SFR 32-34 avec un rendement de $3,39 \pm 0,17 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$, suivi du SFR 18 avec une valeur de $3,22 \pm 1,08 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$, puis du SFR 36-38 avec une valeur de $2,53 \pm 0,90 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$. Cependant, les comparaisons par paires de Tukey n'ont révélé aucune différence significative entre ces trois pratiques. Les SFR 3 ($2,36 \pm 0,69 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$), SFR 7 ($2,33 \pm 1,27 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$), SFR 13 ($2,24 \pm 0, \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$), et le SFR 19 ($2,23 \pm 0,41 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$) présentent des rendements moyens. Ces SFR sont principalement composés de compost, de lombricompost et d'assemblages de matières. Suite à une comparaison par paire, aucune différence significative n'a été constatée. Le SFR 24 et le SFR 17 affichent les rendements les plus faibles, avec des valeurs respectives de $0,69 \pm 0,81 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ et $0,55 \pm 0,79 \text{ tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$. Une comparaison par paire entre ces deux pratiques n'a pas montré de différence significative.

2.2.1.5. Phosphore total dans les grains

La figure 11 ci-dessous montre la quantité en phosphore total dans les grains pour chaque pratique SFR. Le résultat de l'ANOVA a montré que les pratiques SFR ont un effet fortement significatif (p -value > 0,001***) sur la quantité en phosphore total dans les grains.

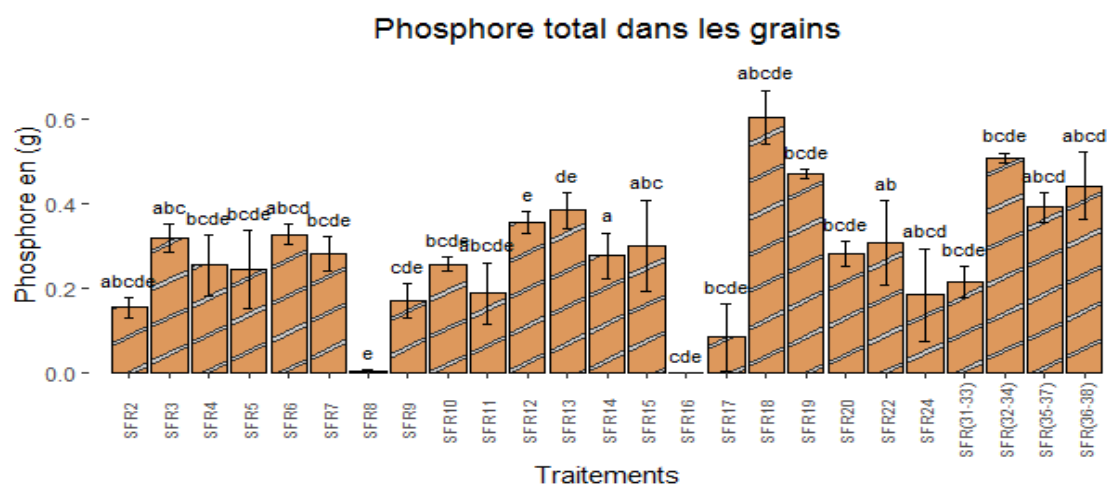


Figure10 : Effet des traitements SFR sur la quantité de phosphore contenue dans les grains

Les barres d'erreurs sont représentées par les erreurs types et les lettres (a, b, c, d, et e) indiquent les différences significatives entre les traitements au seuil de 5%.

Le SFR 18 présente la plus grande quantité de phosphore total dans les grains, avec une valeur de $0,6 \pm 0,1$ g, suivi du SFR 32-34 avec une quantité de $0,50 \pm 0,02$ g. Ces deux SFR sont principalement composés d'un apport de fumier traditionnel à 18 t.MS. ha⁻¹ et de lombricompost à 6 tMS.ha⁻¹. Cependant, une comparaison par paire de Tukey n'a montré aucune différence significative entre ces deux SFR. Le SFR 19 et le SFR 36-38 affichent également des valeurs élevées par rapport aux autres pratiques, soit $0,47 \pm 0,01$ g et $0,44 \pm 0,13$ g. Le SFR 36-38 est composé d'un apport de lombricompost, tandis que le SFR 19 est composé d'un assemblage de matière organique comprenant du fumier traditionnel, du compost et du lombricompost, toute à raison de 6 tMS.ha⁻¹. La comparaison par paire de Tukey a montré qu'entre ces deux pratiques, il n'y a pas de différence significative. La plus faible quantité de phosphore est observée dans les SFR 2, SFR 11, SFR 9, SFR 17 et SFR 24, avec des quantités respectives de $0,15 \pm 0,04$ g, $0,18 \pm 0,12$ g, $0,17 \pm 0,07$ g, $0,08 \pm 0,13$ g, $0,18 \pm 0,19$ g. Ces pratiques sont composées d'un apport de fumier traditionnel à 3 t.MS.ha⁻¹ (SFR 2), d'un assemblage de fumier traditionnel à 6 t.MS.ha⁻¹ et de Prochimad à 500 kg.ha⁻¹ (SFR 11), d'un assemblage de fumier traditionnel à 6 t.MS.ha⁻¹ et de dolomie à 500 kg.ha⁻¹ (SFR 9), d'un assemblage de fumier de porc à 3 t.MS.ha⁻¹ et de cendres à 500 kg.ha⁻¹ (SFR 17), et d'un assemblage de fumier traditionnel à 2 t.MS.ha⁻¹, compost à 2 t.MS.ha⁻¹, lombricompost à 2 t.MS.ha⁻¹, et fientes à 500 kg.ha⁻¹ (SFR 24). Aucune différence significative n'a été constaté entre ces pratiques SFR.

2.2.2. Effet des pratiques SFR sur les paramètres écologiques du sol

2.2.2.1. pH eau du sol

La figure 12 ci-dessous montre les moyennes des valeurs des pH pour chaque pratique SFR pour deux horizons différents 0 - 10 cm et 10 - 20 cm. Les analyses statistiques ont montré que les pratiques SFR ont un effet fortement significatif (p -value < 0,001***) sur le pH eau du sol.

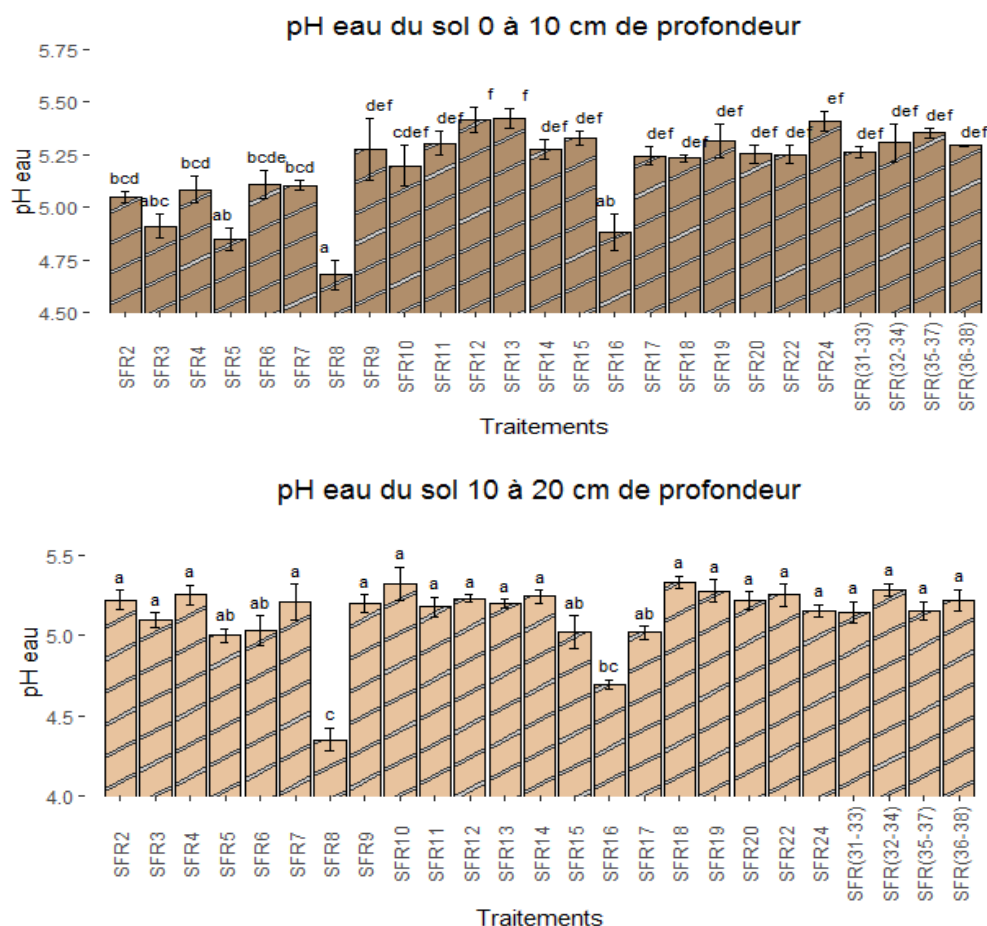


Figure 11 : pH eau du sol sur deux profondeurs, 0 - 10 et 10 - 20 cm

Les barres d'erreurs sont représentées par les erreurs types et les lettres (a, b, c, d, e et f) indiquent les différences significatives entre les traitements au seuil de 5%.

Pour le premier horizon de 0 à 10 cm de profondeur, la valeur maximale observée pour le pH est de $5,42 \pm 0,08$, correspondant à la SFR 13, composé d'un assemblage de fumier traditionnel, compost, lombricompost et de cendres. Les SFR 12 et SFR 24 présentent des valeurs de pH proches de celles du SFR 13, composés d'assemblages de fumier traditionnel, compost, lombricompost (SFR 12) et d'un assemblage de fumier traditionnel, compost, lombricompost, fientes (SFR 24), avec des valeurs de $5,41 \pm 0,10$ et $5,40 \pm 0,08$ respectivement. Des comparaisons par paires ont montré qu'il n'y a pas de différence significative avec ces 3 SFR. Après les SFR

témoins (SFR 8 et SFR 16), le SFR 5 et SFR 3 présentent les plus faibles valeurs de pH, avec des valeurs respectives de $4,84 \pm 0,09$ et $4,90 \pm 0,09$. Le SFR 5 est composé d'un apport de Fumier amélioré à 6 t.MS.ha^{-1} , et le SFR 3 de fumier traditionnel à $3 \text{ t.MS.ha}^{-1} + \text{NPK à } 40 \text{ kg. ha}^{-1}$. Ces pratiques ne présentent aucune différence significative entre eux.

Pour l'horizon de 10 - 20 cm, le SFR 18 présente la meilleure valeur de pH équivalent à $5,33 \pm 0,06$. Ensuite, les pratiques suivantes ont des valeurs proches : SFR 10 ($5,32 \pm 0,17$), SFR 32-34 ($5,28 \pm 0,06$), SFR 19 ($5,27 \pm 0,12$), SFR 4 ($5,25 \pm 0,10$), SFR 22 ($5,25 \pm 0,11$), SFR 14 ($5,24 \pm 0,06$), SFR 12 ($5,23 \pm 0,03$), SFR 2 ($5,21 \pm 0,10$), SFR 36-38 ($5,21 \pm 0,11$), SFR 20 ($5,21 \pm 0,09$), SFR 7 ($5,20 \pm 0,19$), SFR 13 ($5,19 \pm 0,04$), SFR 9 ($5,19 \pm 0,09$), SFR 11 ($5,17 \pm 0,10$), SFR 35 ($5,15 \pm 0,09$), SFR 24 ($5,15 \pm 0,07$), SFR 31-33 ($5,14 \pm 0,11$) et SFR 3 ($5,09 \pm 0,07$). Des comparaisons par paires de Tukey ont montré qu'il n'y a pas de différence significative entre ces différents SFR, même si les valeurs ne sont pas identiques.

2.2.2.2. Teneur en phosphore disponible dans le sol (phosphore résine)

Le phosphore résine est la teneur en phosphore disponible dans la solution du sol. La figure 13 illustre la teneur en phosphore résine du sol selon chaque pratique SFR sur un horizon 0 à 10 cm. Le résultat de l'analyse de la variance a montré que les pratiques SFR ont un effet fortement significatif ($p\text{-value} < 0.001$) sur la teneur en phosphore résine dans le sol.

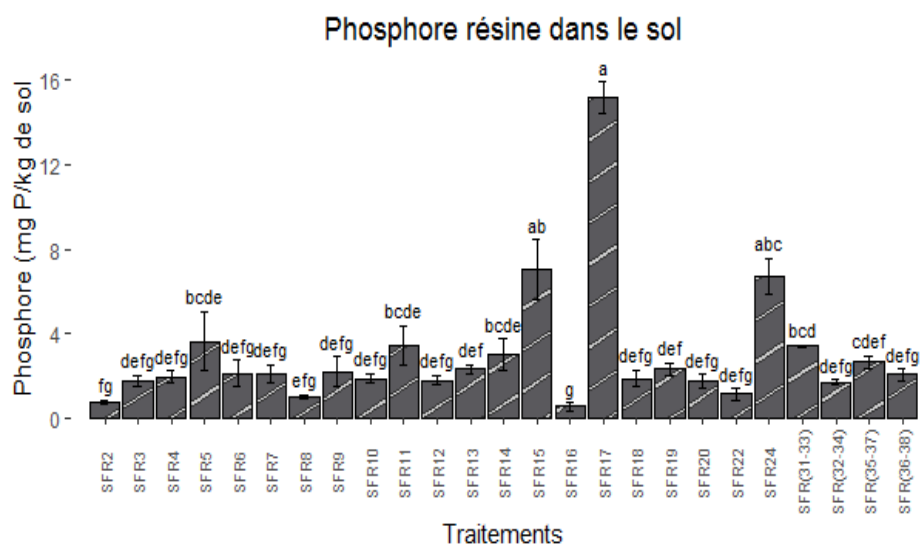


Figure 12 : Phosphore résine (en mgP.kg^{-1} sol) dans le sol sur un horizon de 0 à 10 cm de profondeur

Les barres d'erreurs sont représentées par les erreurs types et les lettres (a, b, c, d, e, f et g) indiquent les différences significatives entre les traitements au seuil de 5%.

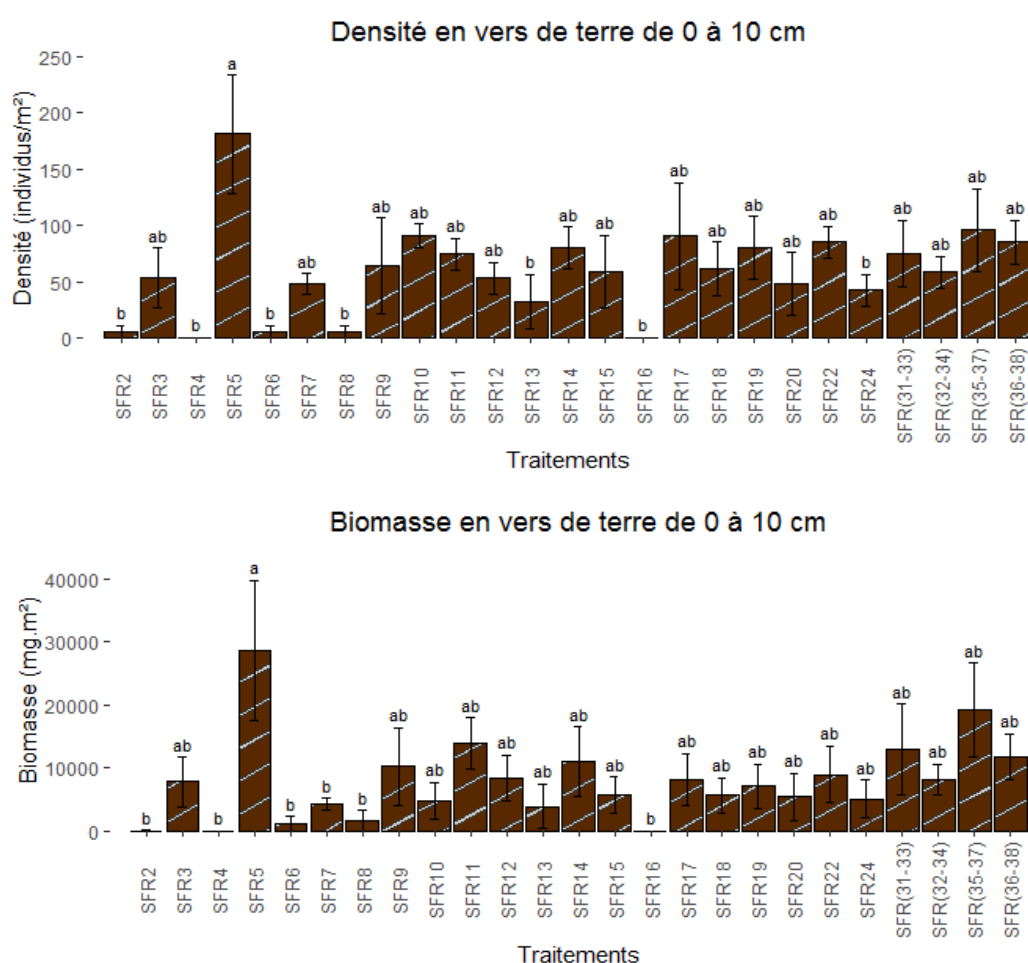
Le SFR 17 affiche de loin la plus forte teneur en phosphore minéral parmi les autres traitements, avec une quantité de $15,16 \pm 1,2 \text{ mgP.kg}^{-1}$. Ce SFR est composé par un apport d'assemblage de

fumier de porc à 3t MS/ha + cendres à 500kg MS/ha. Des comparaisons par paires révèlent une différence significative par rapport aux autres traitements sauf avec les SFR 15 et SFR 24. Des quantités assez remarquables sont aussi observées sur les SFR 15 et SFR 24, avec des teneurs respectives de $7,03 \pm 2,4$ mgP.kg⁻¹ et $6,71 \pm 1,43$ mgP.kg⁻¹. Ces SFR consistent en des assemblages de matières telles que fumier traditionnel + compost + lombricompost + guano pour la SFR 15, et pour la SFR 24, le Guanomad est remplacé par de la fiente, avec des quantités identiques pour les deux pratiques. Des comparaisons par paires ne démontrent aucune différence significative entre les 25 pratiques SFR à l'exception de la pratique SFR 17. En revanche, la teneur la plus basse est enregistrée sur le SFR 2, affichant une teneur de $0,75 \pm 0,20$ mgP.kg⁻¹. Le SFR 2, une pratique paysanne, se compose uniquement d'un apport de fumier traditionnel à 3t MS/ha.

2.2.2.3. Macrofaune du sol

Vers de terre

La figure ci-dessous illustre la densité et la biomasse des vers de terre pour chaque pratique SFR, pour deux horizons différents, de 0 à 10 cm et de 10 à 20 cm. Pour l'horizon de 0 à 10 cm, les pratiques SFR ont un effet moyennement significatif (p-value = 0.002**) sur la densité et un effet faiblement significatif (p-value 0.01*) sur la biomasse. Cependant, pour l'horizon de 10 à 20 cm, l'effet reste fortement significatif (p-value > 0.001***) tant sur la densité que sur la biomasse.



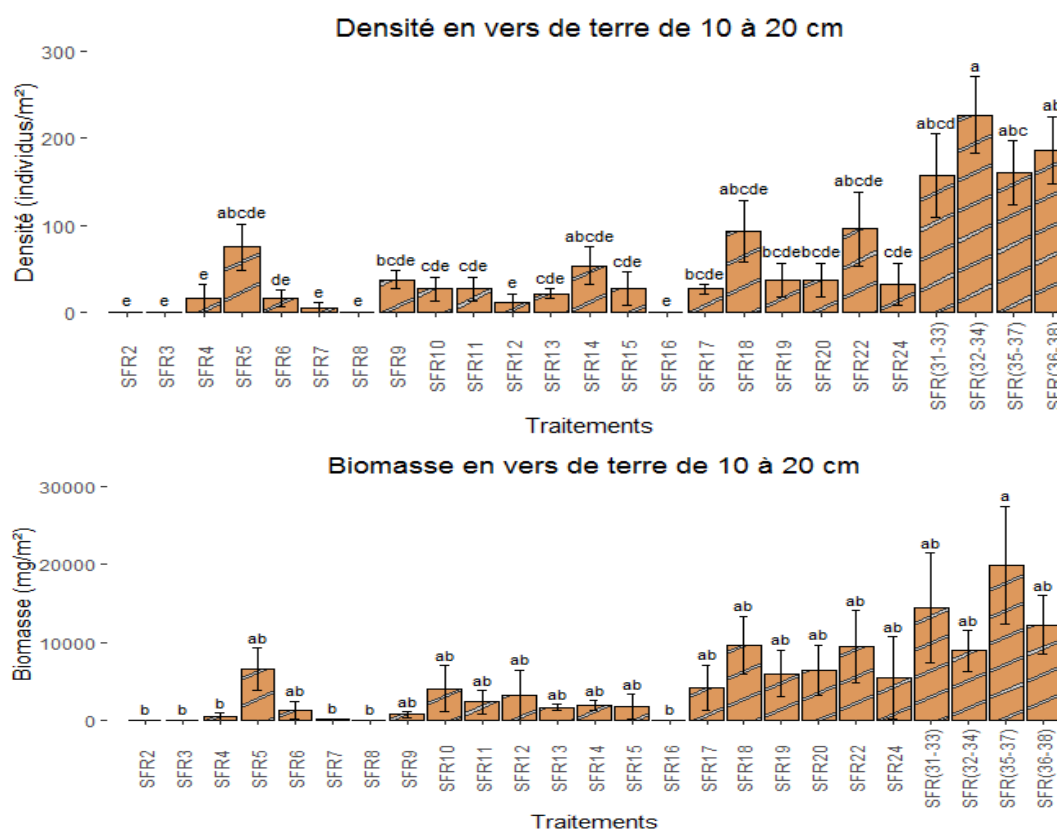


Figure 13 : Densité et biomasse de vers de terre sur deux horizons 0 à 10 cm et 10 à 20 cm de profondeur

Les barres d'erreurs sont représentées par les erreurs types et les lettres (a, b, c, d et e) indiquent les différences significatives entre les traitements au seuil de 5%.

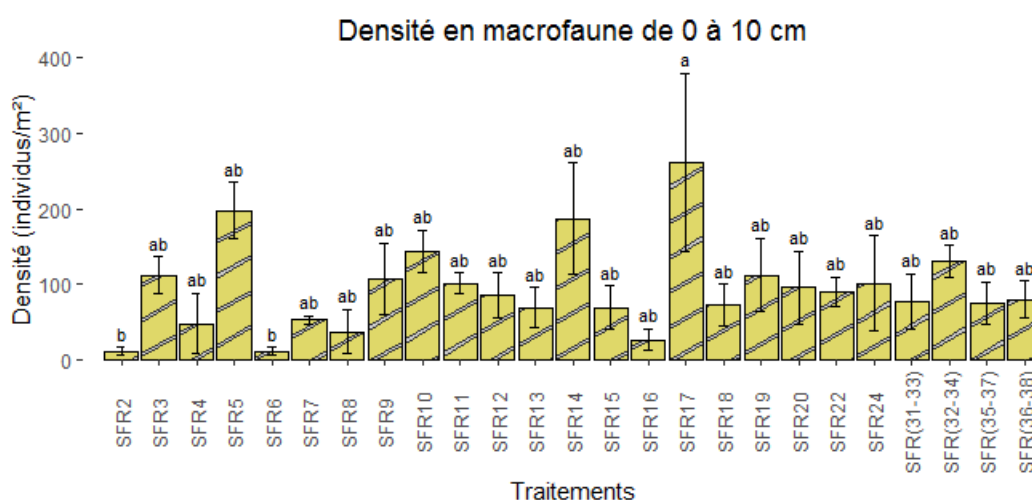
Pour l'horizon de 0 à 10 cm, la densité en vers de terre la plus élevée a été observée sur le SFR avec un apport de fumier amélioré de 6t MS.ha⁻¹ (SFR 5), avec une densité moyenne de 181,33 ± 90,97 ind.m⁻². Ensuite, on retrouve le SFR 35-37 avec une densité moyenne de 96 ± 64 ind.m⁻², suivi de près par les SFR 10 (90,66 ± 18,47 ind.m⁻²), SFR 17 (90,66 ± 82,10 ind.m⁻²), SFR 36-38 (85,33 ± 33,3 ind.m⁻²), SFR 22 (85,33 ± 24,44 ind.m⁻²), SFR 14 (80,00 ± 32 ind.m⁻²) et SFR 19 (80,00 ± 48 ind.m⁻²). Ces SFR sont composés d'assemblages de matières, de fumier traditionnel uniquement, ou de lombricompost. Des comparaisons par paires de Tukey indiquent qu'il n'y a pas de différence significative entre ces différentes pratiques. La plus faible densité est observée sur les pratiques SFR 24 (42,66 ± 24,44 ind.m⁻²), SFR 13 (32 ± 42,33 ind.m⁻²), SFR 2 (5,33 ± 9,23 ind.m⁻²), SFR 6 (5,33 ± 9,23 ind.m⁻²) et le SFR 8 et le SFR 16 avec une absence d'individu sur les parcelles. Bien que la SFR 4 ne présente aucun vers, des comparaisons par paires de Tukey ont montré qu'il ne présente pas de différence significative avec ces pratiques à faible densité en vers. Ces SFR sont principalement composés d'apports de compost, de lombricompost ou de fumier traditionnel. Le SFR 5 reste le meilleur en termes de biomasse, avec un poids de 28,6 ± 19,3 g.m⁻². Cependant, la biomasse ne suit pas la même tendance que la densité pour les autres pratiques. Les SFR 35-37 (19,1 ± 12,9 g.m⁻²), SFR 11 (13,9 ± 7,1 g.m⁻²), SFR 31-33 (13,0 ± 12,4 g.m⁻²), SFR

36-38 ($11,7 \pm 6 \text{ g.m}^{-2}$), SFR 14 ($11,03 \pm 9,46 \text{ g.m}^{-2}$), SFR 9 ($10,2 \pm 10,57 \text{ g.m}^{-2}$) présentent des biomasses élevées suite à la pratique SFR 5. La biomasse la plus faible est observée sur la SFR 13 ($3,95 \pm 6,2 \text{ g.m}^{-2}$), SFR 8 ($1,65 \pm 2,8 \text{ g.m}^{-2}$), SFR 6 ($1,15 \pm 1,9 \text{ g.m}^{-2}$), SFR 2 ($0,09 \pm 0,15 \text{ g.m}^{-2}$), SFR 16 ($0,00 \text{ g.m}^{-2}$) et SFR 4 ($0,00 \text{ g.m}^{-2}$). Même avec ces différences, des comparaisons par paires n'ont montré aucune différence significative entre ces différentes pratiques.

Pour l'horizon de 10 à 20 cm, on a observé la densité la plus élevée en vers de terre dans le SFR 32-34, avec une valeur de $226,66 \pm 83,26 \text{ ind.m}^{-2}$. Les comparaisons avec les autres pratiques n'a révélé aucune différence significative. Cette pratique est suivie par les SFR 36-38 ($186,66 \pm 66,61 \text{ ind.m}^{-2}$), SFR 35-37 ($160,00 \pm 64,00 \text{ ind.m}^{-2}$) et SFR 31-33 ($157,33 \pm 83,26 \text{ ind.m}^{-2}$). Pour la densité la plus faible, elle a été observée sur la SFR 7 ($5,33 \pm 9,23 \text{ ind.m}^{-2}$), SFR 3 ($0,00 \text{ ind.m}^{-2}$), SFR 16 ($0,00 \text{ ind.m}^{-2}$), SFR 2 ($0,00 \text{ ind.m}^{-2}$) et le SFR_8 ($0,00 \text{ ind.m}^{-2}$). Entre ces SFR, aucune différence significative n'a été constatée. Pour la biomasse, ce sont la SFR 35-37 et la SFR 31-33 qui affichent la plus forte biomasse en vers, avec des valeurs respectives de $19,8 \pm 13,08 \text{ g.m}^{-2}$ et $14,4 \pm 12,20 \text{ g.m}^{-2}$. Ces deux pratiques sont composées d'un apport de lombricompost à 6 MS/ha. Quant aux autres SFR qui présentent une densité plus élevée, leur biomasse respective est de $12,2 \pm 6,52 \text{ g.m}^{-2}$ SFR 36-38 et $9,6 \pm 6,4 \text{ g.m}^{-2}$ SFR 18. La biomasse la plus faible est observée sur les mêmes SFR à densité très faible.

Macrofaune

Les résultats de l'analyse statistique indiquent que les pratiques SFR ont un effet moyennement significatif sur la densité de la macrofaune du sol pour l'horizon 0 à 10 cm ($p \text{ value} = 0,005^{**}$) et faiblement significatif pour l'horizon 10 à 20 cm ($p \text{ value} = 0,01^{*}$). Pour la biomasse, ça n'a pas d'effet significatif sur le premier horizon ($p \text{ value} = 0,109$), mais un effet fortement significatif pour l'horizon 10-20cm ($p \text{ value} < 0,001$).



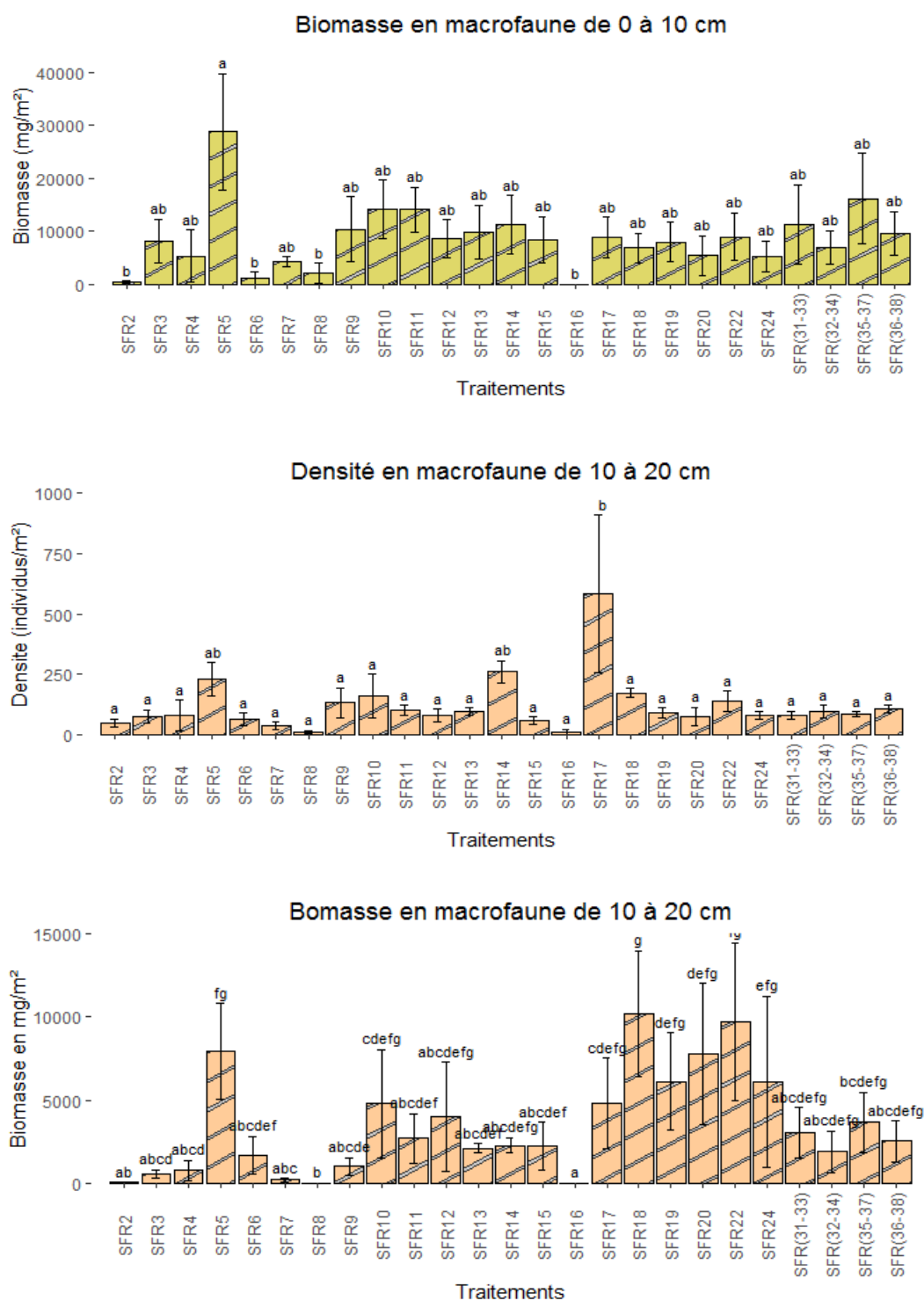


Figure 14 : Densité et biomasse des macrofaunes sur deux horizons différents, 0 à 10 et 10 à 20 cm de profondeur

Les barres d'erreurs sont représentées par les erreurs types et les lettres (a, b, c, d, e, f et g) indiquent les différences significatives entre les traitements au seuil de 5%.

Dans l'horizon 0 à 10 cm, le SFR 17 affiche la densité la plus élevée, avec une moyenne de 261,33 ± 203,85 ind.m⁻². Cette pratique ne présente pas d'effet significatif par rapport aux autres pratiques,

comme démontré par les comparaisons par paires effectuées. On observe également une densité élevée de macrofaune dans le SFR 5, SFR 14, SFR 10 et SFR 32-34, avec des valeurs respectives de $197,33 \pm 64,66 \text{ ind.m}^{-2}$, $186,66 \pm 128,33 \text{ ind.m}^{-2}$, $144 \pm 48 \text{ ind.m}^{-2}$ et $130,66 \pm 36,07 \text{ ind.m}^{-2}$. La plus faible densité est constatée dans le SFR 2 et le SFR 6, avec une densité de $10,66 \pm 9,23 \text{ ind.m}^{-2}$. Ces deux SFR sont composés d'un apport de fumier traditionnel à 3t MS/ha (SFR 2) et de compost à 6t MS/ha (SFR 6), et la comparaison par paire montre qu'entre ces deux pratiques, aucune différence significative n'est observée. Pour le deuxième horizon, le SFR 17, avec un assemblage de fumier de porc + cendres, présente toujours la densité la plus élevée, avec une valeur de $581,33 \pm 564,85 \text{ densités.m}^{-2}$, suivi du SFR 14 ($261,33 \pm 78,92 \text{ ind.m}^{-2}$) et du SFR 5 ($229,33 \pm 121,15 \text{ ind.m}^{-2}$). Le SFR 2, avec un apport en fumier traditionnel, présente toujours une faible densité en macrofaune, avec une valeur de $48 \pm 27,71 \text{ ind.m}^{-2}$. On constate également une densité faible dans la pratique SFR 7 ($37,33 \pm 24,44 \text{ ind.m}^{-2}$), composée d'un apport de lombricompost à 6t MS/ha. Le SFR 5 affiche la plus grande biomasse, avec un poids moyen de $28,7 \pm 19,12 \text{ g.m}^{-2}$. Les SFR 35-37, SFR 10 et SFR 11 présentent également une biomasse élevée, avec des poids moyens respectifs de $16,2 \pm 14,7 \text{ g.m}^{-2}$, $14,14 \pm 9,56 \text{ g.m}^{-2}$ et $14,11 \pm 7,25 \text{ g.m}^{-2}$. Ces trois pratiques ne montrent pas de différence significative entre elles, selon une comparaison par paire. Pour l'horizon de 10 à 20 cm, le SFR 18 détient la plus haute valeur de biomasse, avec une biomasse de $10 \pm 6,5 \text{ g.m}^{-2}$, suivi des SFR 22 ($9,7 \pm 8,23 \text{ g.m}^{-2}$), SFR 5 ($7,9 \pm 4,96 \text{ g.m}^{-2}$), SFR 20 ($7,77 \pm 7,36 \text{ g.m}^{-2}$), SFR 19 ($6,13 \pm 5,03 \text{ g.m}^{-2}$), et SFR 24 ($6,08 \pm 8,93 \text{ g.m}^{-2}$). Le SFR 2 ($0,04 \pm 0,02 \text{ g.m}^{-2}$) maintient toujours la plus faible biomasse, tandis que le SFR 3 ($0,56 \pm 0,47 \text{ g.m}^{-2}$), SFR 7 ($0,20 \pm 0,17 \text{ g.m}^{-2}$) et SFR 4 ($0,76 \pm 1,0 \text{ g.m}^{-2}$) présentent également une faible biomasse par rapport aux autres pratiques.

Indice de Shannon et équitabilité

L'indice de Shannon et d'équitabilité, qui évaluent l'équilibre de la biodiversité au niveau de la macrofaune, ont été calculés pour un seul horizon, de 0 à 20 cm de profondeur. Les résultats de l'analyse statistique indiquent qu'il n'y a pas de différence significative entre les pratiques SFR pour les deux indices, avec des valeurs de $p \text{ value} = 0,05$ pour l'indice de Shannon et $p \text{ value} = 0,147$ pour l'équitabilité.

En ce qui concerne l'indice de Shannon, le SFR 12 avec un assemblage de matière présente la valeur d'indice de diversité la plus élevée ($1,38 \pm 0,19$), suivie par les SFR 32-34, SFR 13, SFR 36-38 et SFR 11 et les SFR 16 et SFR 8 affichent les valeurs d'indice les plus faibles. Pourtant, suite à des comparaisons par paires, aucune différence significative n'a été observée entre les 25 pratiques SFR.

Pour l'équitabilité, les SFR 6, SFR 24, SFR 2, SFR 13, SFR 31-33, SFR 32-34 et SFR 35-37 ont les valeurs les plus élevées, comprises entre 0,32 et 0,3. Le SFR 8 continue d'afficher la valeur d'indice la plus faible (0,1). Cependant, aucune différence significative n'est constatée entre les

différentes pratiques. Les valeurs pour chaque indice sont récapitulées dans le tableau 9 en annexe (cf. Annexe 8).

2.3. Analyse de l'effet du décalage de semis sur les paramètres agronomiques du riz

L'évaluation de l'impact du décalage de semis sur les paramètres agronomiques du riz a impliqué le calcul du Delta $((D2-D1)*100/D1)$ entre les deux dates de semis, D1 et D2, suivi d'une analyse statistique sur ces valeurs.

2.3.1. Effet du décalage de semis sur le nombre de talles de riz

La Figure 16 illustre la variation du nombre de talles de riz entre les deux dates de semis, D1 et D2. Les résultats de l'analyse statistique indiquent qu'il n'y a pas d'effet significatif entre les deux dates de semis sur la variable du nombre de talles. De plus, pour le delta, les pratiques SFR n'ont pas d'effet significatif sur le nombre de talles, que ce soit au début ou à la fin de la formation des talles, avec un p-value de 0,8 au début du tallage et de 0,6 à la fin de tallage.

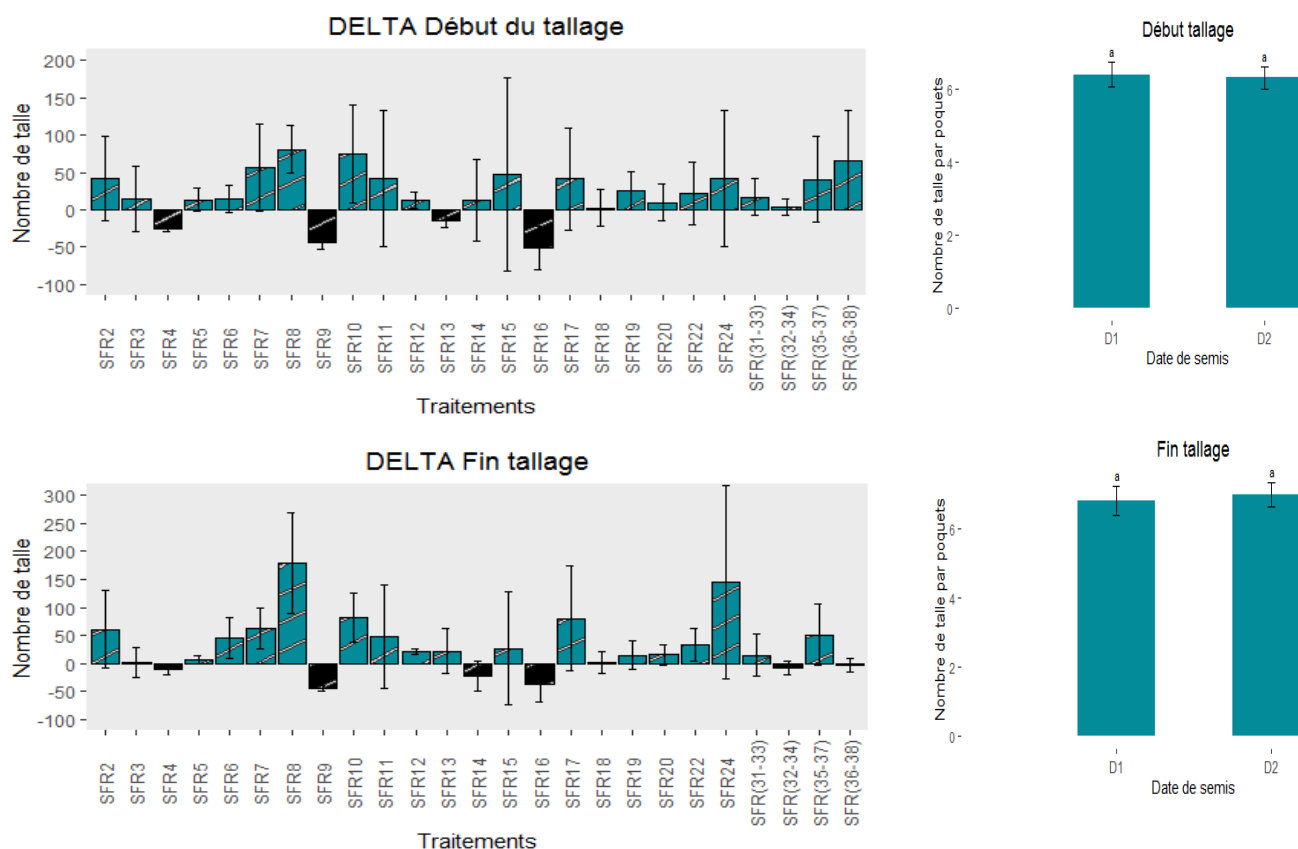


Figure 16 : Nombre de talles au début et fin tallage pour les deux dates de semis

La lettre « a » montre l'absence de différence significative entre D1 et D2

Au stade de début tallage, D1 présente un nombre de talles légèrement supérieur à D2, bien que l'analyse statistique ait révélé un effet non significatif entre les deux dates, avec respectivement

6,4 ± 2,9 talles pour D1 et 6,3 ± 2,6 talles pour D2, représentant une légère diminution de 1,4%. Cependant, au stade final du tallage, D2 affiche un nombre de talles plus élevé, avec une augmentation de 2,64% par rapport à D1. Au début du tallage, les pratiques présentant moins de talles en D2 qu'en D1 sont SFR 4, SFR 9, SFR 13 et SFR 16, avec des deltas respectifs de -24,79%, -43,96%, -15,13% et -50%. Pour les autres SFR, le nombre de talles au début du tallage est nettement plus favorable sur D2 que sur D1. Par exemple, le SFR 8 affiche un delta dépassant les 80%, suivi de SFR 10 à 74%, SFR 36-38 à 66%, et SFR 7 à 56%. Des deltas faibles, proches de 0%, sont observés sur les SFR 18 (2%) et SFR 32-34 (3%), composés principalement d'apports de fumier traditionnel ou de lombricompost. Les SFR 20, SFR 12, SFR 14, SFR 5, SFR 6 et SFR 31-33 présentent également des deltas faibles, indiquant une résilience avec des variations minimales entre D1 et D2. Au stade de fin tallage, les SFR avec des deltas négatifs incluent les SFR 16 (-37%), SFR 9 (-44%), SFR 32-34 (-7%) et SFR 36-38 (-3%), montrant de plus fortes valeurs pour D1 par rapport à D2. Le SFR 8 maintient le delta le plus élevé à 178%, suivi du SFR 24 (144%). Les SFR 10, SFR 17, SFR 7 et SFR 2 présentent également des deltas élevés, compris entre 80% et 60%. Les deltas proches de zéro sont observés sur SFR 3 et SFR 18, avec des valeurs de 0,3% et 1,48%. Ces deux pratiques sont principalement constituées d'apports de fumier traditionnel à des doses différentes. Le SFR 5 affiche également un delta faible de 7%. Ainsi, les SFR 3, SFR 18, SFR 5, SFR 32-34 et SFR 36-38 présentent des variations minimales dans le nombre de talles, indépendamment de la date de semis choisie.

2.3.2. Effet du décalage de semis sur la hauteur de riz

L'analyse statistique indique qu'il n'y a pas de différence significative dans le delta (différence relative entre D2 et D1) entre les différentes pratiques SFR, que ce soit au début ou à la fin du stade phénologique de la formation du tallage, avec des p-values respectives de 0,5 et 0,2. En ce qui concerne le facteur date de semis, au stade initial du tallage, la date de semis a un effet moyennement significatif sur la hauteur du riz, avec un p-value de 0,009**. À la fin du tallage, l'effet est fortement significatif (p-value <0,001***). En moyenne, la hauteur est significativement plus élevée à D2 qu'à D1, montrant une augmentation de 14,9% de la croissance en hauteur à D2 par rapport à D1 au début du tallage et de 30,22% à la fin du tallage.

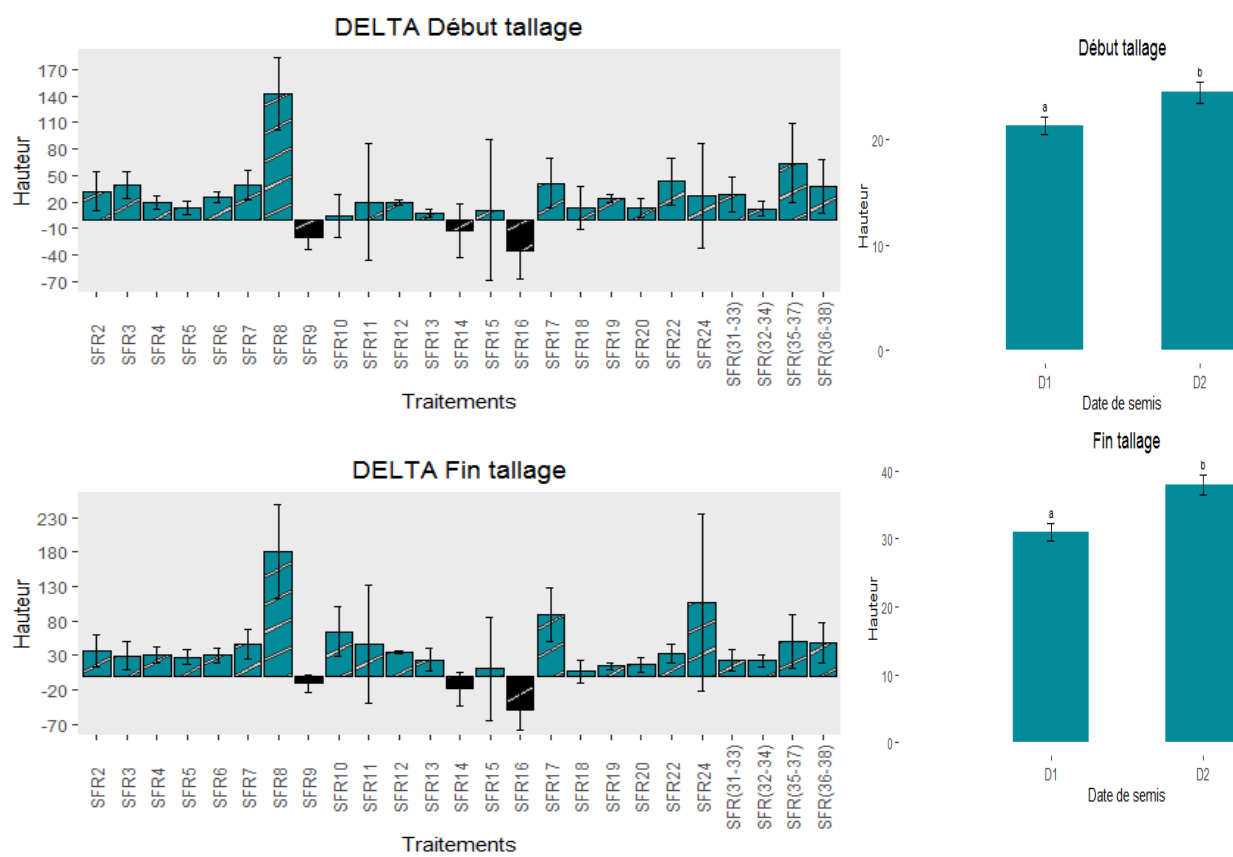


Figure 15 : Hauteur au début et à la fin de tallage pour les deux dates de semis

Les lettres « a et b » montre l'existence de différence significative entre D1 et D2

Que ce soit au stade de début ou au stade de fin tallage, les variations du delta restent similaires pour les pratiques SFR. Les SFR présentant un delta négatif sont les SFR 14, SFR 16 et SFR 9, avec des valeurs respectives de -12%, -34% et -20% au début du tallage, et de -18% -48% et -10% à la fin du tallage. Ces résultats indiquent que ces trois SFR sont plus performants lors d'un semis normal que lors d'un retard de semis. Pour les valeurs de delta positives, les SFR 8, SFR 17, SFR 22 et SFR 35-37 se distinguent avec les valeurs les plus élevées, atteignant respectivement 143%, 41%, 43% et 64%. À la fin du tallage, on ajoute également le SFR 24, qui affiche un delta assez élevé de 106%, ainsi que le SFR 10 avec 64%. Ces pratiques se révèlent donc plus performantes en termes de hauteur à D2 qu'à D1. Les SFR qui se montrent plus résilients, avec des variations de hauteur moins importantes entre les deux dates, sont observés sur le SFR 10 et le SFR 13 au début de tallage, avec des deltas de 3% et 6%. À la fin du tallage, c'est le SFR 18 qui se distingue avec un delta de 6%. Pour les autres SFR, les deltas varient de 12 à 40% en moyenne, et dans la majorité des cas, la croissance en hauteur est plus marquée à D2 qu'à D1.

2.3.3. Effet du décalage de semis sur la floraison

Pour la floraison, suite au résultat de l'analyse statistique, on a observé que la date de semis a un effet moyennement significatif sur la floraison du riz (p-value = 0.001**). Pour le delta, on ne constate pas d'effet significatif sur la floraison (p-value = 0.135).

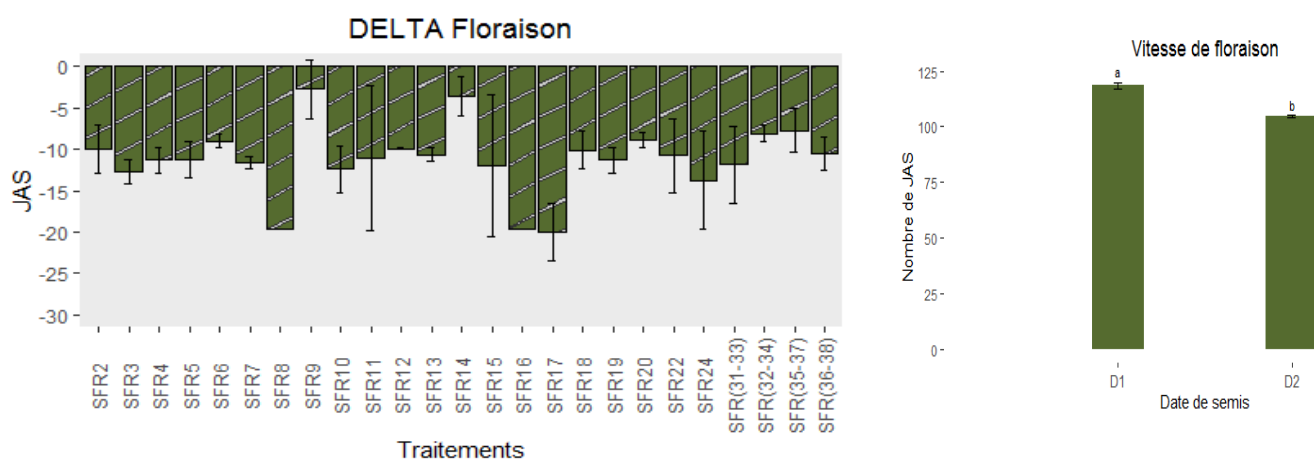


Figure 16 : Floraison entre les deux dates de semis D1 et D2 avec son Delta

Les lettres « a et b » montre l'existence d'une différence significative entre D1 et D2

Entre les dates de semis D1 et D2, la période depuis le semis jusqu'à la floraison est plus courte pour D2 que pour D1. En moyenne, la durée jusqu'à l'atteinte de 50% de floraison est de 104 jours pour D2 et de 118 jours pour D1, représentant une réduction de 11,70% pour D2.

Pour tous les SFR, cette période est plus courte sur D2 que sur D1, se traduisant par des valeurs de delta toutes négatives. Les pratiques avec des apports de lombricompost présentent une durée plus courte, oscillant entre 99 et 102 jours après le semis pour D2. Le SFR 9 et le SFR 14 se distinguent avec les deltas les plus faibles, atteignant respectivement -2.63% et -3.58%. Pour le SFR 9, la durée est de 112 jours après le semis pour D2, contre 115 jours pour D1. Pour le SFR 14, elle est de 108 jours pour D2 et 112 jours pour D1. Ces deux SFR sont constitués d'assemblages de matières, telles que le fumier traditionnel et la dolomie pour le SFR 9, et le fumier traditionnel, le compost, le lombricompost et le prochimad pour le SFR 14. Quant aux SFR 8, SFR 16 et SFR 17, ils affichent des valeurs de Delta légèrement plus élevées, atteignant respectivement -20% et -19%. Pour les autres pratiques SFR, la valeur moyenne du delta est d'environ -10%.

2.3.4. Effet du décalage de semis sur le rendement

La figure présentée ci-dessus illustre la variation du rendement entre différentes pratiques SFR et pour deux dates de semis. Statistiquement, la date de semis a un effet fortement significatif sur le rendement en grain (p-value <0,001***), tandis que le delta n'a aucun effet significatif. En

comparant D1 et D2, le rendement en grains est plus élevé pour D2, avec une moyenne de $0,85 \pm 0,54 \text{ t. ha}^{-1}$ contre $0,61 \pm 0,39 \text{ t. ha}^{-1}$ pour D1.

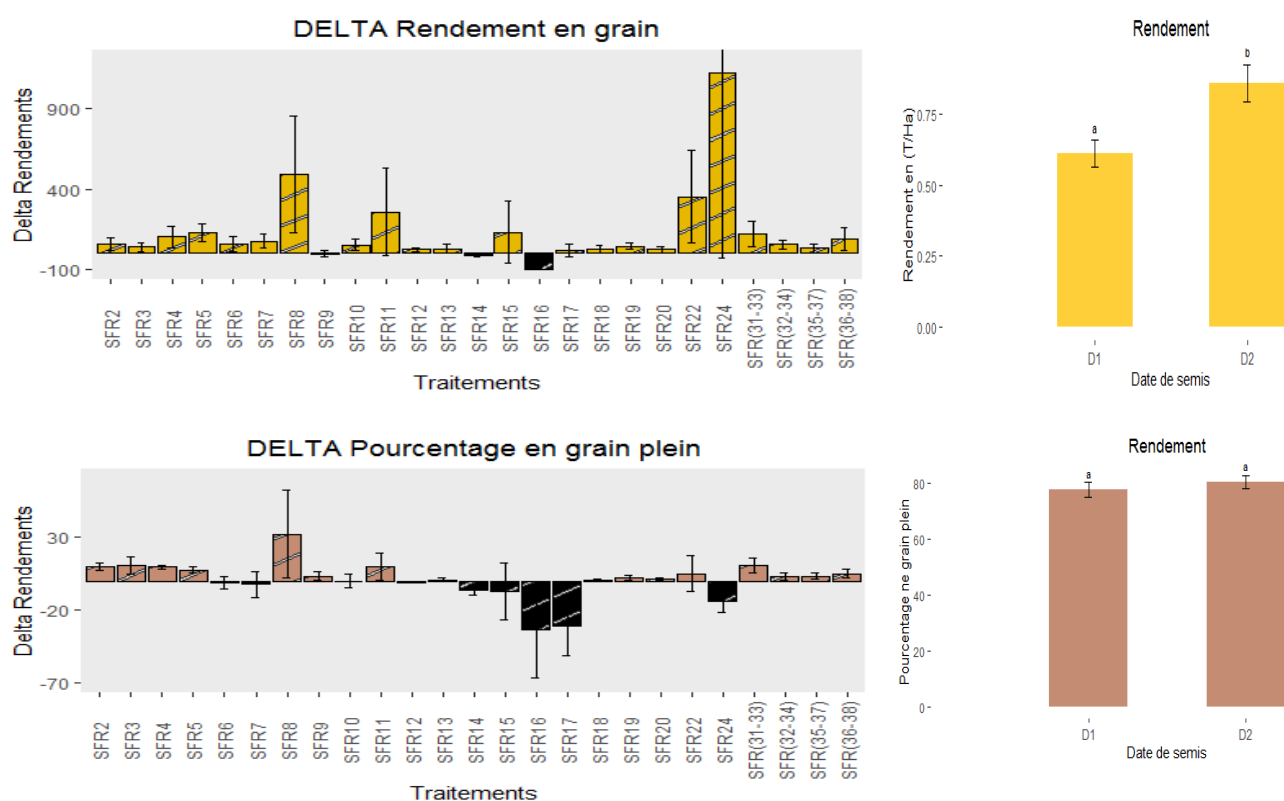


Figure 17 : Rendement en grain et pourcentage en grain plein pour les deux dates de semis et leur Delta respectif (%)

Les lettres « a et b » montre l'existence de différence significative entre D1 et D2 pour le rendement en grain et « a » uniquement sur le pourcentage en grain plein montrant l'absence de différence significative

Le SFR 32-34 en D2 affiche le meilleur rendement en grains ($2,17 \pm 0,75 \text{ t. ha}^{-1}$) avec un delta de +53%. Le SFR 22 présente également un bon rendement ($1,55 \pm 0,36 \text{ t. ha}^{-1}$), mais avec un delta élevé de 351%. Les SFR 18 et SFR 13 montrent des rendements élevés ($1,46 \pm 0,13 \text{ t. ha}^{-1}$ et $1,01 \pm 0,16 \text{ t. ha}^{-1}$) avec des deltas minimales (25% et 27%), indiquant une performance constante et une résilience. Cependant, certaines pratiques avec des deltas minimales ont des rendements faibles, comme le SFR 9 (delta de -6%) avec un rendement de $0,4 \text{ t. ha}^{-1}$ pour les deux dates de semis. Pour le pourcentage en grains pleins, la date de semis n'a pas d'effet significatif (p-value = 0,47), de même que le delta (p-value = 0,4). Les valeurs de delta varient autour de -30% à 30%, avec une moyenne de 77% à 80%. Le SFR 32-34 présente le meilleur pourcentage en grains pleins (92% pour D2) avec un delta de +3%, démontrant sa performance et sa résilience.

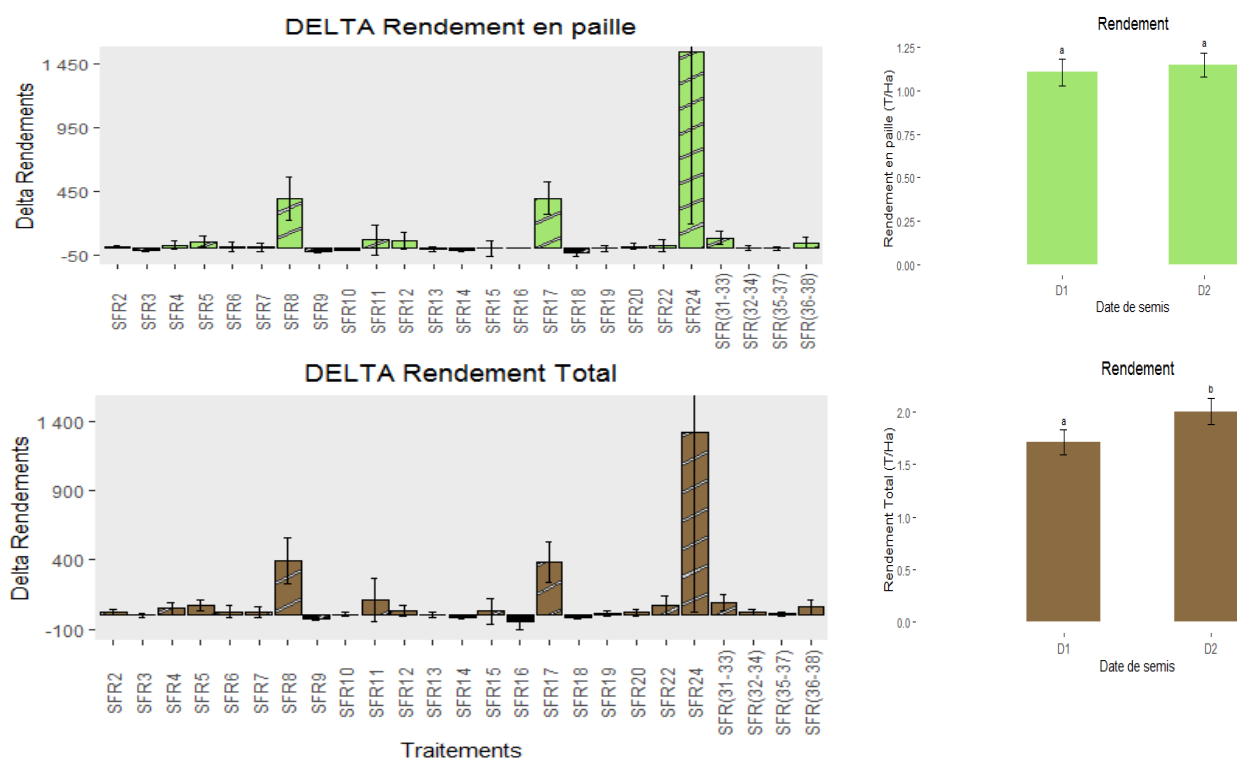


Figure 18 : Rendement en paille et rendement total pour les deux dates de semis et son delta respectif

Les lettres « a et b » sur le rendement total montrent l'existence de différence significative entre D1 et D2 mais la lettre « a » montre l'absence d'effet significatif pour le rendement en paille entre D1 et D2

Concernant le rendement en paille, la date de semis n'a pas de différence significative, ni le delta (p -value = 0,5 et 0,2). D2 affiche toujours plus de biomasses que D1, bien que la différence soit faible (3,63%). Le SFR 36-38 a le meilleur rendement en paille ($2,08 \pm 0,87$ t MS. ha⁻¹), suivi de près par le SFR 32-34 ($2,04 \pm 0,58$ t MS. ha⁻¹). Cependant, le delta est très faible pour le SFR 32-34 (4%) par rapport au SFR 36-38 (45%). Certains SFR montrent des deltas faibles, même si leur rendement peut différer, comme le SFR 16. D'autres, comme les SFR 3, SFR 18, SFR 5, SFR 13, et SFR 7, ont des deltas faibles et des rendements modérés.

En ce qui concerne le rendement total, la date de semis a un effet moyennement significatif (p -value = 0,006**), mais le delta n'a pas d'effet significatif (p -value = 0,3). D2 montre une augmentation de 17% par rapport à D1, avec des rendements respectifs de $1,71 \pm 1,01$ t MS. ha⁻¹ et 2 t MS. ha⁻¹. Le SFR 32-34 affiche le meilleur rendement total ($4,21 \pm 0,88$ t MS. ha⁻¹), avec un delta de 24%. Le SFR 18 montre également un rendement élevé, mais avec un delta négatif (-10%), indiquant un rendement plus élevé en D1 qu'en D2. Le SFR 3 présente le delta le plus faible (2,69%) avec un rendement décent (2,3 t MS. ha⁻¹), tandis que le SFR 24 montre le delta le plus élevé avec un rendement inférieur à 1 t MS. ha⁻¹.

2.3.5. Effet du décalage de semis sur le phosphore total dans le grain

La figure 20 ci-dessous montre la valeur des quantités en phosphore dans les grains de riz pour chaque SFR. Les analyses statistiques ont montré que le facteur date de semis et SFR pour le delta ont tout un effet fortement significatif sur la quantité en phosphore contenue dans les grains (p value $<0,001^{***}$).

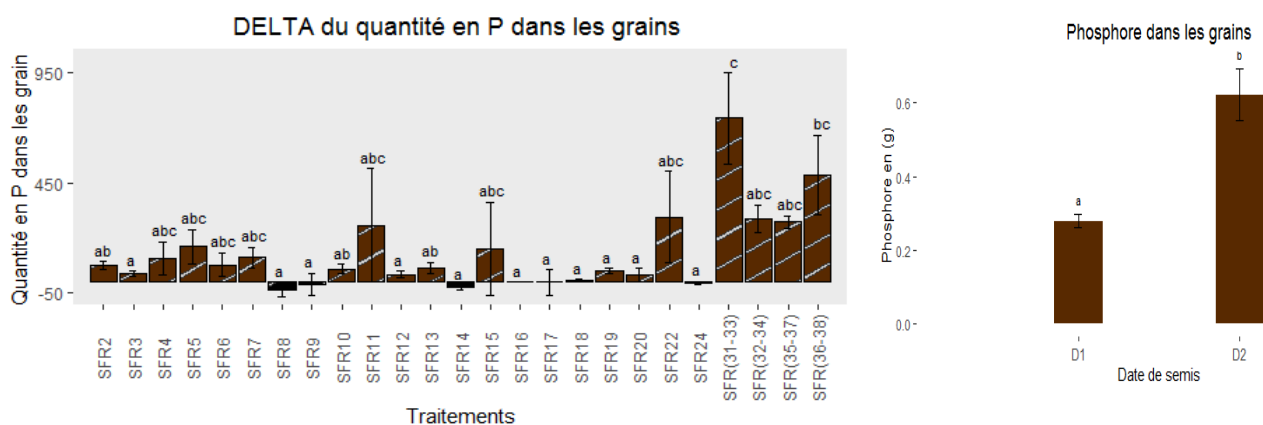


Figure 19 : Quantité de phosphore dans les grains pour les deux dates de semis

Les lettres « a, b et c » montre l'existence de l'effet significatif pour les deltas de chaque pratique SFR et « a et b » pour l'absence de différence significative entre D1 et D2

La teneur en phosphore dans les grains est significativement plus élevée pour D2 que pour D1, avec une augmentation de plus de 148%. Le SFR 36-38 affiche la plus grande quantité de phosphore, avec une valeur moyenne de $2,3 \pm 0,47$ g (D2), et son delta est relativement élevé à 485%, indiquant une nette supériorité de la quantité de phosphore en D2 par rapport à D1. De manière générale, la plupart des pratiques avec des niveaux élevés de phosphore présentent des valeurs de delta également élevées, dépassant les 100%. Cependant, certaines pratiques avec de faibles rendements, tels que SFR 16 (0%), SFR 17 (0%), et SFR 24 (-2%), affichent des valeurs de delta plus faibles. À noter que le SFR 18, malgré une quantité élevée de phosphore, présente également un delta relativement bas (0,6 g/6%), indiquant que le décalage de semis n'a pas d'effet significatif sur cette pratique SFR. Le SFR 18 est principalement composé d'un apport de fumier traditionnel à $18 \text{ t MS} \cdot \text{ha}^{-1}$.

2.4. Corrélation entre paramètres agronomiques et paramètres écologiques du sol

Une analyse en composantes principales nous permet de voir la corrélation entre les paramètres agronomiques et écologiques du sol.

2.4.1. Corrélation entre les paramètres agronomiques et écologiques du sol sur les deux dates de semis D1 et D2

Une Analyse en Composante Principale (ACP) a été réalisée pour l'étude des corrélations entre les paramètres agronomiques et écologiques du sol mesurés et les traitements effectués au cours

de l'essai. Après l'ACP, 5 axes ont été retenus représentant 84,21% des informations. Ainsi nos interprétations s'arrêtent à ce niveau.

Tableau 6 : Tableau des valeurs propres

	Dim1	Dim2	Dim3	Dim4	Dim5
Valeur propre	10,35	4,21	1,94	1,56	1,24
Variabilité en %	45,04	18,31	8,47	6,80	5,41
Variabilité cumulée (%)	45,04	63,35	71,82	78,63	84,05

Toutes les variables à expliquer sont représentées par les deux premiers axes dont :

- Le premier axe (Dim1) est principalement formé par le rendement total, rendement en grains et celui en paille ($r = 0.92, 0.89$ et 0.88), la hauteur en début et fin de tallage ($r = 0.91$ et 0.90), le nombre de talles au début et fin de tallage ($r = 0.86$ et 0.88), le pourcentage en grains pleins ($r = 0.84$), pH eau pour les deux horizons 0-10 et 10-20 cm de profondeur ($r = 0.56$ et 0.77), le phosphore total dans les grains ($r = 0.7$), la densité et la biomasse en vers de terre pour l'horizon 10-20 cm ($r = 0.66$ et 0.61), l'indice de Shannon ($r = 0,65$), l'équitabilité ($r = 0.48$) et la floraison qui a une corrélation négative ($r = -0.67$).
- Le second est représenté par les paramètres écologiques du sol, dont la densité en macrofaune, pour les deux horizons 0-10 cm et 10-20 cm ($r = 0.85$ et 0.76), densité et biomasse en vers de terre pour l'horizon 0-10 cm ($r = 0.81$ et 0.72), biomasse en macrofaune ($r = 0.74$ et 0.46) ainsi que le phosphore résine ($r = 0,64$).

Concernant les modalités étudiées, elles sont représentées par la figure 19 et la vision la plus détaillée est présentée dans l'annexe 9 (cf. Annexe 10).

Nos individus sont classés en 4 grands groupes selon les classes suivantes :

Groupe 1 : il est constitué par les SFR 8 et SFR 16, que ce soit pour D1 ou pour D2. Ces SFR se distinguent par des valeurs élevées de la variable "floraison", expliquant ainsi une durée prolongée entre le semis et l'atteinte de la floraison à 50%. Outre cela, elles présentent également des faibles valeurs pour le pH eau, le pourcentage en grains pleins, le nombre de talles, la hauteur aux deux stades phénologiques (début et fin de tallage), le rendement total, le rendement en paille, ainsi que l'indice de Shannon. Ces deux pratiques sont principalement caractérisées par un apport d'engrais minéral (urée et NPK) ou sans apport d'engrais.

Groupe 2 : il regroupe les SFR 5 et SFR 17 qui sont composés par l'apport du fumier amélioré et du fumier de porc + cendres. Ce groupe est caractérisé par de fortes valeurs sur les paramètres écologiques du sol dont la densité et biomasse en macrofaune, densité et biomasse en vers de terre ainsi que le phosphore résine. Pourtant, sur la variable équitabilité, ces deux SFR ont une valeur faible pour cet indice écologique. Ces deux types d'apports sont donc très favorables pour la restauration des fonctions écologiques du sol.

Groupe 3 : il regroupe la majorité de nos modalités, mais surtout il est représenté par les modalités suivantes : SFR 2 D1, SFR 4 D2, SFR 6 D1, SFR 2 D2, SFR 7 D2 qui ont des fortes valeurs pour les variables pH eau (10-20cm), pourcentage en grains pleins et équitabilité. Par contre elles montrent des valeurs faibles pour la densité et la biomasse de vers de terre dans les deux horizons ainsi que pour la quantité en phosphore total dans les grains.

Groupe 4 : il est surtout constitué par des pratiques ayant de fortes valeurs sur les paramètres agronomiques du riz telles que le nombre de talles, la croissance en hauteur, les différents types de rendement (grains, paille) ainsi que le phosphore total contenu dans les grains. Ces pratiques sont celles qui sont composées par l'apport du lombricompost à 6tMS.ha⁻¹ ou du fumier traditionnel à 18 tMS.ha⁻¹, ce sont les SFR 18 D1/D2, SFR 22 D2, SFR 31-33 D2, SFR 32-34 D1/D2, SFR 35-37 D1/D2 et la SFR 36-38 D2.

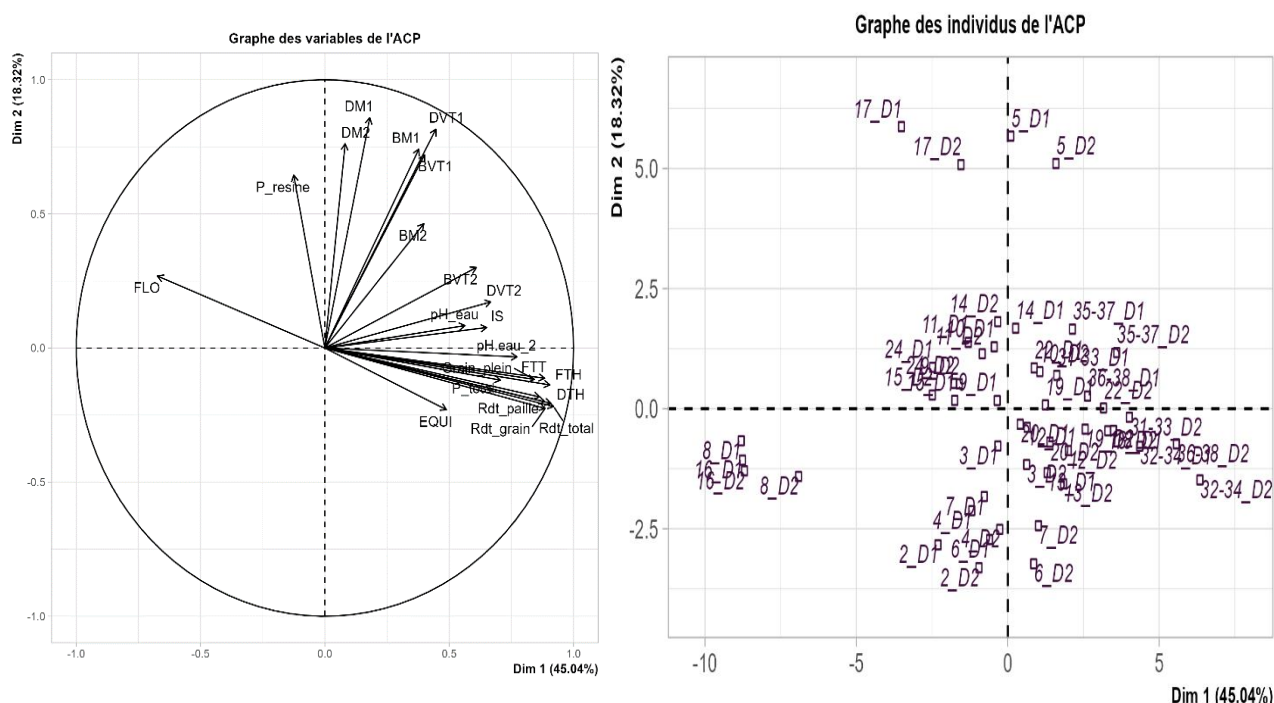


Figure 20 : Corrélation des paramètres agronomiques et écologiques du sol projetés sur Dim1 et Dim2 (à gauche) - Projection des moyennes des observations selon les paramètres agronomiques et pédologiques en fonction des facteurs et modalités sur Dim1 et Dim2 (à droite)

Signification des noms des variables sur le graphe des variables : FLO : floraison, P_resine : phosphore, résine, DM1 : densité en macrofaune pour l'horizon 0 -10 cm, DM2 : densité en macrofaune pour l'horizon 10 -20 cm, BM1 : biomasse en macrofaune pour l'horizon 0 -10 cm, BM2 : biomasse en macrofaune pour l'horizon 10 -20 cm, BVT1 : biomasse en vers de terre pour l'horizon 0 -10 cm, BVT2 : biomasse en vers de terre pour l'horizon 10 -20 cm, DVT1 : densité en vers de terre pour l'horizon 0 -10 cm, DVT2 : densité en vers de terre pour l'horizon 10 -20 cm, IS : indice de Shannon, Rdt_grain : rendement en grain, Rdt_paille : rendement en paille, Rdt_total : rendement total, DTH : début tallage hauteur, FTH : fin de tallage hauteur, DTT : nombre de talles au début de tallage, FTT : nombre de talles à la fin de tallage.

2.4.2. Corrélation entre les valeurs du delta des paramètres agronomiques et les paramètres écologiques du sol

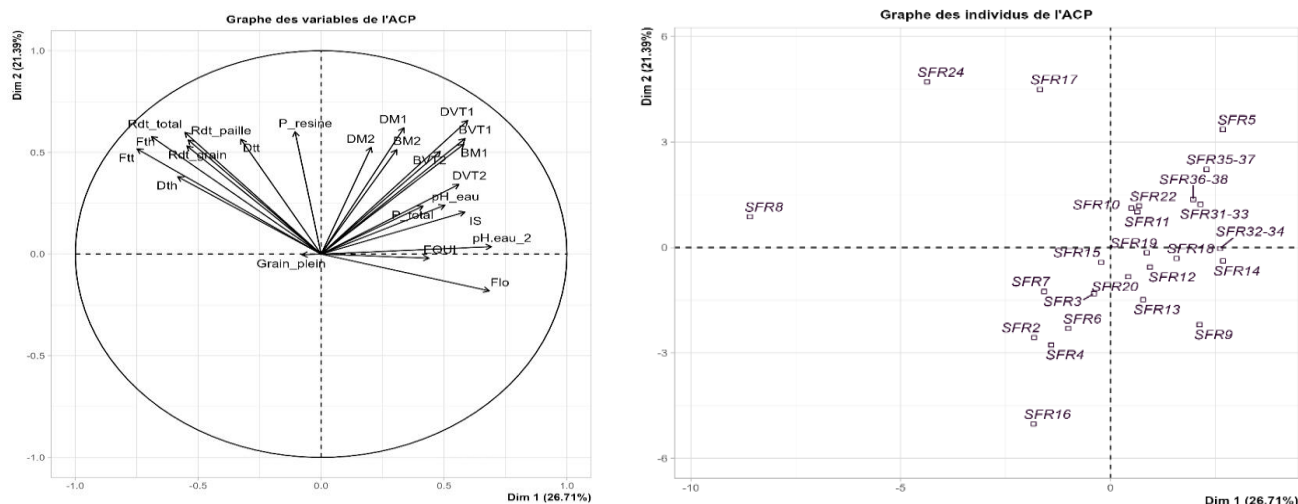


Figure 21 : Corrélation entre les valeurs moyennes de delta des paramètres agronomiques avec celui des paramètres écologiques du sol, à gauche se situe le graphe des variables et à droite celui des individus

Signification des noms des variables sur le graphe des variables : FLO : floraison, P_resine : phosphore, résine, DM1 : densité en macrofaune pour l'horizon 0 -10 cm, DM2 : densité en macrofaune pour l'horizon 10 -20 cm, BM1 : biomasse en macrofaune pour l'horizon 0 -10 cm, BM2 : biomasse en macrofaune pour l'horizon 10 -20 cm, BVT1 : biomasse en vers de terre pour l'horizon 0 -10 cm, BVT2 : biomasse en vers de terre pour l'horizon 10 -20 cm, DVT1 : densité en vers de terre pour l'horizon 0 -10 cm, DVT2 : densité en vers de terre pour l'horizon 10 -20 cm, IS : indice de Shannon, Rdt_grain : rendement en grain, Rdt_paille : rendement en paille, Rdt_total : rendement total, DTH : début tallage hauteur, FTH : fin de tallage hauteur, DTT : nombre de talles au début de tallage, FTT : nombre de talles à la fin de tallage

La figure ci-dessus nous montre un graphe de l'ACP entre les valeurs moyennes des deltas des paramètres agronomiques du riz avec les paramètres écologiques du sol.

Cinq dimensions ont été nécessaires pour représenter plus de 70% de la variance. Le premier axe représente le pH eau, la floraison, la biomasse de vers de terre et biomasse de la macrofaune pour l'horizon 0-10cm, l'indice de Shannon et l'équitabilité ainsi que la hauteur et le nombre de talles en fin tallage qui sont corrélés négativement avec l'axe. Pour le second axe, elle est formée par la densité de vers de terre et la macrofaune sur l'horizon 0-10cm, le phosphore résine dans le sol, les rendements en grain, la paille et le rendement total, la densité et la biomasse de macrofaune pour le second horizon ainsi que la biomasse des vers et la macrofaune pour l'horizon 10-20cm. Pour le dernier axe, les variables les plus corrélées sont : le pourcentage en grains pleins, la quantité en phosphore dans les grains et la densité de macrofaune dans l'horizon 10-20cm, mais cette dernière variable est corrélée négativement avec ce dernier axe.

Pour les groupes d'individu, on les a classés en quatre groupes suivant les deux premiers axes.

Les deux premiers axes de cette ACP représentent 55,65% de l'inertie totale de notre jeu de données, mais les 4 premiers axes qui reflètent mieux nos variables constituent 73,26% ce qui nous donne un maximum des informations sur nos variables et sur nos individus.

Le premier axe oppose les individus tels que les SFR 18 (D1 et D2), SFR 32-34 (D1 et D2), SFR 35-37 (D2) et SFR 36-38 (D2) avec les SFR 17 (D1 et D2), SFR 5 (D1 et D2), SFR 24 (D1) et SFR 15 (D1).

Les groupes auxquels les SFR 18 (D1 et D2), SFR 32-34 (D1 et D2), SFR 35-37 (D2) et SFR 36-38 (D2) appartiennent ont des caractéristiques qui ont de fortes valeurs pour les variables telles que le rendement en grains, rendement total, nombre de talles au début tallage, nombre de talles à la fin du tallage, densité et biomasse en vers de terre pour l'horizon 10 - 20 cm, rendement en paille, la quantité en phosphore total dans les grains, la croissance ne hauteur au début et fin de tallage. Par contre, ils ont des valeurs faibles pour les variables floraison et pourcentage des attaques des vers blancs au stade de la formation de tallage.

Pour le deuxième groupe, il est constitué par les SFR 17 (D1 et D2), SFR 5 (D1 et D2), SFR 24 (D1) et SFR 15 (D1) qui sont caractérisés par de fortes valeurs pour les variables attaques des vers blancs pour les trois stades phénologiques (fin levée, tallage et montaison), teneur en phosphore, résine dans le sol, la durée de floraison, la densité et biomasse des macrofaunes. Par contre, ils ont de faibles valeurs pour tous les paramètres agronomiques du riz.

Pour notre second axe, il oppose les individus du premier groupe aux individus suivant : SFR 2 (D1 et D2), SFR 6 (D1 et D2) et SFR4. Ce groupe d'individus est caractérisé par de faibles valeurs pour les variables densité et biomasse en vers de terre et en macrofaune dans les deux horizons et aussi une faible attaque de vers blanc au stade de montaison.

3. DISCUSSIONS

3.1. Impacts des différentes pratiques SFR sur les performances agronomiques du riz et écologiques du sol

3.1.1. Impacts des différentes pratiques SFR sur les performances agronomiques du riz

L'amélioration de la production reste une préoccupation majeure pour les agriculteurs et un objectif central de la plupart des recherches agricoles. De nombreux descripteurs permettent de mesurer cette performance agronomique. Les plus évidentes sont les mesures qui fournissent des informations sur le rendement telles que la mesure du nombre de talles et de la hauteur, de biomasse aérienne et racinaire, du shoot/root ratio (rapport entre biomasse aérienne et biomasse racinaire), du suivi de la floraison, du rendement en grains, du pourcentage en grains pleins, du rendement en paille ainsi que la quantité de phosphore contenue dans les grains (Damoiseaux, 2020).

D'après nos résultats, les pratiques SFR ont des effets fortement significatifs sur la majorité de ces descripteurs et les SFR 32-34 et le SFR 18 présentent toujours la meilleure performance parmi toutes les autres sur ces descripteurs. Ces SFR sont composés par un apport de lombricompost à 6 tMS.ha⁻¹ (SFR 32-34) et de fumier traditionnel à 18 tMS.ha⁻¹ apportés tous les 3 ans (SFR 18). Le lombricompost comme le compost a un grand potentiel pour améliorer la qualité du sol et les rendements des cultures. Le lombricompost est beaucoup plus homogène et plus stable que le compost traditionnel et en plus il peut améliorer la structure du sol, augmenter la disponibilité des éléments nutritifs et améliorer la croissance des plantes (Atiyeh *et al.*, 2000, Edwards and Burrows, 1988 ; Ndegwa and Thompson, 2001, Acevedo et Pire, 2004). D'une manière générale, les éléments contenus dans les lombricompost sont beaucoup plus assimilables, car ils sont sous des formes plus facilement disponibles (Diacono et Montemurro, 2010). En plus, lors du lombricompostage, les vers stimulent l'activité microbienne et augmentent la minéralisation de l'azote, du phosphore et du carbone (Sabine, 1983, St Pierre *et al.*, 1999, Chaudhary *et al.*, 2004, Tognetti *et al.*, 2005) alors que ces éléments sont essentiels pour une bonne croissance de la plante ce qui explique alors la bonne croissance en hauteur et en nombre de talles pour les pratiques SFR utilisant du lombricompost ou du compost. L'activité microbienne est le principal facteur qui assure la libération des éléments nutritifs dans les matières organiques (Doran et Smith, 1987 ; McLatchey et Reddy, 1998). En conséquence, le lombricompost contient des niveaux élevés de matière organique, de nutriments et de substances favorisant la croissance des plantes, rendus disponibles par les bactéries à l'intérieur du tube digestif du ver de terre, ce qui en fait un excellent engrais (Banerjee *et al.*, 2019). Pour le SFR 18, l'apport important de fumier a été fait lors de la précédente année culturale (2021-2022), il n'y a eu aucun apport lors de la saison culturale 2022-2023 ; il est donc intéressant de noter que l'effet de ce fertilisant apporté en grandes quantités en année n permet encore un effet très intéressant en année n+1. Ceci laisse supposer que certains

éléments nutritifs ont été conservés dans le sol. La différence significative avec le SFR 22 repose sur le mode d'apport qui se fait en mulch ce qui pourra influencer sur la disponibilité des éléments pour la plante.

À part ces deux pratiques, les SFR avec des assemblages de matières présentent aussi une meilleure performance agronomique, surtout ceux avec des assemblages contenant du compost et du lombricompost en raison de leur richesse en éléments nutritifs (cf., tableau 4). De nombreux auteurs soulignent l'importance de l'assemblage des matières afin de gérer durablement les Ferralsols des hautes terres de Madagascar (Blanchart *et al.*, 2020 ; Raminoarison *et al.*, 2020). Ces assemblages permettent de combler les carences du Ferralsol en éléments favorables pour la croissance des plantes telles que le P, N, Ca et Mg puisque la carence en ces éléments peut affecter la croissance en riz surtout pour le phosphore, le P qui est un élément majeur à la plante et qui joue un rôle très important pour son développement. Pour le riz, il favorise une meilleure croissance racinaire, un tallage plus actif avec des talles fertiles, une bonne floraison et agit sur le bon développement des grains (Yoshida 1981 ; Lacharme, 2001). De ce fait, le manque de phosphore durant le stade végétatif va affecter le rendement et la production rizicole (Grant *et al.*, 2001; Nadeem *et al.*, 2013). Les éléments constitutifs de chaque matière apportée influencent la croissance du riz surtout au moment de la floraison. Une étude faite par Andrianofidinjanahary en 2019 a montré que les pratiques avec des apports riches en N, P et K ont une date de floraison plus précoce que les pratiques ne contenant que N et K. Ce problème de biodisponibilité peut être résolu par l'apport des matières organiques et minérales, ce qui est très intéressant dans les assemblages de matières. Les pratiques avec des fumiers ou des lombricomposts ou l'assemblage de ces deux matières ont augmenté la teneur en N, P et K des grains de 8 à 20%, de 22 à 23% et de 20 à 33%. De plus, elles ont aussi la capacité d'améliorer la croissance des plantes et l'absorption des nutriments. Avec le lombricompost, le rendement et la qualité des grains sont beaucoup plus élevés (Taheri *et al.*, 2018).

L'inoculation des organismes mutualistes (vers de terre) dans les parcelles sur les pratiques SFR 31 à 38 n'a pas eu d'effet sur les paramètres agronomiques du riz pluvial. Nos résultats affichent le contraire de ceux trouvés par Ratsiatosika en 2018 qui a montré que les vers de terre favorisent la croissance du riz et augmentent le rendement en grains. Dans notre expérimentation, l'inoculation a été assez inefficace principalement parce que les parcelles sans inoculation présentaient également des densités non négligeables de vers de terre. Ainsi, on n'a pas eu de différence significative dans les densités de vers entre les parcelles non inoculées et les parcelles inoculées, d'où une absence d'effet espéré sur la performance agronomique.

Concernant la différence entre les pratiques SFR avec l'utilisation de lombricompost, elle réside principalement dans leurs antécédents. Pour la SFR 32-34, sa meilleure performance peut s'expliquer par le fait qu'au début de l'expérimentation, il a été constitué avec un apport de poudrette de parc à $3\text{tMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ + NPK à $100\text{KgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$. Ces apports étaient considérés comme

relativement pauvres et puis l'ajout substantiel de lombricompost depuis la 5ème année de l'expérimentation à une dose assez élevée de 6 tMS.ha⁻¹ aurait pu améliorer la capacité du sol à libérer des nutriments essentiels pour les plantes. En revanche, pour les autres pratiques, dès le début de l'expérimentation, elles ont été constituées avec des apports de matières riches telles que le lombricompost, ou une combinaison de matières riches. En conséquence, la performance de ces pratiques reste similaire à celle des années précédentes en comparaison avec la SFR 32-34. L'attaque des vers blancs joue aussi un rôle sur cette différence, car selon nos résultats même si l'attaque n'était pas très forte pour les pratiques avec les lombricomposts, la pratique SFR 32-34 a été moins attaquée que les autres SFR avec lombricomposts.

Les SFR 17, SFR 10 et SFR 11 présentent les plus faibles performances agronomiques après les pratiques témoin SFR 16 et SFR 8. Ces SFR sont composés par des apports de fumier de porc + cendres (SFR 17), du fumier traditionnel + Cendres (SFR 10) et du Fumier traditionnel + prochimad (SFR 11). Notre résultat affiche le contraire de celui trouvé par Rakotondramiada (2022) qui a montré que la pratique avec de l'assemblage de fumier de porc présente une meilleure performance agronomique vu la capacité de cette matière de permettre à la plante de prélever une quantité importante de phosphore. Le fumier de porc et le prochimad sont riches en phosphore qui, pendant la phase végétative, est absorbé et accélère la croissance de la plante (Zapats & Roy, 2004). Cette faible croissance n'est donc pas liée au fait que nos matières sont pauvres en éléments indispensables pour la croissance. Le résultat de l'ACP a montré que ces pratiques ont une forte corrélation avec l'attaque des vers blancs durant les stades phénologiques du riz même après avoir enlevé le premier bloc B1 qui était considéré comme le plus attaqué. Ceci explique alors la faible croissance de la plante, car elles ont été attaquées juste au moment de la fin de levée du riz. Les attaques des larves de coléoptères Scarabeoidea communément appelés vers blancs représentent une contrainte majeure pour le riz (Avelino *et al.*, 2012). Les dégâts occasionnés par les formes adultes pour la riziculture pluviale s'observent sur les jeunes plants du riz et se présentent par la dilacération des tiges au niveau des collets entraînant un dessèchement de la plante et provoquant sa mort. Les larves consomment les racines et entraînent la mort de la plante. Ces observations sont surtout constatées sur les assemblages de matières qui sont composés par des fumiers. Une étude en Nouvelle-Zélande faite par King (1977) avait montré que l'addition du fumier pourrait influencer le comportement alimentaire des vers blancs en favorisant la décomposition de la matière organique, ce qui à son tour stimulerait la consommation de tissus végétaux par ces vers rhizophages. Le fumier a une importance dans le régime alimentaire des larves. Pourtant, une étude faite par Rakotomanga *et al.*, en 2016 n'a montré aucun effet de l'apport de fumier sur les rhizophages en système de cultures annuelles. Le SFR 18 utilise également du fumier, mais avec un apport tous les trois ans. Cette année, aucun apport n'a eu lieu, ce qui explique la faible attaque, car les conditions idéales pour stimuler les vers blancs ne sont pas réunies. Le JAE 14 (SAF/FJKM, 2022) indique que le lombricompost, en restaurant la fertilité du sol, agit comme un remède contre

certaines maladies des plantes, telles que le flétrissement et inhibe les attaques des insectes. Cela explique le faible taux d'attaques observé dans nos pratiques utilisant le lombricompost.

3.1.2. Sur les paramètres écologiques

Parmi les indicateurs écologiques, le pH est apparu comme une variable importante permettant de bien distinguer les pratiques SFR (Damoiseaux, 2020). Le pH joue un rôle clé sur la biodisponibilité des nutriments pour la plante (Zamil *et al.*, 2004 ; Zaman *et al.*, 2017 ; Zeng *et al.*, 2021), en particulier le phosphore (Hinsinger, 2001). Pour l'horizon 0 – 10 cm, les SFR à base d'assemblage organique de fumier traditionnel, compost et lombricompost donnent les meilleurs résultats concernant le pH. Cela est en adéquation avec le résultat de Sikuzani (2014). Selon son travail, les amendements organiques à base de compost donnent un pH du sol plus élevé que les amendements organiques à base de fumier. Physiquement, d'après la littérature, le sol traité avec du lombricompost a une meilleure aération, porosité, densité apparente et rétention en eau. Chimiquement, ils améliorent diverses propriétés telles que le pH, la conductivité électrique et la teneur en matière organique ce qui permet d'améliorer le rendement des cultures. Les lombricomposts sont riches en polysaccharides qui peuvent agir dans les sols comme une substance cimentaire entre les particules de sol et améliorer la stabilité des agrégats (Su Lin Lim *et al.*, 2014). Pour les types d'amendements organiques, leurs quantités et les assemblages formés jouent également un rôle dans la variabilité des pH du sol. Cela est observé sur les pratiques SFR 12, SFR 13, SFR 14, SFR 15 et SFR 24. L'inoculation des vers de terre présente un effet sur le pH eau du sol. Dans son étude, Kemassi & Daddi (2018) ont montré que la présence des vers de terre dans les traitements favorise l'augmentation du pH par rapport au témoin. La comparaison de la valeur de pH entre les SFR 35 – 37 et 36 – 38 est en adéquation avec cela, par contre pour les SFR 31-33 et 32-34 ce n'est pas le cas. Cela s'explique par la densité non négligeable de vers dans les SFR sans inoculation. Pour le second horizon (10-20cm), la meilleure valeur de pH observée sur le SFR 10 s'explique par la présence de cendre qui joue un rôle important dans la correction de pH du sol et pour le SFR 18, l'apport avec une dose élevée tous les 3 ans peut influencer le pH du sol.

Pour le phosphore dans le sol, la quantité d'ions orthophosphates retenue par adsorption sur les sites d'échange affectent la disponibilité de phosphore P dans le sol, l'absorption du P par les plantes et par la suite l'efficacité et l'utilisation du phosphore (Jianlin et Yong, 2021). Le phosphore est un nutriment végétal essentiel, avec l'azote et le potassium pour la croissance des cultures (Schacht- man *et al.*, 1998). Les carences en phosphore du sol peuvent affecter directement le métabolisme des cultures, ce qui peut à son tour inhiber la croissance et le rendement (Jianlin et Yong, 2021). Le fumier de porc a une forte concentration en P qui est hautement disponible pour les plantes (Pagliari *et al.*, 2012 ; Li *et al.*, 2014, 2015) ce qui est difficile à immobiliser pour les ions du sol (par exemple Ca^{2+} , Fe^{3+} et Al^{3+}). Dans le SFR 17, le fumier de porc est assemblé avec des cendres qui ont la capacité à corriger le pH du sol. Cette correction du pH est essentielle pour améliorer la biodisponibilité en phosphore. Le sol de la pratique SFR 24 a aussi une quantité en

phosphore résine modérément élevée par rapport aux autres pratiques du fait de l'existence de la fiente de volailles dans sa composition. La fiente de volailles a une teneur intéressante en phosphore selon les études menées par Ben Namanne en 2020. De même, pour le guano qui est issu des déjections des chauves-souris, Biaoou *et al.*, (2017) ont démontré que le guano avait une forte teneur en phosphore, potassium, calcium et magnésium ; ceci explique aussi la teneur en phosphore du sol dans la pratique SFR 15. Ces observations des hautes teneurs en P résine du sol dans les pratiques SFR 17 et SFR 24 sont en désaccord avec les faibles rendements observés sur ces SFR et grandement liés aux attaques de vers blancs. Sans ces attaques, ces SFR auraient vraisemblablement produit de hauts rendements, comme cela a été observé lors des saisons culturales précédentes.

La matière organique du sol est un facteur majeur déterminant des activités biologiques du sol. Toutefois, les variations du niveau des activités biologiques sont souvent liées à différents modes de gestion qui se traduisent également par des variations des MOS, en quantité et en qualité. D'une manière générale, la diversité de la macrofaune des sols peut être utilisée à la fois comme outil de diagnostic de leur fertilité, mais aussi comme ressource pour améliorer le fonctionnement du sol (Blanchart *et al.*, 2006 ; Lavelle *et al.*, 2006). Sa diversité constitue une composante importante de la faune du sol assurant des rôles importants dans les processus écologiques (Lavelle *et al.*, 1997). Selon Urra *et al.* (2019), l'apport du fumier favorise la diversification du réseau trophique. Au sein d'une combinaison de matières comprenant le fumier comme l'un des éléments constitutifs, les effets bénéfiques par effet de composition ou effet interaction stimulent les activités fauniques et microbiennes du sol. Ce qui explique, la forte diversité de la macrofaune pour nos pratiques avec des assemblages de matières organiques. La densité de la macrofaune est influencée par plusieurs facteurs tels que la qualité et la quantité des ressources organiques (Auber *et al.*, 2004) ce qui explique la forte densité en macrofaune sur les pratiques avec des composts ou des lombricomposts ou des Fumiers. C'est le cas pour les SFR 17 (fumier de porc + cendre) et le SFR 5 (fumier amélioré). De nombreuses espèces ou groupes taxonomiques d'invertébrés sont bénéfiques pour les sols. Les vers de terre, par exemple, en tant qu'ingénieurs du sol fournissent des services écosystémiques tels que la décomposition des matières organiques et recyclage des nutriments. L'abondance et la biomasse des vers de terre dans le sol peuvent être affectées par plusieurs facteurs, notamment le pH du sol, l'humidité, la température, l'aération, le CO₂, le type de sol, la matière organique, l'approvisionnement alimentaire et les interactions entre ces facteurs. Cela est confirmé dans notre étude par le résultat de l'ACP qui montre que le pH est corrélé positivement avec la densité et la biomasse des vers de terre surtout pour l'horizon 10 – 20 cm. Les vers de terre utilisent une grande variété de matières organiques pour se nourrir et peuvent même obtenir une nutrition suffisante à partir des matières organiques et de micro-organismes pour survivre (Edwards *et al.*, 2022). Les amendements organiques d'origine animale, tels que le fumier, ont un impact significatif sur le développement des vers de terre. Les résultats, en particulier la forte densité de vers de terre dans les pratiques utilisant du fumier (comme le SFR 5), confirment cette

observation. Mirsa *et al.* (2005) démontrent que le fumier rend les vers très actifs, ce qui est cohérent avec nos propres constatations. La densité microbienne contribue à l'augmentation de la densité des vers de terre et la biomasse des vers de terre augmente avec la densité du peuplement (Dominguez et Edwards, 1997). Divers auteurs ont rapporté que l'apport organique à long terme (fumier et résidus de récolte) et les couvertures vivantes suffisent à augmenter les ressources pour les communautés du sol. Ceux-ci favorisent les activités et la biomasse des décomposeurs et des ingénieurs du sol (Blanchart *et al.*, 2006 ; Birkhofer *et al.*, 2008). Par contre il faut tenir compte que la réponse des vers de terre est spécifique des sites d'intervention et aussi des conditions du milieu (Rabary, 2011).

Notre première hypothèse stipulant que les pratiques SFR les plus performantes au niveau des paramètres agronomiques et écologiques sont celles associant plusieurs matières fertilisantes est partiellement vérifiée.

3.2. Impacts du décalage de semis sur les paramètres agronomiques du riz

Nos résultats ont montré que le décalage de semis a affecté plusieurs variables agronomiques du riz à savoir : la hauteur du riz au début et à la fin de tallage, la floraison, le rendement en grains, le rendement total (grains + paille) ainsi que la quantité de phosphore dans les grains. Pour toutes ces différentes variables, c'est le semis tardif (D2) qui est le plus performant par rapport au semis normal (D1).

En agriculture, nombreux sont les facteurs qui peuvent influencer le rendement. Dans le cas de la riziculture, la température ainsi que la pluviométrie jouent un rôle très important sur la production en riz surtout en riz pluvial. En outre tous ces facteurs sont indépendants les uns des autres. D'une manière générale, les cumuls pluviométriques annuels semblent ne pas constituer un risque pour la culture du riz pluvial, pourtant la baisse des cumuls pluviométriques saisonniers constitue un risque climatique pour cette culture. En effet cette baisse peut entraîner des déficits hydriques qui se traduisent par la baisse du rendement du riz pluvial (Beavogui, 2012). Mais à part le déficit, on pourrait aussi se confronter à l'excès de la quantité de pluie, ce qui est aussi néfaste pour la culture. D'après Ingram (1993), généralement, un riz pluvial nécessite 700 à 800 mm d'eau pour une durée du cycle de 130 jours et la quantité reçue par nos plantes se situent un peu au-delà de cette fourchette, car pour D1, le riz a reçu une quantité de 1084 mm de pluie et pour D2 elle a été de 996 mm.

Pendant la phase de croissance, la formation de talles et de panicules chez le riz dépend de la température de croissance, qui est optimale autour de 13°C (Kaoukou et al, 2016). L'humidité atmosphérique élevée, généralement associée à des précipitations, favorise le développement abondant des talles, et, par conséquent, des panicules. Cependant au cours de la phase de la formation de talle, le besoin de la plante est moyen (Rabenjanahary, 2012). Dans cette étude, D1 a reçu une quantité de pluie nettement supérieure (272 mm) par rapport à D2 (142mm) pendant la période de formation des talles. Selon les observations de Kaoukou et al, (2016), en cas

d'inondation excessive, le riz a tendance à produire moins de talles fertiles. Au cours de cette saison culturale, une forte quantité de pluie a été enregistrée en janvier, dépassant la moyenne sur 10 ans, ce qui coïncide avec le début de la formation des talles pour D1. Ainsi, ceci explique la meilleure formation en talle sur D2 par rapport à D1 ce qui est surtout observé au niveau de chaque pratique SFR.

Le stress hydrique retarde la floraison chez la plupart des cultivars, mais peut aussi l'accélérer chez d'autres (Lilley et Fukai, 1994 ; Lafitte et al., 2006). Ceci est expliqué par la différence génétique dans les gènes de chaque cultivar qui font partie du contrôle de la floraison. Une quantité élevée de pluie est importante entre la division réductionnelle et l'épiaison, se prolongeant jusqu'à la floraison, car c'est le stade le plus critique pour un déficit en eau (Rabenjanahary, 2012). Cependant, dans cette étude, aucun stress hydrique n'a été observé au cours de la période de la floraison pour les deux dates de semis, car ils ont reçu une quantité suffisante de pluie qui est de l'ordre de 100 mm de précipitation. L'effet significatif de la durée de la phase végétative jusqu'à la floraison entre D1 et D2 n'est donc pas dû à l'effet du stress hydrique ni à la variété, mais à d'autres facteurs importants tels que la longueur de jour ou la température vue que c'est une plante photopériodique (Rabenjanahary, 2012).

Les conditions climatiques défavorables surtout la baisse de la pluviométrie durant les phases de remplissage de grains peuvent gêner l'évolution du développement des épillets qui peut donner des épillets vides (Moreau, 1987). Cependant, le pourcentage en grains pleins entre les deux dates de semis ne présente aucune différence significative. Ceci explique alors que la quantité de pluie reçue par D1 et D2 pendant cette phase est suffisante. Par contre, la durée de la saison de pluie a eu aussi une grande répercussion sur le rendement. Pendant la période de récolte pour D1, la grêle est survenue et ça a eu un effet très significatif sur D1, mais pas sur D2 qui était au stade où les grains sont résistants face à ce phénomène climatique.

Les ravageurs jouent un rôle déterminant dans le rendement, et ils sont de plus en plus favorisés par les changements climatiques, ce qui affecte particulièrement les cultures. Au cours de notre expérimentation, nous avons observé une forte attaque de vers blancs sur les parcelles de riz. Ces ravageurs sont généralement responsables de dégâts majeurs aux racines en riziculture pluviale, ainsi qu'au collet des jeunes plants (Randriamanantsoa et al., 2010). Leurs effets se manifestent par le flétrissement et le dessèchement des plantes, conduisant à leur mort. Nos résultats indiquent que les plants de riz ont été davantage attaqués dans les parcelles de D1 que dans celles de D2. Cette observation peut s'expliquer par le fait que l'émergence de ces ravageurs coïncide avec les premières pluies et les semis (Rafaraso et al., 2009). Dans notre expérimentation, le semis de D1 a été réalisé au moment de l'arrivée de la première pluie, ce qui a potentiellement favorisé une plus grande exposition aux attaques des vers blancs.

Notre deuxième hypothèse stipulant que le décalage de semis affecte les paramètres agronomiques du riz est donc complètement vérifiée.

3.3. Impacts de l'interaction entre les pratiques SFR et le décalage de semis

Les résultats révèlent une réponse positive du riz au décalage de semis, mais cette réponse varie en fonction des pratiques SFR, certaines montrant un delta positif élevé, d'autre faible ou négatif.

La variation entre les deux dates de semis pour chaque SFR dépend de plusieurs facteurs, notamment les conditions climatiques et pédoclimatiques qui influencent fortement la disponibilité des éléments dans le sol, éléments indispensables pour la croissance de la plante. Les SFR, composés par des matières organiques, peuvent être soumis à l'influence des conditions météorologiques, telles que les fortes pluies qui peuvent entraîner l'érosion du sol et le lessivage des éléments fertilisants. Selon Husson et al, (2004), avec des conditions climatiques défavorables, les engrais apportés ne peuvent pas exprimer leur potentiel vu qu'ils sont susceptibles d'être lessivés ou emportés par l'érosion. Et en raison de la pauvreté en éléments nutritifs de notre sol (Raminoarison et al, 2020), cela impacte directement le rendement. Un décalage de semis d'un mois expose la culture à des phénomènes climatiques différents pour chaque stade phénologique du riz, influençant la disponibilité des éléments nécessaires à la plante. Nos résultats montrent que les conditions optimales pour la disponibilité des nutriments étaient favorables à la date de semis D2. Le temps de minéralisation, la composition et les caractéristiques de chaque matière apportée influence également la disponibilité des éléments pour la plante. Le lombricompost, en raison de sa stabilité et de sa capacité à augmenter la disponibilité des éléments nutritifs (Acevedo et Pire, 2004), contribue à des rendements élevés. De plus, les autres compositions jouent un rôle crucial dans le développement des plantes, la cendre pour sa capacité à améliorer le pH_{eau} et tamponne l'acidité du sol (SFR 13) et le Prochimad pour la disponibilité du phosphore (SFR 14) vu sa richesse en cet élément. Cela explique alors la valeur faible de delta dans ces SFR. Pour le SFR 18, vu que l'apport a été fait l'année dernière avec une forte dose, les matières ont eu beaucoup de temps pour la minéralisation et l'on peut supposer que pour cette année culturale, les éléments utiles pour la plante sont déjà disponibles, et cela pour D1 et D2, d'où sa meilleure performance pour les deux dates de semis.

Dans les cas des pratiques qui favorisent le semis tardif, comme les SFR 8, SFR 17 et SFR 24, leurs préférences sont en relation avec la constituante de la matière apportée. Pour le SFR 8, rappelons que cette pratique présente des rendements très faibles depuis plusieurs années, ce qui est en lien avec l'apport seul de la fertilisation minérale (NPK+Urée). Vu sa composition, il est riche en azote (cf. tableau 4). L'azote est important pour la croissance de la plante, mais en cas d'excès cela va entraîner un effet négatif comme la baisse de rendement et la diminution de la qualité des récoltes (N'Dayegamie, 2007). Un lessivage ou un phénomène de volatilisation peuvent aussi survenir. Cette année, les SFR 17 et SFR 24 ont été fortement attaquées par les vers blancs surtout en D1. L'émergence de ces insectes ravageurs est favorisée par l'arrivée de la première pluie (Rafaraso et al., 2009) et les matières riches comme le fumier stimulent la consommation de tissus végétaux par ces insectes. Cela explique alors la forte attaque en D1, qui est réalisé à l'arrivée de la première pluie coïncidant avec leur émergence.

La performance de chaque SFR dépend de la composition de chaque matière et en même temps, elle est favorisée par les facteurs environnementaux et climatiques ce qui entraîne la différence de performance pour les deux dates de semis. Parmi les SFR, il y a ceux qui ont une meilleure performance agronomique et ceux avec des performances écologiques. D'après le calcul des indicateurs agronomiques et écologiques (cf. Annexe 9), les pratiques SFR 5 et SFR 17 présentent la meilleure performance écologique parmi les 25 SFR, pourtant leur performance agronomique est faible. Par contre les pratiques avec des assemblages de matières comme le lombricompost + compost + fumier traditionnel, ou des lombricompost seuls ou de fumier seul apporté à haute dose présentent des performances agronomiques meilleures et en même temps leurs performances écologiques ne sont pas mauvaises. De plus, ces pratiques ont plutôt une tolérance face à un décalage de semis, car entre D1 et D2, leur performance agronomique est plutôt stable.

Notre troisième hypothèse stipulant alors que les pratiques qui ont une meilleure performance écologique sont également les plus résilientes au changement climatique est partiellement vérifiée.

4. RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

4.1. Recommandations sur les pratiques SFR les plus performantes et résilientes face au changement climatique

Grâce aux différentes ACP qui ont été réalisées, ainsi que les résultats obtenus, il a été possible de faire un tri sur les différentes pratiques SFR qui sont les plus performantes agronomiquement, écologiquement, et aussi celles qui sont le plus résilientes au changement climatique face à un décalage de semis. Ainsi, les pratiques suivantes sont retenues grâce à leur performance agronomique que ce soit pour D1 et pour D2 : SFR 12 (Fumier traditionnel à 2tMS.ha⁻¹ + Compost 2 tMS.ha⁻¹ + Lombricompost 2 tMS.ha⁻¹), SFR 13 (Fumier traditionnel à 2 tMS.ha⁻¹ + Compost 2 tMS.ha⁻¹ + Lombricompost 2 tMS.ha⁻¹ + Cendres 500 kg.ha⁻¹), SFR 14 (Fumier traditionnel à 2 tMS.ha⁻¹ + Compost 2 tMS.ha⁻¹ + Lombricompost 2 tMS.ha⁻¹ + Prochimad 500 kg.ha⁻¹), SFR 18 (Fumier traditionnelle à 18 tMS.ha⁻¹) et SFR 32-34 (Lombricompost à 6 tMS.ha⁻¹). Il est important de souligner que ces pratiques sont toutes issues des innovations scientifiques.

Ces cinq SFR vont être comparés entre eux afin de voir les pratiques les plus efficaces en termes de résilience climatique face à un décalage de semis tout en considérant leur performance agronomique et leur performance écologique. La figure 23 ci-dessus présente ces traitements et leurs performances selon les variables étudiées. La figure 23a, représente la valeur de delta pour chaque pratique SFR et la figure 23b représente les descripteurs écologiques qui ont été notés sur une valeur entre 0 à 1 selon leur performance. La valeur de delta est similaire à la valeur calculée au début c'est-à-dire $(D2-D1/D1) * 100$ alors que pour les descripteurs écologiques, les données ont été transformées par une transformation homothétique au niveau de chaque variable afin d'obtenir la valeur entre 0 et 1.

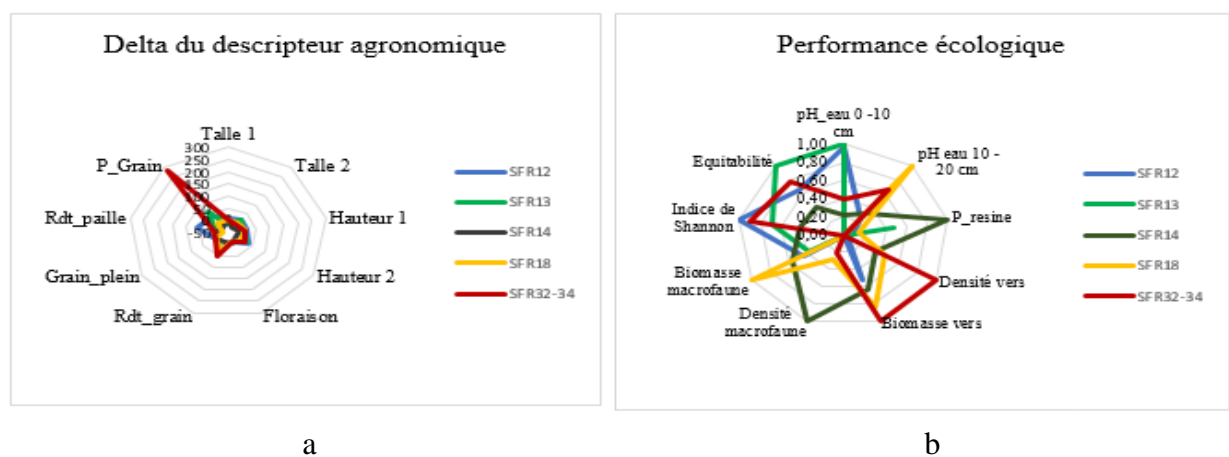


Figure 23 : Comparaison des différentes pratiques SFR retenues comme ayant une performance agronomique meilleure sur les deux dates de semis et aussi sur leur performance écologique

Taille 1 : nombre de talles au début tallage, taille 2 : nombre de talles au fin tallage, hauteur 1 : hauteur au début tallage, hauteur 2 : hauteur à la fin de tallage, grain plein : pourcentage en grain plein, rdt_paille : rendement en paille, rdt_grain : rendement en grain, P_grain : phosphore contenu dans les grains

Parmi ces 5 SFR, c'est le SFR 14 qui présente la valeur de delta la plus faible sur la majorité des différentes variables. Cela nous permet alors de dire que cette pratique ne présente pas trop de variation, quelle que soit la date de semis réalisée. En même temps, en termes de performance écologique, elle est plus performante en comparaison des 5 autres pratiques surtout pour la densité en macrofaune ainsi que sur la teneur en phosphore résine dans le sol alors que ces indicateurs sont importants pour la plante. Le phosphore disponible, qui est l'un des éléments indispensables pour le riz et la macrofaune pour leur capacité à fournir des services pour le développement de la plante. Cette performance de l'assemblage de MF a été déjà confirmée par de nombreuses études, grâce aux effets diversifiés, additifs ou synergiques de la qualité des matières (Andriamananjara *et al.*, 2019). Le SFR 18 présente aussi un delta beaucoup plus faible et avec des performances écologiques assez bonnes. Pour les trois autres pratiques, la valeur de leur delta varie en fonction de chaque descripteur agronomique et leur performance écologique varie aussi. Vu nos résultats, ces 5 pratiques sont alors toutes intéressantes grâce à leur performance agronomique et écologique respectifs. Pourtant en se référant aux résultats de leur performance agronomique et leur résilience face aux décalages de semis, c'est le SFR 18 avec un apport localisé (en poquet) de fumier traditionnel à une dose de 18 t MS ha⁻¹ qui est le plus performant.

4.2. Limites de l'étude et perspectives pour les recherches futures

L'objectif principal de cette étude est de comprendre si un semis tardif d'un mois est une solution pour améliorer l'adaptabilité climatique du riz pluvial après différents types de traitements par rapport à un semis normal. Il existe cependant un certain nombre de limites qui empêchent un suivi régulier des expériences sur le terrain elles-mêmes. D'une part, nous ne pouvons pas rester dans les champs pendant toute la saison de croissance et ne pouvons donc pas surveiller régulièrement les conditions réelles dans les champs et nous ne pouvons fier qu'aux observations des agriculteurs. En revanche, concernant les mesures effectuées, en raison du volume important de notre travail, nous n'avons retenu que des paramètres très importants pour évaluer notre étude au lieu d'évaluer tous les paramètres agronomiques comme dans les études précédentes. Les fortes attaques des vers blancs sur le bloc 1 (et également en partie sur les autres blocs) est également une limitation majeure de notre étude, car du fait de ces fortes attaques, nous avons dû supprimer le bloc 1 dans le traitement des données pour ne pas biaiser nos résultats. De plus, certaines pratiques SFR ont été particulièrement attaquées y compris sur les autres blocs, notamment les SFR 17 et SFR 24 qui présentent pourtant les meilleures conditions édaphiques (ceci expliquant peut-être les fortes attaques de bioagresseurs). L'étude de ces attaques fait aussi l'objet d'une autre étude parallèle faite par une autre étudiante. Il est important de bien considérer ces résultats, notamment le taux d'attaque, car il a un impact très significatif sur nos paramètres agronomiques et d'après nos résultats, c'est le D1 qui a été le plus attaqué par ces ravageurs ce qui suggère qu'un semis tardif serait une des solutions pour la lutte contre les bioagresseurs. D'autres limites de cette étude résident dans les fortes précipitations lors de la récolte D1 et les attaques de grêle imprévues, qui ont fortement affecté le rendement en D1, mais pas celui de D2. En raison de cette catastrophe

naturelle, lors de la récolte D1, nous avons dû ramasser les grains tombés à terre et les laver, car ils étaient recouverts de boue. De plus, les grains dans les carrés de rendement et hors des carrés de rendement étaient mélangés, nous avons donc dû les collecter ensemble et les séparer lors du calcul, car le calcul du rendement est effectué sur le carré du rendement pour éliminer les effets de bordure. Cette catastrophe naturelle peut apparaître comme une limite pour nos semis normaux, car pour notre semis tardif, même s'ils ont été affectés par la grêle, l'impact n'a pas été aussi important que pour D1. Le semis retardé est donc un bon aperçu de la résilience du riz face au changement climatique du fait du changement de la période de pluie. Cependant, cette étude a ses limites, car nous ne pouvons évaluer que les effets du stress hydrique que ce soit en excès ou en déficit, alors que la résilience ne dépend pas uniquement du stress hydrique. La pluviométrie ainsi que d'autres facteurs tels que la température, les conditions biologiques et physiologiques de la plante, comme les phytohormones, jouent un rôle très important dans la production du riz. Comme perspectives alors, lorsque l'on introduit le décalage de semis, il est également important d'introduire l'effet de la température dans les paramètres à mesurer, car elle a un impact sur le rendement, notamment pendant la phase de croissance du riz, et puisque le riz est une plante photopériodique, la température et la lumière jouent un rôle très important. À part ces différents paramètres, on peut aussi tester des variétés (nouvelles ou déjà diffusées) en couplant cela avec le décalage de semis, car la résilience peut aussi dépendre de la variété des riz plantés. Il serait donc intéressant de tester les effets de différentes pratiques soumises à un décalage de semis en testant de nombreuses variétés de riz pluvial afin de tirer quelles pratiques avec quelles variétés seraient les plus résilients face au changement climatique.

CONCLUSION

En conclusion, les résultats de cette étude indiquent que les paramètres agronomiques et écologiques sont fortement affectés par les pratiques SFR. Les performances dépendent de chaque pratique. Les pratiques utilisant le lombricompost, le fumier, le compost ou une combinaison de ces différentes matières présentent les meilleures performances agronomiques. Ces pratiques sont également efficaces en ce qui concerne les paramètres écologiques tels que la densité, la biomasse et la diversité de la macrofaune. Parmi les 25 SFR, deux pratiques présentaient de bonnes performances écologiques, mais des paramètres agronomiques très faibles. À noter que ces SFR ont été fortement soumis à des attaques intenses de ravageurs du riz (vers blancs). Ils sont composés par un assemblage de fumier de porc + cendres (SFR 17) et des assemblages assez riches composés par des fumiers traditionnels, du compost du lombricompost, mais aussi de la fiente de volailles (SFR 24).

Du point de vue du décalage de semis, un semis tardif a un impact très significatif et positif sur les paramètres agronomiques du riz à l'exception du nombre de talles, le pourcentage en grains pleins et du rendement en paille. Toutefois, les semis tardifs représentent toujours la meilleure performance si l'on compare les deux périodes de semis. Cette forte différence était plus évidente pour les paramètres de floraison et le rendement en grains. À la floraison, D1 avait une durée moyenne de 118 JAS, tandis que D2 avait une durée moyenne de 104 JAS, entraînant une diminution de 11,70 % de la durée moyenne par rapport à D1. Le rendement en grains en D2 a augmenté jusqu'à 40 % par rapport au rendement en grains en D1. Ceci est également visible pour la teneur en phosphore du grains. Les résultats ont également montré que par rapport à D2, D1 a reçu plus de précipitations tout au long de la période phénologique du riz. D1 a subi significativement plus d'attaques que D2, ce qui signifie que les conditions climatiques y étaient donc plus favorables à l'attaque de ces ravageurs qu'en D2, d'autant plus que D1 et D2 ont reçu les mêmes traitements ainsi que les mêmes entretiens tout au long de l'expérimentation.

Les pratiques qui offrent une meilleure résilience climatique face à un décalage de semis sont l'utilisation de fumier traditionnel à forte dose (SFR 18), de lombricompost (SFR 32-34) et certaines combinaisons de ces matières (SFR 12, SFR 13 et SFR 14). Ces pratiques sont les meilleures en termes agronomiques, mais pas en termes écologiques, notamment par rapport à la quantité de phosphore disponible dans le sol, mais elles ne sont pas non plus médiocres. Les différences de paramètres agronomiques entre les deux dates de semis n'étaient pas très importantes pour ces SFR, notamment pour le SFR 14 et le SFR 18. Une autre répétition de cet essai serait une alternative pour évaluer si les résultats obtenus sont les mêmes que ceux obtenus cette année, afin de bien évaluer les pratiques SFR les plus efficaces et les plus résilientes au changement climatique.

BIBLIOGRAPHIES

Acevedo, I.C. and Pire, R., 2004. Effects of vermicompost as substrate amendment on the growth of papaya (*Carica papaya* L.). *Interciencia*, 29 : 274–279.

Allwood J. M., V. Bosetti, N. K. Dubash, L. Gómez-Echeverri et C. von Stechow, 2014 : Glossaire. In : *Changements climatiques 2014, L'atténuation du changement climatique Contribution du Groupe de travail III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC)* pp : 123-153

Altieri M. A., 1999. The Ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 74:19-31

Altieri, M. A., 2009. *Agroecology, Small Farms, and Food Sovereignty.* 9 p.

Altieri M.A., Nicholls C.I., Henao A. & Lana M.A. 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35: 869-890.

Andriamananjara, A., Rakotoson, T., Razafimbelo, T., Rabeharisoa, L., Razafimanantsoa, M.-P., Masse, D., 2019. Farmyard manure improves phosphorus use efficiency in weathered P deficient soil. *Nutr Cycl Agroecosyst.*

futaAndrianofidinjanahary M.M., 2019, Effets combinés des génotypes et du micro dosage du phosphore en pépinière du riz irrigué. Cas de la région Vakinankaratra. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome au grade Master 2. 36p

Atiyeh, R.M., Dominguez, J., Subler, S., Edwards, C.A., 2000. Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei* Bouché) and the effects on seedling growth. *Pedobiologia*, 44 : 709-724.

Aubert M., Hedde M., Decaëns T., Margerie P., Alard D. et Bureau F., 2004. Facteurs contrôlant la variabilité spatiale de la macrofaune du sol dans une hêtraie pure et une hêtraie-charmaie, *Comptes Rendus Biologies*, pp. 57-74.

Avelino J. et al., 2012. Incorporating plant species diversity in cropping systems for pest and disease risk management. *Forum for Agricultural Risk Management in Development*,

Banerjee, A., Biswas, J.K., Pant, D., Sarkar, B., Chaudhuri, P., Rai, M., Meers, E., 2019. Enteric bacteria from the earthworm (*Metaphire posthuma*) promote plant growth and remediate toxic trace elements. *J. Environ. Manage.* 250, 109530.

Beavogui, M. 2012. Impacts du changement climatique sur la culture du riz pluvial en haute guinée et proposition de stratégies d'adaptation. *Centre Regional Agrhymet. Niger.* 95 p.

Bender, A., and Beller, S., 2016. Probing the cultural constitution of causal cognition-a research program. *Front. Psychol.* 7: 245

Ben Naamane, C. K. 2020, Des matières fertilisantes adaptées à la riziculture pluviale et à la gestion de la fertilité des sols des Hautes Terres de Madagascar

Biaou O. D. B. Saidou A., Bachabi F-X., Padonou G. E. et Balogoun I., 2017. Effet de l'apport de différents types d'engrais organiques sur la fertilité du sol et la production de la carotte (*Daucus carota* L.) sur sol ferrallitique au sud Bénin, *International Journal of Biological and Chemical Science*. 11: 2315-2326

Birkhofer, K., Bezemer, T. M., Bloem, J., Bonkowski, M., Christensen, S., Dubois, D., Ekelund, F., Fließbach, A., Gunst, L., Hedlund, K., Mäder, P., Mikola, J., Robin, C., Setälä, H., Tatin-Froux, F., Van der Putten, W. H. & Scheu, S., 2008. Long-term organic farming fosters below and aboveground biota : Implications for soil quality, biological control and productivity. *Soil Biology and Biochemistry* 40 : 2297-2308.

Blanchart, E., Villenave, C., Viallatoux, A., Barthès, B., Girardin, C., Azontonde, A. & Feller, C. 2006. Long-term effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. utilis) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in southern Benin. *European Journal of Soil Biology* 42 : 136-144.

Blanchart E. & Trap J. 2020, Intensifier les fonctions écologiques du sol pour fournir durablement des services écosystémiques en agriculture. *Étude et Gestion des Sols*, 27 : 121-134.

Blanchart, E., Razafimbelo, T., Audouin, S., Muller, B., Razafimahatratra, H. M., & Raharison, T., 2020. Intensification écologique de l'agriculture des Hautes Terres de Madagascar. 5 p.

Chaudhary D.R., Bhandari S.C., Shukla L.M., 2004. Role of vermicompost in sustainable agriculture - A review 12.

Damoiseaux, M., 2020. Proposition d'indicateurs multicritères d'évaluation de performance de pratiques de restauration des fonctions écologiques des sols : le contexte de la riziculture pluviale. *École Supérieure d'agriculture d'Angers*. 101 p.

Diacono M., Montemurro F., 2010. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 30 : 401–422

Dominguez, J., Edwards, C.A., 1997. Effects of stocking rate and moisture content on the growth and maturation of *Eisenia andrei* (Oligochaeta) in pig manure. *Soil Biology Biochem*. 29 : 743 – 746

Doran J.W., Smith M.S., 1987. Organic Matter Management and Utilization Of Soil and Fertilizer Nutrients, in : *Soil Fertility and Organic Matter as Critical Components of Production Systems*. John Wiley & Sons, Ltd. 53–72.

- Edwards, C.A., Burrows, I., 1988.** The potential of earthworm composts as plant growth media. In : Edwards, C.A., Neuhauser, E. (Eds). Earthworms in waste and environmental management. SPB Academic Press. The Hague, the Netherlands, pp 21-32.
- Edwards C.A. & Arancon N.Q. 2022.** The influence of environmental factors on earthworms, *Biology and Ecology Earthworms*, pages: 191-232.
- FAO, 2015.** Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. La FAO et les 17 Objectifs de Développement Durable. 8p.
- FAO., 2017.** La FAO et les ODD - Des indicateurs de mesure pour suivre la mise en oeuvre du Programme de développement durable à l'horizon 2030. 1-40.
- Francis, C., Lieblein, G., Gliessman, S., Breland, T. A., Creamer, N., Harwood, R., Salomonsson, L., Helenius, J., Rickerl, D., Salvador, R., Wiedenhoft, M., Simmons, S., Allen, P., Altieri, M., Flora, C., & Poincelot, R., 2003.** *Agroecology : The Ecology of Food Systems*. 99-118.
- GIEC., 2013.** Glossaire. In *Changements climatiques*. 185-204.
- Grant C., Flaten D., Tomasiewicz D., Sheppard S., 2001.** The importance of early season phosphorus nutrition. *Can. J. Plant Sci.* 81 : 211-22
- Griffon M. 2013.** Qu'est-ce que l'agriculture écologiquement intensive? Éditions Quæ, 220 p.
- Grosclaude, J.-Y., Deberre, J.-C., Martin, M.-A., & Matheron, G., 2006.** *Le semis direct sur couverture végétale permanente (SCV)*, AFD, Paris, France. 68 p.
- Hall R., 1993.** A framework linking intangible resources and capabilities to sustainable competitive advantage. *Strategic Management Journal*. 14 : 607-618.
- Hinsinger, P., 2001.** Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes : a review. 173-195.
- Husson O., Castella JC., Ha Dinh Tuan, Naudin K. 2004,** Diagnostic agronomique des facteurs limitant le rendement du ri pluvial de montagne dans le nord du Vietnam, *Cahiers Agricultures* 13 : 421 - 8
- Ingram K.T. ,1993.** Water relations in the soil-plant-atmosphere continuum. Background paper for irrigation water management training course. IRRI. Philippines
- JAE 14, 2022.** Agriculture résiliente, restauration de la dégradation des sols, capital naturel

- Jiang B, Shen J, Sun M, Yajun HU, Jiang W, Wang J, Yong LI and Jinshui WU, 2021.** Soil phosphorus availability and rice phosphorus uptake in paddy fields under various agronomic practices, Elsevier B.V. and Science Press, *Pedosphere* 31 : 103–115
- Joyeux, C., & Enjalric, F., 2014.** L'AGROÉCOLOGIE : un nouveau paradigme pour une production agricole durable. GSDM/Cirad. 6 p.
- Kemassi S., Daddi Bouhoun M., 2018.** Étude de l'impact des lombrics sur le pH et la conductivité électrique des composts de déchets végétaux en conditions sahariennes : le cas de Ouargla.
- King P.D., 1977.** Effect of plant species and organic matter on feeding behaviour and weight gain of larval black beetle, *Heteronychus arator* (Coleoptera: Scarabaeidae). *New Zealand J. Zool.*, 4 : 445-448.
- Kouakou, K.P.M., Muller, B., Fofana, A., Guisse, A., 2016.** Performances agronomiques de quatre variétés de riz pluvial NERICA de plateau semé à différentes dates en zone soudano-sahélienne au Sénégal. *Journal of Applied Biosciences* 99, 9382.
- Lacharme M., 2001.** La fertilisation minérale du riz. « Mémento technique de Riziculture ». Fascicule 6. Coopération française. 19p.
- Lafitte, H.R., Li, Z.K., Vijayakumar, C.H.M. et al. 2006.** Improvement of rice drought tolerance through backcross breeding : evaluation of donors and selection in drought nurseries. *Field Crops Res.* 97 : 77–86.
- Lavelle, P. 1997.** Faunal activities and soil processes : Adaptive strategies that determine ecosystem function. *Advances in Ecological Research* 27 : 93-132.
- Lavelle P., Spain A.V., 2001.** Soil Ecology. *Vadose Zone Journal*. 11p.
- Lavelle P. et al., 2006.** Soil invertebrates and ecosystem services. *Eur. J. Soil Biol.*, 42 : 3-15.
- Leippert F., Darmaun M., Bernoux M. and Mpheshea M. 2020.** The potential of agroecology to build climate-resilient livelihoods and food systems. Rome. FAO and Biovision.
- Li G H, Li H G, Leffelaar P A, Shen J B, Zhang F S. 2014.** Characterization of phosphorus in animal manures collected from three (dairy, swine, and broiler) farms in China.
- Li L, Liang X Q, Ye Y S, Zhao Y, Zhang Y X, Jin Y, Yuan J L, Chen Y X. 2015.** Effects of repeated swine manure applications on legacy phosphorus and phosphomonoesterase activities in a paddy soil. *Biol Fert Soils.* 51: 167–181.
- Lilley, J.M. and Fukai, S. 1994.** Effect of timing and severity of water deficit on four diverse rice cultivars III. The phenological development, crop growth and grain yield. *Field Crops Res.* 37 : 225–234.

McLatchey G.P., Reddy K.R., 1998. Regulation of Organic Matter Decomposition and Nutrient Release in Wetland Soil. *Journal of Environmental Quality*. 27 : 1268–1274.

Misra R. V., Hiraoka H et Roy R. N., 2005. Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole. FAO. Italie. 51p.

Moreau D, GRET, 1987. L'analyse de l'élaboration du rendement du riz : les outils de diagnostic. Paris France, 125 p

Nadeem M., Mollier A., Morel C., Shahid M., Aslam M., 2013. Maize seedling phosphorus nutrition : Allocation of remobilized seed phosphorus reserves and external phosphorus uptake to seedling roots and shoots during early growth stages. *Plant Soil* 371 : 327–338.

N'Dayegamiye A., 2007, La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la matière organique : facteur climatique et régions agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote, 17p

Ndegwa, P.M., Thompson, S.A., 2001. Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids. *Bioresource Technology*, 76 : 107–112.

Pagliari P H, Laboski C A M. 2012. Investigation of the inorganic and organic phosphorus forms in animal manure. *J Environ Qual*. 41: 901–910.

PAM, 2018. L'état de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde : renforcer la résilience face aux changements climatiques pour la sécurité alimentaire et la nutrition. 198 p

Rabenjanahary, T.H.A, 2012, Etude de l'effet de l'altitude et des dates de semis sur la phénologie et le rendement des variétés de riz pluvial : cas des sites d'Andranomanelatra et d'Ivory. Mémoire pour l'obtention de Diplômes d'Etudes Approfondies, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo-Madagascar. 69p

Rabary B.A. 2011, Impact du semis direct sous couverture végétale sur la macrofaune et la microflore des sols ferrallitiques d'Andranomanelatra, Antsirabe, Hautes Terre de Madagascar. Thèse pour l'obtention d'un diplôme de doctorat en Science de la vie

Raboin, L.-M., Ramanantsoanirina, A., Dzido, J.-L., Frouin, J., Radanielina, T., Tharreau, D., Dusserre, J., Ahmadi, N., 2013. Upland rice varieties for the highlands of Madagascar : Review of a 25-year-long breeding program. *Cahiers Agricultures* 450–458.

Rafaraso L S, Ravaomanarivo L H, Ranaivoson A, Randriamanantsoa R, Sester M. 2009, Résumé des recherches sur les bioagresseurs du riz pluvial, 47 – 53.

Raharimala S. & Audouin S. 2021. SECuRE, compte rendu synthétique des ateliers de restitution des résultats issus de l'évaluation paysanne croisée avec les indicateurs scientifiques. Rapport interne.

Rakotomanga D., Blanchart É., Rabary B., Randriamanantsoa Richard., Razafindrakoto M., Autfray P. 2016, Diversité de la macrofaune des sols cultivés sur les Hautes Terres de Madagascar. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 20 : 495-507

Rakotondramiadana F.M. 2022, Essai au champ sur la réduction de pluies en vue d’appréhender la résilience climatique du riz pluvial en transition agroécologique. Mémoire de fin d’étude pour obtenir le diplôme d’ingénieur Agronome, École Supérieure des Sciences agronomiques, Université d’Antananarivo-Madagascar. 77 p.

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

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

Randriamanantsoa R., Aberlenc H. P., Ralisoa O. B., Ratnadass A. et Vercambre B. ,2010. Les larves des Scarabaeoidea (Insecta, Coleoptera) en riziculture pluviale des régions de haute et moyenne altitudes du Centre de Madagascar. *Zoosystema* 32 : 19-72.

Ratsiatosika O.H., 2018, Vers de terre et services écosystémiques en riziculture pluviale à Madagascar. Connaissance de processus et propositions d’innovations agricole. Thèse pour l’obtention de Diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques, Université d’Antananarivo-Madagascar. 170p

Sabine J.R., 1983. Earthworms as a source of food and drugs. “Earthworms ecology: from Darwin to vermiculture” Chapman and Hall, London, 285-296.

Saint-Pierre M.A., Laverdere M.R., Page F. & côté L., 1999. Transformation de Fientes de poulets et de résidus de scieries par le lombricompostage.1 : 65-69

Schachtman D P, Reid J R, Ayling S M. 1998. Phosphorus uptake by plants : From soil to cell. *Plant Physiol.* 116 : 447–453.

Sikuzani Y.U., Ilunga G.M., Mulembo T.M., Katombe B.N., Lwalaba J.L.W., Lukangila M.A.B., Lubobo A.K., Longanza L.B., 2014. Amélioration de la qualité des sols acides de Lumbumbashi (Katanga, RD Congo) par l’application de différents niveaux de composts de fumiers de poule. *Journal of Applied Biosciences.* 77 : 6523-6533.

Su Lin Lim, Ta Yeong Wu, Pei Nie Lim and Katrina Pui Yee Shak, 2014. The use of vermicompost in organic farming : overview, effects on soil and economics, Review

- Taheri Rahimabadi, E., Ansari, M. H., Razavi Nematollahi, A., 2018.** Influence of cow manure and its vermicomposting on the improvement of grain yield and quality of rice (*Oryza sativa* L.) In field conditions, *Applied ecology and environmental research* : 97-110.
- Tittonell P. 2015** Food security and ecosystem services in a changing world: it is time for agroecology. In: *Agroecology for Food Security and Nutrition, Proceedings of the FAO International*
- Tognetti C., Laos F., Mazzarino M.J., Hernandez M.T. 2005.,** Composting VS. Vermicomposting: a comparison of end product quality. *Compost Science and & Utilization*, , Vol. 13, n° 1, pages 6-14.
- Urta, Alkorta, Garbisu, 2019.** Potential Benefits and Risks for Soil Health Derived From the Use of Organic Amendments in Agriculture. *Agronomy* 9, 542.
- Wezel A., Soboksa G., McClelland S., Delespesse F., Boissau A., 2015.** The blurred boundaries of ecological, sustainable, and agroecological intensification: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 35 : 1283–1295.
- Yachi, S., & Loreau, M., 1999.** Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: The insurance hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1463–1468.
- Yoshida S., 1981.** Mineral Nutrient of Rice : In *Fundamentals of Rice Crop Science*. IRRI, Los Banos. pp. 111- 146.
- Zaman, M. M., Chowdhury, T., Nahar, K., & Chowdhury, M. A. H., 2017.** Effect of cow dung as organic manure on the growth leaf biomass yield of *Stevia rebaudiana* and post-harvest soil fertility. *Journal of Bangladesh Agricultural University*. 206–211.
- Zamil, S. S., Quadir, Q. F., Chowdhury, M. A. H., & Wahid, A. al., 2004.** Effects of different animal manures on yield quality and nutrient uptake by mustard cv. Agrani seeds yield. *Brac University Journal*. 59–66.
- Zapats F., Roy R.N. 2004.** Le phosphore dans le système sol-plante. Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable. *Bulletin FAO Engrais et nutrition végétale*.
- Zeng, W., Wang, D., Wu, Z., He, L., Luo, Z., & Yang, J., 2021.** Recovery of nitrogen and phosphorus fertilizer from pig farm biogas slurry and incinerated chicken manure fly ash. *Science of the Total Environment*, 11 p.

Liste des annexes

Annexe 1 : Caractéristiques des sols imerintsiatosika.....	ix
Annexe 2 : Donnée pluviométrique du site expérimental (Imerintsiatosika).....	x
Annexe 3 : Fiche varietale du riz Chhomrong Dhan.....	xiii
Annexe 4 : Historiques de l'ensemble des parcelles	xiv
Annexe 5 : Historique parcelle Innov'Earth.....	xvi
Annexe 6 : Localisation des mesures sur la parcelle (monolithes/ carré de rendement, hauteur et talle).....	xvii
Annexe 7 : Clichés de certaines parcelles b1 attaques par les vers blancs.....	xix
Annexe 8 : Valeur de l'indice de shannon et de l'équitabilité.....	xx
Annexe 9 : Indicateurs agronomiques et écologiques	xxi
Annexe 10 : Résultats des tests statistiques.....	xxii

ANNEXE 1 : CARACTÉRISTIQUES DES SOLS IMERINTSIATOSIKA

Tableau 7 : Caractéristiques des sols de l'Imeritsiatosika (*Source* : Raminoarison, 2021)

Paramètres du sol	Unité	Valeur
Éléments		
C total	g kg-1	29,2
N total	g kg-1	2,07
P total	g kg-1	1,43
pH eau		4,70
pH KCl		4,09
CEC	cmol+ kg-1	1,73
Ca échangeable	cmol+ kg-1	0,42
K échangeable	cmol+ kg-1	0,06
Mg échangeable	cmol+ kg-1	0,15
Al échangeable	cmol+ kg-1	0,59
P Olsen	mg kg-1	3,76
P resine	mg kg-1	0,47
Pi_NaOH a	mg kg-1	53,60
P total_NaOH a	mg kg-1	196,90
P à_NaOH a	mg kg-1	143,33
Argile + limon fin	%	71,3
Limon grossier	%	15,3
Sable fin	%	8,60
Sable grossier	%	4,60
Fe2O3	%	31,43
Al2O3	%	28,13
SiO2	%	10,00
TiO2	%	6,00
MgO	%	0,08
P2O5	%	0,30
MnO	%	0,08
K2O	%	0,04
CaO	%	0,02
Autres	%	0,29
Kaolinite	mg kg-1	112,48
Gibbsite	mg kg-1	201,26
Fe2O3	mg kg-1	29,10

**ANNEXE 2 : DONNÉE PLUVIOMÉTRIQUE DU SITE EXPÉRIMENTAL
(Imerintsiatosika)**

Tableau 8 : Données pluviométriques du site (du 16 octobre 2022 au 13 mai 2023)

Mois	Date de prélèvement	Stade phénologique		Quantité (mm)	Précipitation mensuelle (mm)
		D1	D2		
Octobre	16/10/2022			3	43
	28/10/2022			40	
Novembre	03/11/2022			9	108
	04/11/2022			17	
	09/11/2022			3	
	17/11/2022			17	
	22/11/2022			2	
	23/11/2022	Semis		8	
	28/11/2022			19	
	29/11/2022			8	
	30/11/2022			25	
	Décembre	03/12/2022			
04/12/2022				11	
11/12/2022				3	
16/12/2022				8	
17/12/2022				6	
18/12/2022		Levée		4	
19/12/2022				27	
20/12/2022			Semis	29	
21/12/2022			7		

	25/12/2022		8	
	26/12/2022		90	
	30/12/2022		3	
Janvier	01/01/2023		10	411
	02/01/2023		4	
	03/01/2023		7	
	04/01/2023		62	
	10/01/2023		22	
	11/01/2023		15	
	12/01/2023	Levée	47	
	13/01/2023		20	
	23/01/2023		105	
	27/01/2023		85	
	31/01/2023		34	
		Tallage		
Février	01/02/2023		14	127
	04/02/2023		34	
	16/02/2023		54	
	21/02/2023	Initiation paniculaire	14	
	28/02/2023		11	
Mars	03/03/2023	Tallage	19	167
	04/03/2023		20	
	05/03/2023	Floraison et épiaison	20	
	06/03/2023	à (50% de floraison)	4	
	07/03/2023		2	
	09/03/2023	Initiation paniculaire	20	
	10/03/2023		7	

	12/03/2023		4	
	13/03/2023		2	
	15/03/2023		8	
	18/03/2023		1	
	19/03/2023		3	
	27/03/2023		15	
	29/03/2023	Floraison et épiaison (à 50% de floraison)	5	
	30/03/2023		37	
Avril	01/04/2023		35	100
	03/04/2023	Remplissage des grains et maturation	1	
	04/04/2023		1	
	06/04/2023		6	
	10/04/2023	Remplissage des grains et maturation	9	
	15/04/2023		48	
Mai	13/05/2023		27	27

Annexe 3 : FICHE VARIETATLE DU RIZ CHHOMRONG DHAN

Fiche Technique de riz pluvial

Variété : Chhomrong Dhan

Identifiée par : FOFIFA / CIRAD
 Année d'inscription : 1995
 Origine géographique : Népal
 Structure génétique : variété locale
 N° catalogue FOFIFA : 4368 N° catalogue gervex/Cirad

Caractéristiques d'Adaptation

Groupe morphologique	<i>O. sativa ssp japonica</i>
Cycle semis-floraison	130 jours (Moyenne à 1650 m d'altitude)
Cycle semis-maturité	165 jours (Moyenne à 1650 m d'altitude)
Aire de culture	1000 - 1800 m
Vocation culturale	pluviale

Points forts :

- adaptation à la très haute altitude
- résistance aux maladies
- productivité
- tallage
- aspect sanitaire du grain

Points faibles :

- sensible à la verse
- sensible au stress hydrique avec apparition de « panicules blanches »



CHH

Caractéristiques Végétatives

Hauteur moyenne de la plante	109 cm
Aptitude au tallage	très bonne
Port de la plante	ouvert
Longueur et largeur des feuilles	24 cm * 1,3 cm
Exertion paniculaire	excellente
Longueur de la panicule	19 cm

Caractéristiques Agronomiques

Verse	sensible
Egrenage	moyennement résistante
Pyriculariose du cou	tolérante
Pyriculariose foliaire	tolérante
Résistance au froid (% épillets fertiles)	bonne (85%)
Rendement maximum observé en essai	6,4 t/ha
Rendement moyen observé en essai	5,3 t/ha



Caractéristiques des Graines

Aristation	aristulée
Couleur de l'apex	violet foncé
Couleur des glumelles	bicolore (jaune/rouge)
Pilosité des glumelles	très faible
Poids de 1000 grains	26 g
Type de grain	demi-ronde
Couleur de péricarpe	rouge
Longueur du grain vêtu	7,4 mm
Largeur du grain vêtu	3,1 mm
Translucidité	bonne
Appréciation du goût	très bonne



Annexe 4 : HISTORIQUES DE L'ENSEMBLE DES PARCELLES

SFR	Constituants		Types	Pratique	Inoculation							
					Année 1 (2017-2018)	Année 2 (2018-2019)	(VDT + MYC) Année 2 (2018-2019)	Année 3 (2019-2020)	Année 4 (2020-2021)	Année 5 (2021-2022)		
SFR 1	Poudrette de parc (3 t MS/ha)		MO seul	Paysanne	Riz	Riz	Non	Riz	Voandzou	Riz		
SFR 2	Fumier traditionnel (3 t MS/ha)		MO seul	Paysanne	Riz	Riz	Non	Riz	Voandzou	Riz		
SFR 3	Fumier traditionnel (3 t MS/ha)	NPK 11-22-16 (40 kg/ha)	MO seul + FM	Paysanne	Riz	Riz	Non	Riz	Riz	Riz		
SFR 4	Fumier traditionnel (6 t MS/ha)		MO seul	Scientifique	Riz	Riz	Oui	Riz	Voandzou	Riz		
SFR 5	Fumier amélioré (6 t MS/ha)		MO seul	Scientifique	Riz	Riz	Oui	Riz	Voandzou	Riz		
SFR 6	Compost (6 t MS/ha)		MO seul	Scientifique	Riz	Riz	Oui	Riz	Voandzou	Riz		
SFR 7	Lombricompost (6 t MS/ha)		MO seul	Scientifique	Riz	Riz	Oui	Riz	Voandzou	Riz		
SFR 8	NPK 11-22-16 (100 kg /ha)	Urée (100 kg /ha)	FM adéquate	Contrôle positif	Riz	Riz	Non	Riz	Voandzou	Riz		
SFR 9	Fumier traditionnel (6 t MS/ha)	Dolomie (500 kg/ha)	MO seul + MM	Scientifique	Riz	Riz	Oui	Riz	Voandzou	Riz		
SFR 10	Fumier traditionnel (6 t MS/ha)	Cendre (500 kg/ha)	MO seul + MM	Scientifique	Riz	Riz	Oui	Riz	Voandzou	Riz		
SFR 11	Fumier traditionnel (6 t MS/ha)	Prochimad (500 kg/ha)	MO seul + MM	Scientifique	Riz	Riz	Oui	Riz	Voandzou	Riz		
SFR 12	Fumier traditionnel (2 t MS/ha)	Compost (2 t MS/ha)	Lombricompost (2 t MS/ha)	MO mélange	Scientifique	Riz	Riz	Oui	Riz	Voandzou	Riz	
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	Riz	Riz	Oui	Riz	Voandzou	Riz
SFR 14	Fumier traditionnel (2 t MS/ha)	Compost (2 t MS/ha)	Lombricompost (2 t MS/ha)	Prochimad (500 kg/ha)	MO mélange + MM	Scientifique	Riz	Riz	Oui	Riz	Voandzou	Riz

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	Riz	Riz	Oui	Riz	Voandzou	Riz
SFR 16	Aucune fertilisation				Rien	Contrôle négatif	Riz	Riz	Non	Riz	Voandzou	Riz
SFR 17	Fumier de porc (3 t MS/ha)	Cendre de riz (500 kg/ha)			MO seul + MM	Paysanne	Rien	Riz	Non	Riz	Riz	Riz
SFR 18	Fumier traditionnel (18 t MS/ha)				MO seul haut apport	Scientifique	Rien	Riz	Non	Riz	Riz	Riz
SFR 19	Fumier traditionnel (6 t MS/ha)	Compost (6 t MS/ha)	Lombricompost (6 t MS/ha)		MO mélange haut apport	Scientifique	Rien	Riz	Non	Riz	Riz	Riz
SFR 20	Fumier traditionnel (6 t MS/ha) fractionnés en 3 fois (2 t MS/ha * 3)				MO seul fractionné	Scientifique	Rien	Riz	Non	Riz	Voandzou	Riz
SFR 21	NPK 11-22-16 (100 kg /ha)	Urée (100 kg /ha)			FM adéquate	Traitement traceur SFR 8	Rien	Riz	Non	Riz	Voandzou	Riz
SFR 22	Fumier traditionnel (18 t MS/ha) mulch				MO seul haut apport mulch	Scientifique	Rien	Riz	Non	Riz	Voandzou	Riz
SFR 23	Fumier traditionnel (6 t MS/ha)	Farine de crabe (500 kg/ha)			MO seul + MM	Scientifique	Rien	Riz	Non	Riz	Voandzou	Riz
SFR 24	Fumier traditionnel (2 t MS/ha)	Compost (2 t MS/ha)	Lombricompost (2 t MS/ha)	Fiente de volailles (500 kg/ha)	MO mélange	Scientifique	Rien	Riz	Non	Riz	Riz	Riz
SFR 25	Fumier traditionnel (2 t MS/ha en haut)	Lombricompost (2 t MS/ha au milieu)	Compost (2 t MS/ha en bas)		MO mélange en couche	Scientifique	Rien	Riz	Non	Riz	Voandzou	Riz

ANNEXE 5 : HISTORIQUE PARCELLE INNOV'EARTH

SFR	Bloc	Année 1 (2017-2018)	Année 2 (2018-2019)	Année 4 (2020-2021)	Année 5 (2021-2022)	Inoculation VDT Année 5 (2021-2022)	Nouveaux noms des SFR Année 5
SFR 1	B1	PP3	PP3	Voandzou	Lombricompost	Oui	SFR 31
SFR 1	B2	PP3	PP3	Voandzou	Lombricompost	Non	SFR 32
SFR 1	B3	PP3	PP3	Voandzou	Lombricompost	Oui	SFR 31
SFR 1	B4	PP3	PP3	Voandzou	Lombricompost	Non	SFR 32
SFR 21	B1	Rien	NPK_U	Voandzou	Lombricompost	Oui	SFR 33
SFR 21	B2	Rien	NPK_U	Voandzou	Lombricompost	Oui	SFR 33
SFR 21	B3	Rien	NPK_U	Voandzou	Lombricompost	Non	SFR 34
SFR 21	B4	Rien	NPK_U	Voandzou	Lombricompost	Non	SFR 34
SFR 23	B1	Rien	FT_FC	Voandzou	Lombricompost	Non	SFR 36
SFR 23	B2	Rien	FT_FC	Voandzou	Lombricompost	Oui	SFR 35
SFR 23	B3	Rien	FT_FC	Voandzou	Lombricompost	Non	SFR 36
SFR 23	B4	Rien	FT_FC	Voandzou	Lombricompost	Oui	SFR 35
SFR 25	B1	Rien	FTCoLo_Cou	Voandzou	Lombricompost	Oui	SFR 37
SFR 25	B2	Rien	FTCoLo_Cou	Voandzou	Lombricompost	Oui	SFR 37
SFR 25	B3	Rien	FTCoLo_Cou	Voandzou	Lombricompost	Non	SFR 38
SFR 25	B4	Rien	FTCoLo_Cou	Voandzou	Lombricompost	Non	SFR 38

ANNEXE 6 : LOCALISATION DES MESURES SUR LA PARCELLE (monolithes/ carré de rendement, hauteur et taille)

- Monolithes

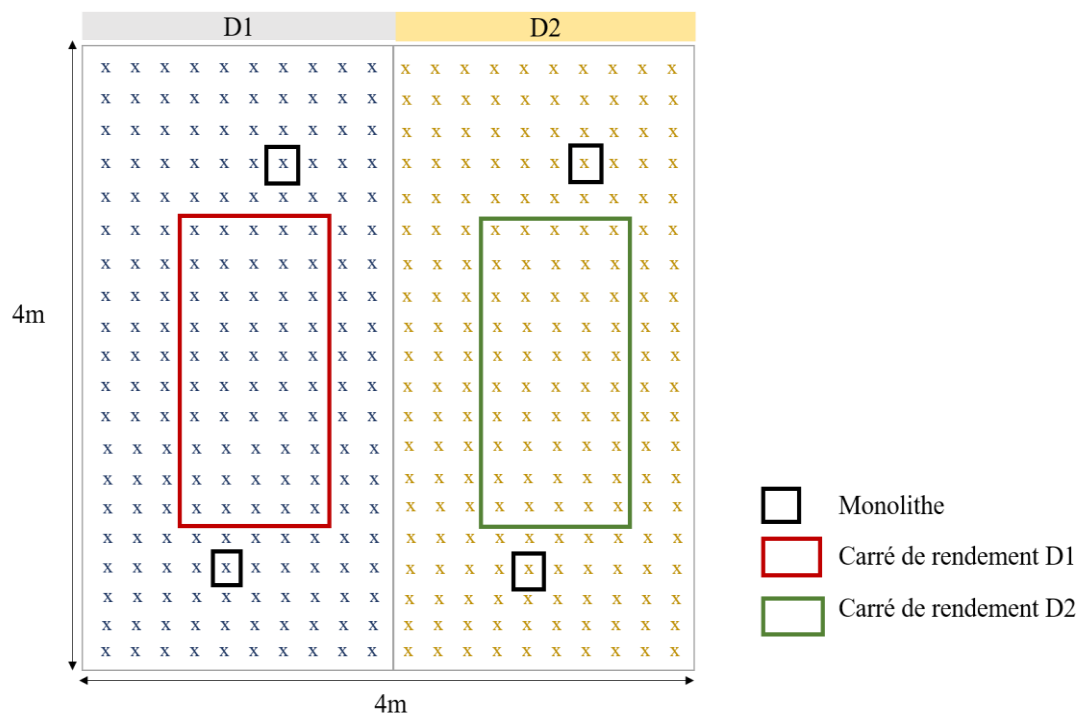


Figure 24 : Localisation des monolithes



Cliché 1 : Les différentes étapes pour le prélèvement des monolithes

Quatre poquets ont été sélectionnés pour chaque traitement comme le montre la figure 6 dont deux ont été prélevés sur D1 et les deux autres sur D2. Les macrofaunes ont été prélevées sur l'un des monolithes parmi les quatre et pour chaque monolithe on a échantillonné les biomasses aériennes ainsi que racinaires.

- Hauteur et nombre de talles

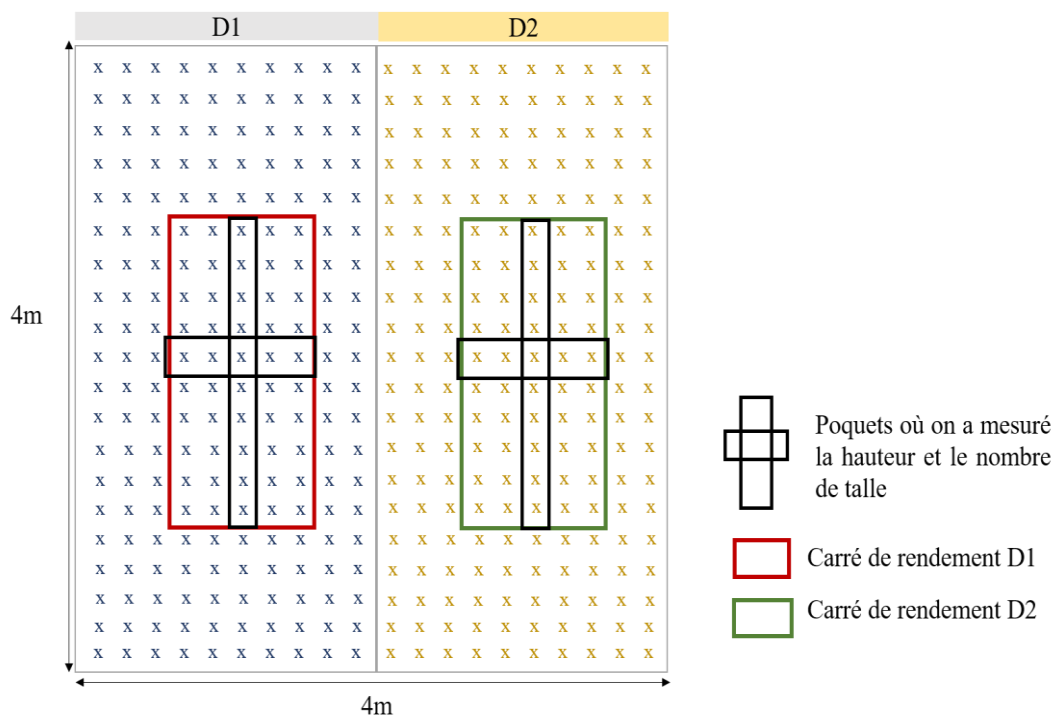


Figure 25 : Localisation de la mesure des hauteurs et nombre de talles

Vingt-huit poquets ont été sélectionnés pour la mesure des paramètres de la croissance du riz (hauteur et nombre de talles) dont quatorze sur D1 et quatorze sur D2 et cela pour chaque traitement. Tous ces poquets se situent tous dans le carré de rendement dont la dixième ligne ainsi que la sixième colonne.



Cliché 2 : Mesure de la Hauteur au stade de début tallage et pendant la récolte

**ANNEXE 7 : CLICHES DE CERTAINES PARCELLES B1 ATTAQUES PAR LES VERS
BLANCS**



SFR2 B1



SFR3 B1



SFR6 B1



SFR 12 B1



SFR 13 B1



SFR 37 B1



SFR17



SFR19



SFR24

Cliché 3 : Exemple des pratiques SFR montrant l'attaque des vers blancs sur D1

ANNEXE 8 : VALEUR DE L'INDICE DE SHANNON ET DE L'ÉQUITABILITÉ

Tableau 9 : Moyenne et écart type de l'indice de Shannon et de l'équitabilité pour chaque traitement

SFR	Indice de Shannon	Équitabilité
SFR_2	0,74 ± 0,32	0,31 ± 0,07
SFR_3	1,21 ± 0,37	0,28 ± 0,03
SFR_4	0,50 ± 0,60	0,15 ± 0,14
SFR_5	0,91 ± 0,02	0,21 ± 0,01
SFR_6	1,15 ± 0,54	0,32 ± 0,04
SFR_7	0,65 ± 0,26	0,27 ± 0,04
SFR_8	0,42 ± 0,73	0,10 ± 0,18
SFR_9	0,81 ± 0,38	0,26 ± 0,04
SFR_10	1,22 ± 0,28	0,28 ± 0,02
SFR_11	1,24 ± 0,18	0,29 ± 0,07
SFR_12	1,38 ± 0,19	0,29 ± 0,01
SFR_13	1,24 ± 0,18	0,31 ± 0,04
SFR_14	1,14 ± 0,38	0,28 ± 0,05
SFR_15	0,81 ± 0,45	0,28 ± 0,12
SFR_16	0,39 ± 0,35	0,2 ± 0,18
SFR_17	0,75 ± 0,36	0,16 ± 0,08
SFR_18	0,96 ± 0,44	0,25 ± 0,06
SFR_19	0,83 ± 0,20	0,26 ± 0,06
SFR_20	0,87 ± 0,75	0,17 ± 0,15
SFR_22	0,68 ± 0,19	0,22 ± 0,06
SFR_24	0,92 ± 0,21	0,31 ± 0,05
SFR_31-33	1,11 ± 0,13	0,3 ± 0,05
SFR_32-34	1,33 ± 0,08	0,3 ± 0,02
SFR_35-37	1,02 ± 0,27	0,3 ± 0,03
SFR_36-38	1,24 ± 0,11	0,29 ± 0,02

ANNEXE 9 : INDICATEURS AGRONOMIQUES ET ECOLOGIQUES

Tableau 10 : Indicateurs agronomiques pour D1 et D2 et indicateurs écologiques

SFR	Indicateurs agronomiques		Indicateurs écologiques
	D1	D2	ECO
SFR2	5.32	5.56	2.82
SFR3	6.87	6.52	4.21
SFR4	6.82	6.55	2.51
SFR5	5.60	5.77	7.66
SFR6	6.84	6.90	3.65
SFR7	6.76	7.27	3.40
SFR8	0.71	1.95	0.33
SFR9	6.23	3.86	4.88
SFR10	5.54	5.91	6.15
SFR11	4.68	4.18	5.98
SFR12	6.85	6.86	5.73
SFR13	7.80	6.95	5.21
SFR14	6.34	4.58	6.33
SFR15	5.27	3.66	4.80
SFR16	0.13	0.00	1.11
SFR17	3.15	4.35	6.95
SFR18	9.61	7.66	6.29
SFR19	7.66	7.34	5.68
SFR20	7.09	6.71	4.89
SFR22	6.86	7.55	6.05
SFR24	3.79	3.44	5.80
SFR31-33	6.90	7.83	6.77
SFR32-34	9.80	9.65	6.83
SFR35-37	7.15	6.93	7.62
SFR36-38	8.05	9.09	6.85

ANNEXE 10 : RÉSULTATS DES TESTS STATISTIQUES

Tableau 11 : Résultats des analyses statistiques

Variables étudiées		P value			
		Pratiques SFR	Date de semis	Interaction (SFR*Date de semis)	Delta (D2- D1)/D1)*100
PARAMETRES AGRONOMIQUES					
Nombre de talles	Début de tallage	0.115	0.825	0.990	0.819
	Fin de tallage	8.092e-07 ***	0.07	0.74	0.643
Hauteur	Début de tallage	0.000185 ***	0.008 **	0.790	0.507
	Fin de tallage	2.75e-05 ***	4.34e-08 ***	0.401	0.267
Floraison		2.77e-05 ***	0.001 ***	0.155	0.135
Rendement en grain		7.03e-07 ***	2.45e-07 ***	0.364	0.487
Pourcentage en grain plein		0.002 **	0.435	0.989	0.098
Rendement en paille		1.41e-05 ***	0.541	0.862	0.233
Rendement total (grain + paille)		2.33e-06 ***	0.006 **	0.909	0.322
Phosphore grain		3.56e-08 ***	0.001 ***	0.009 **	1.853e-13 ***
PARAMETRES ECOLOGIQUES					
pH	0 – 10 cm	< 2.2e-16 ***	-	-	-
	10 – 20 cm	7.66e-13 ***	-	-	-
Phosphore résine		7.89e-14 ***	-	-	-
Densité de vers de terre	0 – 10 cm	0.00256 **	-	-	-
	10 – 20 cm	8.55e-09 ***	-	-	-
Biomasse de verre de terre	0 – 10 cm	0.011 *	-	-	-
	10 – 20 cm	0.0002 ***	-	-	-
Densité en macrofaune	0 – 10 cm	0.005 **	-	-	-
	10 – 20 cm	0.014*	-	-	-
Biomasse en macrofaune	0 – 10 cm	0.109	-	-	-
	10 – 20 cm	1.04e-07 ***	-	-	-
Indice de Shannon		0.053	-	-	-
Equitabilité		0.147	-	-	-

Significations codes : 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '**' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

ANOVA : Noir, MODELE MIXTE : Vert, KRUSKAL : Violet, PERMANOVA : Bleu

Corrélation entre les paramètres agronomiques et écologiques du sol (ACP)

Graphes des individus

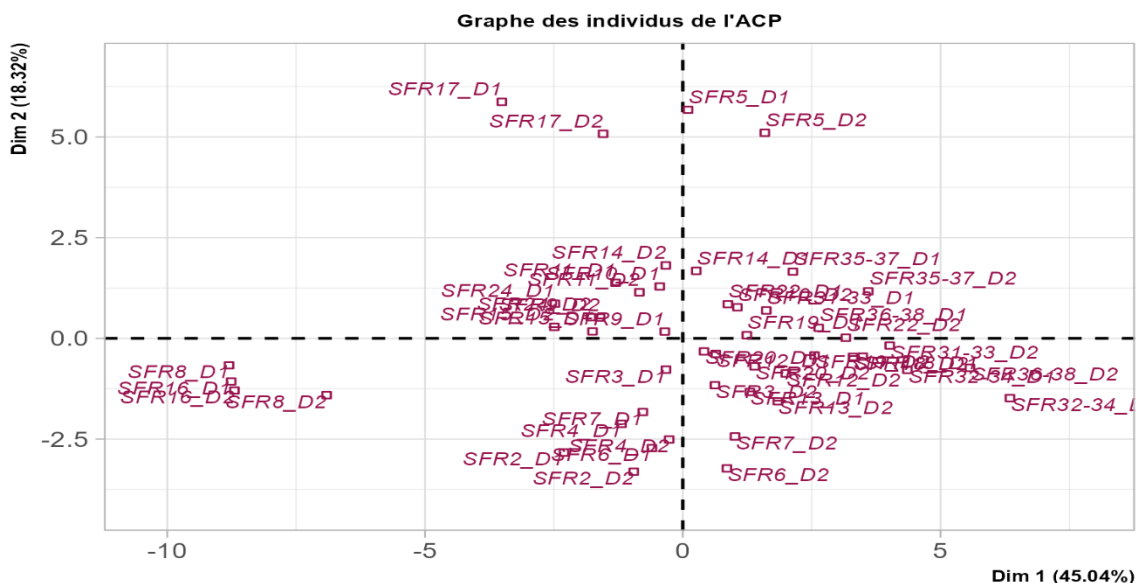
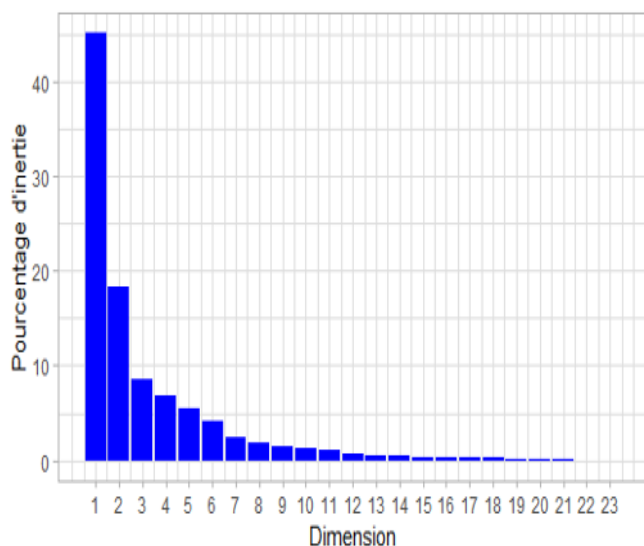


Figure 26 : Les différents modalités pour la corrélation entre les paramètres agronomiques du riz et écologiques du sol pour les deux dates de semis D1 et D2

Pourcentage des axes

D1 ET D2



DELTA

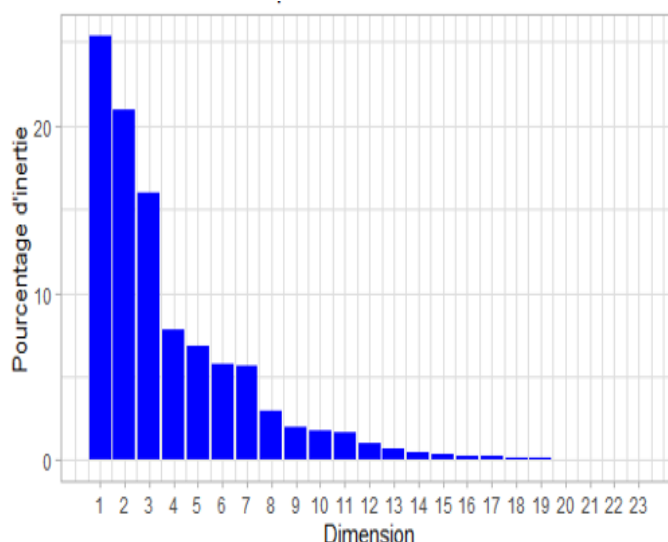


Figure 27 : Dimensions des axes

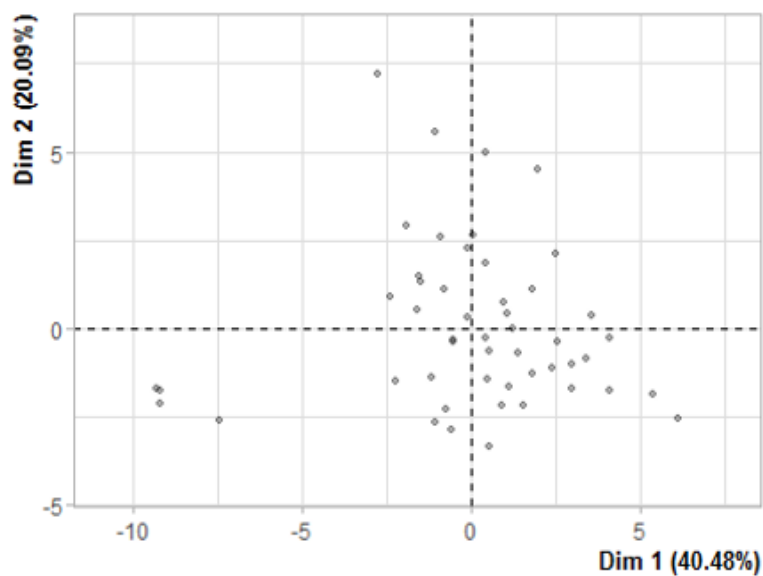


Figure 28 : Graphes des individus avant correction, mise en évidence des trois individus

Analyse en Composantes principales incluant les attaques des vers blancs pour trois stades phénologiques (fin de levée, tallage et montaison)