



Institut Supérieur en Sciences de
l'Environnement et de Gestion

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU

DIPLOME DE LICENCE PROFESSIONNELLE EN ENVIRONNEMENT

**EFFET DES GENOTYPES DE RIZ PLUVIAL SUR
L'ATTRACTIVITE ET LA CROISSANCE
DES NEMATODES BACTERIVORES DES SOLS**



Présenté par : RAHAJAHARILAZA Koloïna

Option : Environnement

Décembre 2015



Institut Supérieur en Sciences de
l'Environnement et de Gestion

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU

DIPLOME DE LICENCE PROFESSIONNELLE EN ENVIRONNEMENT

**EFFET DES GENOTYPES DE RIZ PLUVIAL SUR
L'ATTRACTIVITE ET LA CROISSANCE
DES NEMATODES BACTERIVORES DES SOLS**



Présenté par : RAHAJAHARILAZA Koloina

Encadreur pédagogique : RAKOTOSOA Harimalala Antenaina Herivola
(Enseignante de Pédologie, ISSEG)

Encadreur scientifique : Jean TRAP (Chargé de Recherche, IRD)

Option : Environnement

Décembre 2015

AVANT-PROPOS

L'Institut Supérieur en Sciences de l'Environnement et de Gestion est un institut innovant qui offre une compétence particulière dans le domaine de l'Environnement, de Gestion et récemment la psychosociologie. Les étudiants choisissent volontairement leur filière afin d'avoir chacun une spécialité. Pour achever leur troisième année d'étude, chaque étudiant doit accomplir un stage de projet et rédiger un manuscrit récapitulant le parcours de son stage et enfin d'exposer oralement en vue de l'obtention du Diplôme de Licence Professionnelle. Le succès de ses étapes lui permet alors de passer au niveau supérieur de quatrième année.

L'objectif de l'ISSEG est d'offrir aux étudiants l'opportunité exceptionnelle d'aborder d'une manière systématique et intégrative tous les aspects que les étudiants doivent maîtriser dans le milieu professionnel ; tel est son slogan : « ISSEG, La route du succès ».

REMERCIEMENTS

Nous rendons Gloire à Dieu pour sa grâce et sa bonté de nous avoir donné la force d’accomplir ce travail.

Nous remercions de tout cœur les personnes suivantes pour leurs aides, collaborations et élaboration de ce manuscrit :

- ♥ Professeur, Docteur RAKOTOARIMANANA Naly Nirina, Directeur fondateur de l’ISSEG. Que Dieu vous donne de la longévité pour pouvoir embellir encore et encore notre Institut.
- ♥ Madame RAKOTOSOA Harimalala Antenaina Herivola qui a assuré le rôle d’encadreur pédagogique, qu’elle sache que nous avons apprécié son soutien remarquable et que nous lui adressons nos respectueuses admirations.
- ♥ Docteur Jean TRAP, les mots nous manquent pour vous dire merci ! Pour nous avoir proposé ce thème intéressant et par la suite pour vos attentions et multiples conseils incessants, pour les orientations et les aides précieuses que vous nous avez fournies. Veuillez trouver ici l’expression de notre profonde gratitude.

Nous tenons également à présenter nos reconnaissances

- ♥ Au Professeur Titulaire RABEHARISOA Lilia de nous avoir permis d’effectuer ce stage au sein de son laboratoire. Et aussi à tous les personnels (administratifs, responsables de laboratoire, chercheurs, doctorants et stagiaires) au sein du LRI qui nous ont bien accueilli chaleureusement durant nos séjours et qui nous ont beaucoup aidés en cas de difficulté.
- ♥ Au corps enseignant et personnel dynamique de l’ISSEG pour leurs efforts dans la fourniture d’une formation environnementale de qualité et d’une bonne organisation.

Nos plus profondes gratitude s’adressent autant à notre famille : Papa, Maman, Petite Sœur, Grand Père et Grand-mère, Tatie, Tonton et nos petits cadets. Merci pour l’amour, l’affection et l’appui.

Sans oublier les personnes, d’une manière ou d’une autre, de loin ou de près, qui nous ont apporté une quelconque assistance ; qu’elles soient assurées de nos amitiés et de nos vives reconnaissances.

Merci à tous, Dieu vous bénisse !

Koloïna

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

ACP	:	Analyse en Composante Principale
CFB	:	Capacité à exploiter la Fertilité Biologique du sol
CFM	:	Capacité à exploiter la Fertilité Minérale du sol
CRE	:	Capacité de Rétention d'Eau du sol
FOFIFA	:	FOibe Fikarohana ampiharina amin'ny FAmpanandrosoana eny ambamanivohitra
IRD	:	Institut de Recherche pour le Développement
LRI	:	Laboratoire des RadioIsotopes
SPAD	:	Système de Production d'Altitude Durable
TSP	:	Tryptic Soy Broth (Flukaref 22092)
XLSTAT	:	Logiciel statistique

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Structures du riz	5
Figure 2 : Evolution du pourcentage d'exploitations pratiquant la riziculture pluviale en altitude à Madagascar	6
Figure 3 : Abondance totale des nématodes du sol dans 100 g de sol sec.....	7
Figure 4 : Localisation de la zone de prélèvement des sols.....	10
Figure 5: Méthodologie de travail	11
Figure 6 : Les huit variétés sélectionnées	12
Figure 7 : Lien de parenté entre les huit variétés étudiées.....	13
Figure 8 : Culture de nématodes bactérivores	14
Figure 9 : Mesure des traits phénotypiques des graines	15
Figure 10 : Méthodologie pour déterminer la capacité de rétention d'eau.....	16
Figure 11 : Protocole d'élutriation des nématodes	17
Figure 12 : Mesure des traits de croissance des variétés	18
Figure 13 : Processus de stérilisation du sol.....	19
Figure 14 : Protocole d'extraction des bactéries et des champignons.....	19
Figure 15 : Manipulation des microcosmes.....	20
Figure 16 : Echantillonnage des sols adhérents aux racines.....	21
Figure 17 : Boîte de pétri	22
Figure 18 : Test d'attractivité	22
Figure 19 : Test de croissance	23
Figure 20 : Croissance des huit variétés dans un sol natif de Lazaina	26
Figure 21 : Biomasses aériennes et racinaires des huit variétés poussant dans un sol natif.....	27
Figure 22 : (A) (B) (C) (D) biomasses et sensibilité des variétés à la défaunation du sol exprimée en ratio des biomasses racinaires.	28
Figure 23 : (A) (B) (C) (D) biomasses sensibilité des variétés à la fertilisation NPK exprimée en ratio des biomasses racinaires.....	29

Figure 24 : Cercle de corrélation des variables sur les axes 1 et 2 de l'Analyse en Composantes Principales	31
Figure 25 : Plan factoriel des individus de l'Analyse en Composante Principale.....	32
Figure 26: Test d'attractivité pour les deux variétés les plus contrastantes	32
Figure 27 Test de croissance des nématodes pour les deux variétés les plus contrastantes	33
Figure 28 : Relation entre génotype et phénotype des variétés	38

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Les deux systèmes de riziculture à Madagascar.....	5
Photo 2: Les différents types de nématodes	8
Photo 3 : Photographies de la zone d'échantillonnage à Lazaina.....	10

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classification fonctionnelle des nématodes.....	8
Tableau 2 : Critères agronomiques de sélection des huit variétés	12
Tableau 3 : Principaux traits des graines des huit variétés de riz pluvial	25
Tableau 4 : Critères de sélection des deux variétés les plus contrastantes	37

LISTE DES UNITES ET SYMBOLES

C°	:	Degré Celcius
CO₂	:	Dioxyde de carbone
g	:	Gramme
Kg	:	Kilogramme
mg	:	Milligramme
L	:	Litre
µl	:	Microlitres
N	:	Azote
P	:	Phosphore
K	:	Potassium
%	:	Pour cent

LEXIQUE

Biodisponibilité : Propriété d'une espèce chimique ou d'un élément présent dans le sol d'être plus ou moins facilement absorbé par les organismes vivants le plus souvent via la solution du sol. Un potentiel résultant de la nature des espèces chimiques présentes dans la solution du sol laquelle dépend largement des propriétés physico-chimiques et microbiologiques du milieu du sol (Aquaportail, 2007).

Epillet : inflorescence élémentaire caractéristique de la famille des Poacées (graminées), un petit épi, réduit à quelques fleurs incomplètes souvent deux ou trois (Wikipédia)

Génotype : ensemble des gènes d'un individu qui constituent son hérédité (Larousse, 2005)

Phénotype : aspect observable de l'individu, conditionné par son génotype et le milieu environnant (Larousse, 2005)

Pyriculariose : maladie fongique du riz causée par des champignons filamenteux de la famille de *Magnaporthaceae* et de la classe des *Ascomycètes*. Elle attaque plusieurs organes du riz (feuille, panicule,...) pouvant causer la perte totale de la récolte (Ribot et al, 2007)

Rhizosphère : zone du sol la plus influencée par l'activité des racines, elle est liée à la libération ou l'exsudation par les racines de composés organiques qui stimulent l'activité microbienne (Encyclopédie Encarta 2008)

Striga : *Striga hermonthica* est une espèce de plantes parasites herbacées annuelles appartenant au genre *Striga* de la famille des *Scrophulariaceae*. Un parasite dévastant des cultures importantes, en particulier le riz (*Oryza sativa*) (Encarta 2008)

Sol ferrallitique : Appelé « Ferral sol » dans la classification FAO et « Oxisol ou Ultisol » dans la classification américaine. Sols profonds, caractérisés par une décomposition très poussée des minéraux primaires, à l'exception des roches quartzieuses. Cette altération a permis la formation de la kaolinite, qui est le constituant caractéristique de ce sol (Duchaufour, 1954 ; Bourgeat et Aubert, 1971).

Tanety : Terme malgache désignant les sommets et les versant des collines aux pentes fortes, caractéristiques des Hautes-Terres Malgaches et résultant de l'altération de l'ancien plateau (Ramahandry, 2003)

RESUME

L'accroissement de la productivité rizicole à Madagascar nécessite la mise en valeur des sols ferrallitiques de Tanety et une bonne conduite de la fertilisation du sol. Dans l'objectif de l'amélioration de la disponibilité en nutriments dans le sol, une expérimentation agroécologique se basant sur l'effet de la boucle microbienne du sol réalisé par les bactéries, les nématodes bactérivores et les racines des riz pluviaux a été réalisée dans un sol ferrallitique venant de Lazaina-Antananarivo. Deux facteurs ont été étudiés (i) l'attractivité des nématodes bactérivores réalisée par les racines de différentes variétés de riz pluvial et (ii) la capacité des sols adhérents aux racines des variétés à favoriser la croissance des nématodes. Des prélèvements de sols adhérent aux racines ont été effectués au stade de début tallage. Les sols adhérents de deux variétés très contrastantes ont fait l'objet de test d'attractivité et de croissance des nématodes bactérivores du sol. Pour les plantes, les biomasses ont été évaluées. Sachant que trois conditions de culture ont été mises en place pour la croissance des huit variétés à savoir : sol natif, sol défauné et sol fertilisé de NPK. Les réponses à la défaunation ainsi que la fertilisation sont différentes selon les variétés. Des comparaisons et des classements suivant des ordres de sensibilité ont été réalisés. Les génotypes et les phénotypes des huit variétés ont été comparés suivant ses paramètres.

Mots clés : riz pluvial, nématodes bactérivores, attractivité, croissance, sol adhérent

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet INDICE (2014-2016, financement Agropolis Fondation, Montpellier, France) dont l'objectif est d'identifier les pratiques agricoles de riz pluvial des Hautes-Terres de Madagascar qui favorisent la boucle microbienne des sols. Dans cette étude, nous nous sommes attachés à caractériser la capacité de différentes variétés de riz pluvial à attirer et favoriser la croissance des nématodes bactérivores des sols. En retour, nous avons également pour objectif de mesurer l'effet d'une population de nématode bactérivores sur la nutrition et la croissance des différentes variétés de riz.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES.....	iii
LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	iv
LISTE DES UNITES ET SYMBOLES.....	v
LEXIQUE.....	vi
RESUME.....	vii
INTRODUCTION.....	1
I. ETAT DE L'ART	4
I.1. Le riz pluvial à Madagascar.....	4
I.2. Les nématodes	7
II. MATERIELS ET METHODES.....	10
II.1. Dispositif expérimental et échantillonnage du sol.....	10
II.2. Matériels biologiques	12
II.3. Phénotypage des variétés pour la sélection des 2 variétés contrastantes	14
II.4. Expérience d'attractivité et de croissance des nématodes bactérivores.....	21
III. RESULTATS	25
III.1. Phénotypage des huit variétés de riz pluvial	25
III.2. Test d'attractivité et de croissance	32
IV. DISCUSSION	34
IV.1. Relations entre génotypes et écologie des huit variétés de riz pluvial	34
IV.2. Classement des variétés à partir de l'ACP	36
IV.3. Effets des rhizosphères des deux variétés les plus contrastantes sur l'attractivité des nématodes bactérivores du sol	38
IV.4. Effet des rhizosphères des deux variétés les plus contrastante sur la croissance des nématodes bactérivores du sol	39
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	40
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	42
ANNEXE.....	Error! Bookmark not defined.
TABLE DES MATIERES.....	II

INTRODUCTION

La population mondiale ne cesse d'augmenter. Actuellement évaluée à 7 milliards d'habitants, elle atteindra environ 9 milliards en 2050. Madagascar n'échappe pas à cette règle. Avec un taux de croissance de 3%, la population malgache est estimée à 28 millions d'habitants en 2020 (U.S.Census, 2012). Cette pression démographique affecte directement la sécurité alimentaire du pays ainsi que l'intensification de la pauvreté.

Le riz est la base de l'alimentation de la population malgache. Améliorer la production rizicole est donc un enjeu majeur pour la sécurité alimentaire de Madagascar. En effet, l'accroissement de la productivité agricole devrait suivre la tendance de la croissance démographique afin que Madagascar conserve une autosuffisance alimentaire. Il est donc primordial d'intervenir dans le secteur agricole et plus précisément dans la riziculture. La riziculture irriguée est celle qui permet d'obtenir les meilleurs rendements à court terme. Néanmoins, les surfaces aménageables en riziculture irriguée sont très restreintes et saturées (Prasad et Thomas, 1982). De ce fait, l'insuffisance de la production incite les paysans à occuper les collines ou « *Tanety* » pour la culture du riz pluvial. La production de riz pluvial y reste néanmoins très faible (Razafimandimby *et al*, 2008). La raison principale de cette faible productivité des *Tanety* est la très faible fertilité minérale, en particulier l'azote (N) et le phosphore (P) des sols ferrallitiques de Madagascar.

Face à ces problèmes de fertilité, différentes techniques agronomiques ont été adoptées telle que la pratique du système de culture traditionnelle incluant la culture en jachère prolongée, la culture en rotation, la culture intercalaire et l'utilisation des engrais organiques ou minéraux pour augmenter les teneurs en nutriments. L'apport d'engrais riches en N, P et potassium (K) permet d'augmenter fortement les rendements des cultures. Mais ces engrais sont très coûteux, et peu d'agriculteurs ont les moyens de s'en procurer. Il apparaît donc urgent de proposer d'autres solutions agronomiques qui ne reposent pas, ou peu, sur l'utilisation d'engrais. L'agro-écologie qui consiste à intensifier les processus écologiques pour une agriculture durable serait une solution adéquate

L'agro-écologie est une nouvelle technique d'agriculture innovante permettant de concilier l'impératif de rentabilité économique avec la préservation de l'environnement. Elle tend à soutenir la fertilité du sol et d'accroître son rendement. La méthode est d'autant plus innovante qu'elle n'implique aucun labour ni engrais, et participe à la réduction des émissions de gaz carbonique par la fixation du carbone dans le sol. Les sols ferrallitiques des Hautes-Terres malgaches sont peu fertiles. Dans ces sols, l'azote (N) et le phosphore (P) sont les

premiers nutriments limitant les rendements. Par exemple, de nombreuses études ont illustré des gains importants de productivité en incluant des apports de P dans des systèmes de culture à Madagascar (Rabeharisoa, 2007). L'enjeu est donc de lutter contre l'appauvrissement de la fertilité minérale des sols ferrallitiques à travers une agriculture qui s'appuie sur des techniques agro-écologiques notamment en valorisant les processus écologiques directement liés à la fertilité des sols. La maîtrise de la fertilité minérale des sols, via l'intensification des processus naturellement présents dans les sols qui favorisent la disponibilité des nutriments pour la plante cultivée, est donc un des principaux enjeux de la réussite de la riziculture pluviale.

La disponibilité des nutriments pour les plantes est en partie sous le contrôle de transformations chimiques assurées par les organismes des sols. En effet, il ne faut pas oublier que les sols hébergent une grande richesse biologique. Une cuillère à café de sol peut contenir des millions de bactéries, des mètres d'hyphes fongiques, des centaines de protistes et des dizaines d'animaux microscopiques, tels que les nématodes, les tardigrades ou les rotifères. Les sols hébergent également des organismes de plus grande taille, comme les acariens, les collemboles, les insectes ou les vers de terre. Tous ces organismes, via leur activité, assurent un grand nombre de fonctions des sols (décomposition et fragmentation de la matière organique, bioturbation, minéralisation, dépolymérisation, respiration, etc.) directement impliquées dans la fertilité minérale des sols. Parmi ces fonctions, la « boucle microbienne » est aujourd'hui reconnue comme un processus écologique majeur permettant d'augmenter la disponibilité des nutriments pour les plantes.

En 1985, Marianne Clarholm observe l'effet positif des interactions biologiques dans le sol sur la nutrition du blé. Elle décrit ce phénomène écologique et le nomme : **la boucle microbienne du sol**. Ce phénomène écologique complexe se produit dans la rhizosphère et impacte fortement le fonctionnement de l'écosystème. Plus précisément, ce processus correspond à la capacité des bactérivores (prédateur de bactéries) du sol (les protistes et les nématodes) d'augmenter la disponibilité des nutriments pour les plantes en libérant les nutriments bloqués dans la biomasse microbienne du sol. Cette libération de nutriment phyto-disponibles a lieu proche des racines car il s'agit de l'habitat où vivent les bactérivores. Le rôle majeur de la boucle microbienne repose donc sur le fait que les nouvelles populations de bactéries présentes dans la rhizosphère des plantes immobilisent les éléments minéraux qui ne sont plus accessibles aux plantes, en particulier le N et le P. Ces éléments sont ensuite rendus disponibles par les bactérivores (Clarholm, 2005; Kuikman *et al.*, 1991). Du fait de leur abondance dans la rhizosphère, les nématodes bactérivores pourraient jouer un rôle important

dans la boucle microbienne (Ritz and Trudgill, 1999; Bonkowski et al., 2009; Villenave et al., 2004).

Néanmoins, les effets varient en fonction des plantes (Trap et al., 2015). De plus, même si des effets positifs des bactérivores ont été observés chez le riz, le choix de la variété utilisé par les expérimentateurs apparaît important (Somasundaram et al., 2008). En effet, toutes les variétés de riz ne répondent pas (en termes de gain de biomasse et de nutrition), de manière équivalente à la présence de bactérivores. Ainsi, la capacité des racines des plantes à attirer et à favoriser la croissance des bactérivores varie et peut donc potentiellement favoriser ou non la boucle microbienne.

Les questions de recherche formulées dans cette étude sont les suivantes :

- (1) Les variétés de riz pluvial sélectionnées par les agronomes sont-elles capables d'attirer les nématodes bactérivores des sols ?
- (2) Est-ce que la rhizosphère des différentes variétés du riz favorise la croissance des populations de nématodes bactérivores ?

L'objectif du stage est donc de mesurer : (1) l'attractivité des nématodes bactérivores réalisée par les racines de différentes variétés de riz pluvial ; (2) la capacité des sols qui adhèrent aux racines des variétés à favoriser la croissance des nématodes bactérivores.

Deux hypothèses sont ainsi formulées :

H1 : L'attractivité des nématodes bactérivores varie selon les variétés de riz pluvial

H2 : Les nématodes bactérivores favorisent la croissance de certaines variétés de riz pluvial

Les contraintes inhérentes à la durée du stage nous ont incités à proposer une méthodologie différente de celle initialement envisagée. En effet, tester au laboratoire l'effet de l'ensemble des variétés sur l'attractivité et la croissance des nématodes exige beaucoup de temps. Par conséquent, les travaux sont répartis en deux étapes : la première partie s'attache au phénotypage de huit variétés de riz pour sélectionner deux variétés contrastantes au regard d'un certain nombre de traits phénotypiques, utilisées pour la seconde partie. Cette dernière est consacrée aux expériences en microcosmes d'attractivité et de croissance des nématodes au laboratoire pour ces deux variétés. Ce manuscrit comporte quatre parties principales : la première partie est constituée d'un **état de l'art bibliographique** qui rappellera nos connaissances actuelles sur le riz pluvial ainsi que sur les nématodes bactérivores. La deuxième partie abordera **les matériels et les méthodes** utilisés pour répondre aux questions de recherche formulées dans l'étude. **Les résultats** obtenus seront présentés dans la troisième partie et **discutés** dans la dernière partie. **Une conclusion générale** terminera le rapport.

I. ETAT DE L'ART

I.1. Le riz pluvial à Madagascar

I.1.1. Description et caractéristique

Le riz est une céréale appartenant à la famille des graminées, à la classe des Monocotylédones et au genre *Oryza*. Ce genre *Oryza* comprend de nombreuses espèces sauvages et deux espèces cultivées : *Oryza glaberrima*, originaire d'Afrique et *Oryza sativa*, originaire d'Asie. Ce dernier est largement diffusé à Madagascar d'où notre étude se focalise sur ce genre.

La classification de l'*Oryza sativa* est comme suit :

Règne	: Végétal
Embranchement	: Spermaphytes
Sous-embranchement	: Angiospermes
Classe	: Monocotylédone
Sous classe	: Commelinidae
Ordre	: Cyperales
Famille	: Poaceae
Sous-famille	: Pooidea
Genre	: <i>Oryza</i>
Espèce	: <i>Oryza sativa</i>

Morphologiquement, un plant de riz est constitué de racines fasciculées et des tiges aériennes ou des talles productives. Les feuilles sont linéaires, à nervations parallèles, engainantes enveloppant la tige avant de s'étaler en limbe. L'inflorescence est formée par l'ensemble de tous les épillets qui sont oblongs (allongés). L'épillet comprend deux glumes réduites en un simple bourrelet au sommet du pédicelle, un rachéole et deux ou trois fleurs (Bossert, 1969). Les panicules sont de 15 à 40 cm de long, à rameaux penchés à maturité. Les graines sont aristées suivant les variétés, de couleur jaunes ou orangés ou parfois teintées de noir. Elle est formée par le caryopse oblong de 8 à 15 mm de long qui comporte trois parties : le tégument, l'albumen, l'embryon (Legendre, 1935 ; Bossert, 1969). Les structures de riz sont détaillées dans la Figure 1.

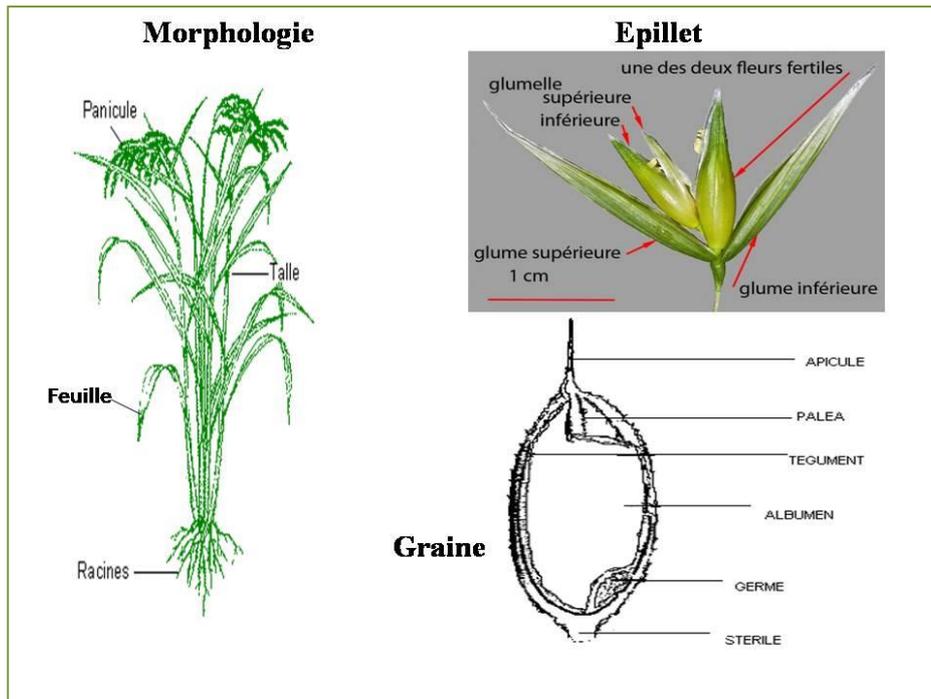


Figure 1 : Structures du riz (Legendre, 1935 ; Bosser, 1969)

I.1.2. Systèmes de riziculture à Madagascar

L'une des caractéristiques les plus originales du riz est son aptitude à être cultivé dans des conditions de milieu très diverses, en particulier du point de vue de son alimentation hydrique. Nous distinguons deux types de riziculture à Madagascar : la riziculture irriguée et la riziculture pluviale. La riziculture avec submersion est fonction de la maîtrise ou non de l'eau.

Riziculture irriguée



Riziculture irriguée à Sahambavy,,
Fianarantsoa

Riziculture pluviale



Culture de *Nerica 4* à Ankazomiriotra
Betafo

Photo 1 : Les deux systèmes de riziculture à Madagascar (Frédéric B., 2005 et Ricehub)

La présente étude porte sur la riziculture pluviale. C'est une culture de riz sans irrigation mais alimentée en eau de pluie ou par la nappe phréatique. A Madagascar, la superficie rizicole totale est de 1.330.000 hectares dont environ 20 % est en système pluvial et le rendement moyen est de 2 t/ha (MAEP, 2005). Le riz pluvial à Madagascar est généralement cultivé sur des terrains plats, légèrement onduleux et même sur des pentes de plus de 30% ne présentant pas d'accumulation d'eau superficielle. La majeure partie du riz pluvial est cultivée sur des sols argileux acides (Ultisols, Oxisols) et infertiles des *Tanety* (sols ferrallitiques), sur des versants des collines très sujets à l'érosion et ce particulièrement avec la pratique du labour (Pande, 1997). Les systèmes de culture sous couverture végétale (SCV) peuvent limiter l'érosion et préserver la fertilité des sols. Le graphe suivant illustre l'évolution des exploitants pratiquant la riziculture pluviale en altitude à Madagascar.

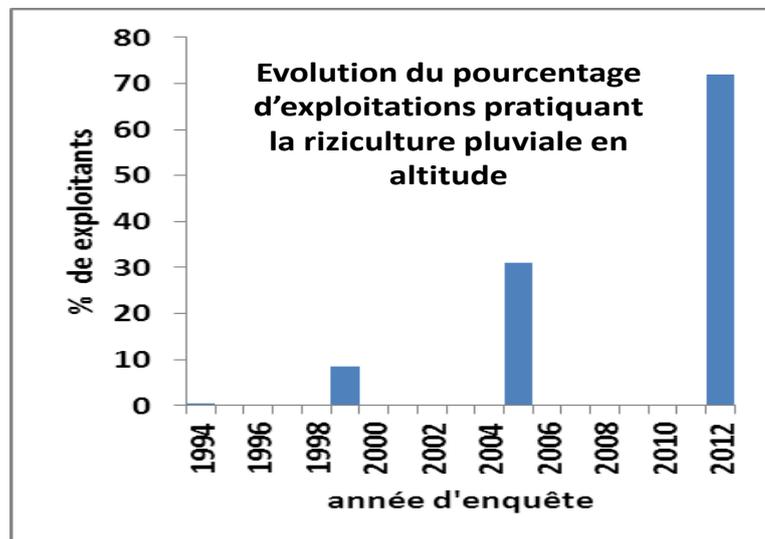


Figure 2 : Evolution du pourcentage d'exploitations pratiquant la riziculture pluviale en altitude à Madagascar (DP SPAD Antsirabe)

Le développement du riz pluvial à Madagascar est surtout lié à la pression démographique et à la rareté des terres aménageables pour la riziculture aquatique. La diffusion de nouvelles variétés adaptées à l'altitude et au froid a permis l'expansion de cette agriculture sur les Hautes-Terres de Madagascar. Elle est également en plein essor dans le Moyen Ouest malgache car les conditions de son développement y sont plus favorables.

I.2. Les nématodes

I.2.1. Morphologie et reproduction

Les nématodes sont des vers ronds microscopiques dont la majorité des espèces sont invisibles à l'œil nu. Les nématodes sont des organismes multicellulaires, non segmenté, bilatéralement symétriques et ont un système nerveux simple, un système digestif complet et aucun système respiratoire ni circulatoire. Les nématodes ont une reproduction sexuée et un cycle de vie composé d'un stade œuf, quatre stades juvéniles où, après chaque étape une mue se produit, et un stade adulte (Byerly et al., 1976). Certaines espèces peuvent se reproduire par parthénogénèse.

I.2.2. Ecologie

Les nématodes vivent dans différents écosystèmes, y compris les habitats marins et terrestres. Leurs caractéristiques font de bons indicateurs biologiques. Ils sont présents dans tous les milieux, sous tous les climats et à toutes les latitudes. Par contre, ils sont sensibles aux conditions du milieu et aux perturbations physiques ou chimiques à l'exemple du labour. Dans un sol ordinaire on trouve de l'ordre de un million de nématodes par mètre carré. Ils ont un rôle clé dans la chaîne trophique, en particulier, ils jouent un rôle de régulateur des micro-organismes. Leur abondance dépend du mode d'usage du sol. Des études faites à Antsirabe ont donné le résultat suivant sur l'abondance totale des nématodes du sol dans 100 g de sol sec sous deux différents modes d'usage (sous culture de soja et sous culture de riz)

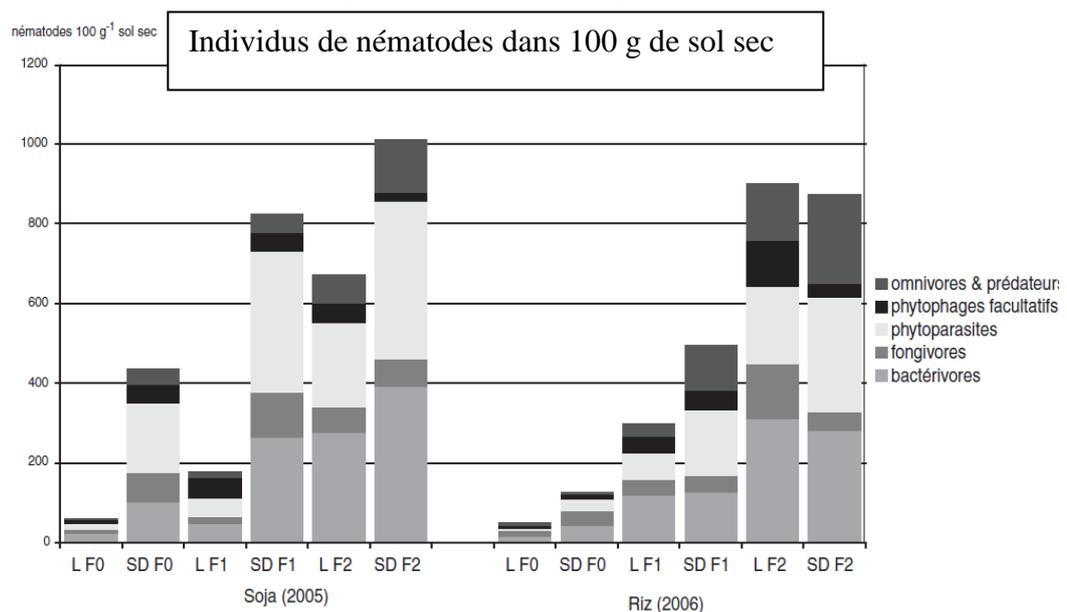


Figure 3 : Abondance totale des nématodes du sol dans 100 g de sol sec (Villenave et al., 2009)

I.2.3. Classification taxonomique et fonctionnelle

Les nématodes présentent une grande diversité taxonomique d'où l'identification de 70 familles majeures. Environ 26 600 espèces ont été décrites (Hugot, 2002). D'un point de vue fonctionnel, les nématodes peuvent être distingués selon leur comportement alimentaire dans le sol. Ils peuvent être classés en six sous-groupes en fonction de la morphologie de leurs pièces buccales et du pharynx qui est caractéristique de leur alimentation. Le tableau suivant reflète les groupes trophiques des nématodes.

Tableau 1 : Classification fonctionnelle des nématodes (Villeneuve, 2011)

Groupes	Phytophages (Premier niveau trophique)	Microbivores (Deuxième niveau trophique)	Niveau trophique supérieur
Sous-groupes	❖ Obligatoires ❖ Facultatifs	❖ Bactérivores ❖ Fongivores	❖ Omnivores ❖ Carnivores
Spécificités	Renseignent sur la nature et l'état de la couverture végétale, le risque de perte de rendement	Renseignent sur le compartiment microbien, la dynamique de la matière organique et le recyclage des nutriments	Reflètent les perturbations physiques ou chimiques du milieu
Alimentation	se nourrissent de plantes et d'algues	se nourrissent de bactéries et de champignons	Nourritures variées

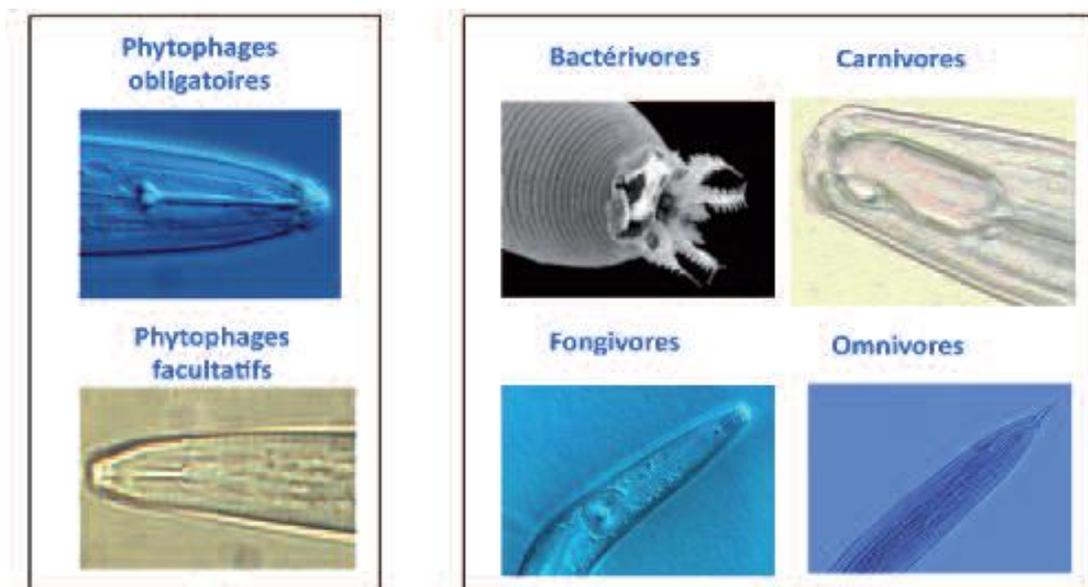


Photo 2: Les différents types de nématodes (Villeneuve, 2011)

I.2.4. Les nématodes bactérivores

Selon Villenave (2011), 30 à 40% de la communauté totale des nématofaunes du sol sont des nématodes bactérivores (qui consomment des bactéries). Cette communauté de nématodes bactérivores est notamment abondante dans les agroécosystèmes cultivés. Villenave a constaté que la présence de nématodes bactérivores était favorable à une meilleure utilisation des éléments nutritifs par les plantes. Des travaux récents sont venus préciser les mécanismes impliqués. Une méta-analyse réalisée sur plus de 50 études montrent que les bactérivores augmentent de plus de 30% la nutrition N et P des plantes cultivées (Trap et al., 2015).

II. MATERIELS ET METHODES

II.1. Dispositif expérimental et échantillonnage du sol

II.1.1 Zone de prélèvement des sols

Le LRI possède un site expérimental à Lazaina où nos sols d'expérimentation ont été prélevés. Les dix premiers centimètres du sol sous Bozaka ont été échantillonnés à l'aide d'une pelle. Lazaina se trouve dans la Région Analamanga, District Antananarivo Avaradrano, Commune Rurale d'Ambohimanga Rova, à 12 km de la capitale, avec une latitude de $18^{\circ}46'55$ 59° Sud et une longitude de $47^{\circ}32'46$ 3° Nord. Il se trouve à une altitude de 1274 m (Fanjaniaina, 2009). Les parcelles expérimentales appartiennent notamment à la société « Vohitra Environnement » qui est en collaboration avec le laboratoire ; elle a une pente inférieure à 10%.



Figure 4 : Localisation de la zone de prélèvement des sols (Google MAP)



Photo 3 : Photographies de la zone d'échantillonnage à Lazaina (Auteur, 2015)

II.1.2. Traitement des sols

Après le prélèvement sur terrain, les sols ont été séchés à l'air au laboratoire puis tamisés à 2 mm pour éliminer les grosses mottes de terres ainsi que les racines des couvertures végétales. Le sol a ensuite été mélangé à la main pour conserver une homogénéité lors des prochaines manipulations. Ils sont stockés dans des bacs à sols à température ambiante et à l'obscurité.

La démarche méthodologique entreprise tout au long de cette étude peut être résumée dans la figure suivante

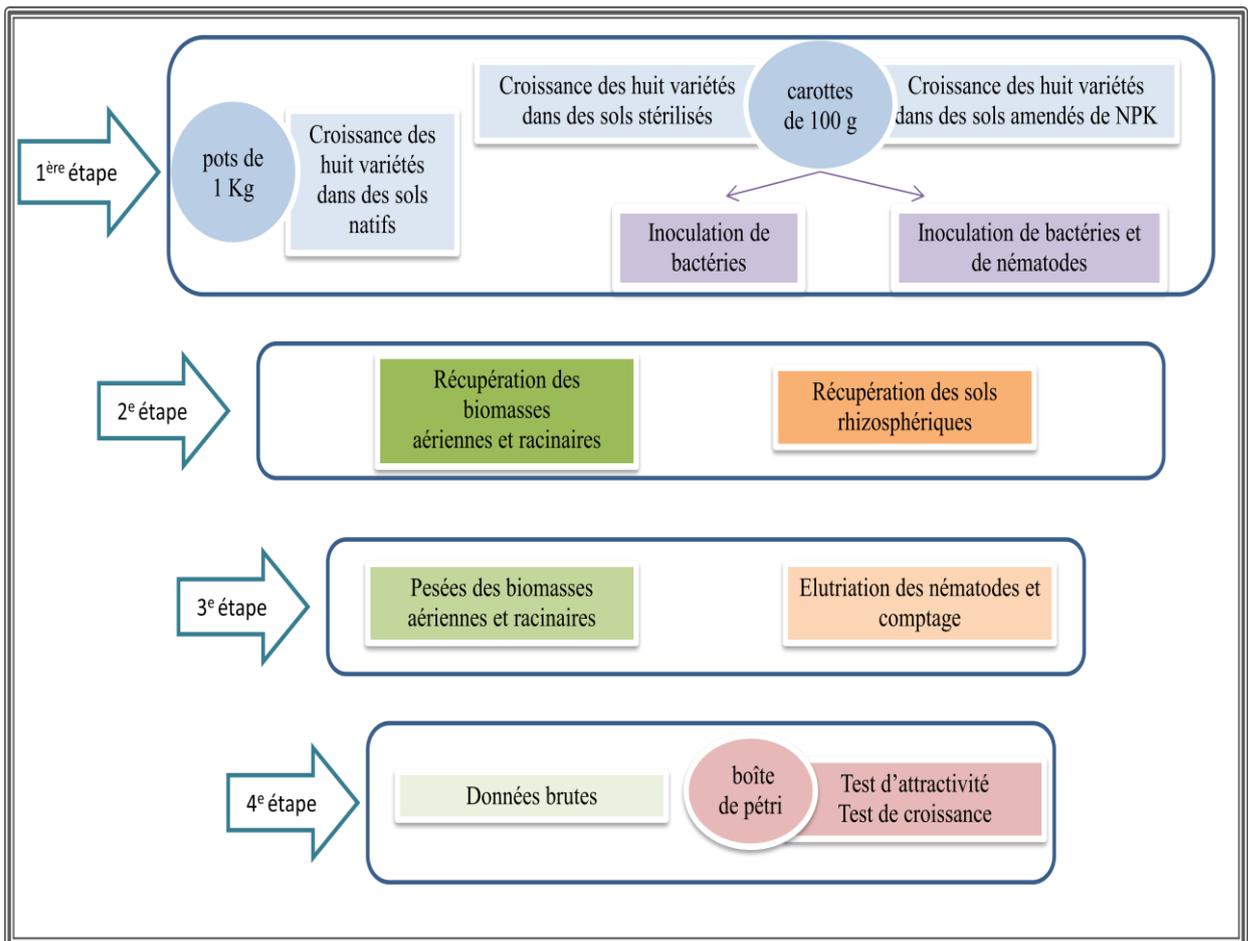


Figure 5: Méthodologie de travail

II.2. Matériels biologiques

II.2.1. Les variétés de riz

Les huit variétés de riz pluvial sélectionnées sont du genre *Oriza sativa Japonica* à savoir : B22, FOFIFA 182, FOFIFA 172, FOFIFA 152, FOFIFA 154, Nerica 4, Chomrong Dhan et WAB 880.



Figure 6 : Les huit variétés sélectionnées (octobre 2015)

Les huit variétés ont été choisies selon différents critères agronomiques résumés dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Critères agronomiques de sélection des huit variétés (FOFIFA et AgriSud International, 2015)

Variétés	Critères de sélection
B 22	Variété sensible au parasite racinaire STRIGA
F 182	Variété approprié pour une culture à 700-1200 m d'altitude.
F 172	Variété résistante à la pyriculariose, culture optimale entre 1200-1650m d'altitude
F 152	Variété très sensible à la pyriculariose
F154	Variété très sensible à la pyriculariose.
N 4	Variété résistante au parasite racinaire STRIGA, Culture optimale entre 700-1200 m d'altitude.
C D	Variété irriguée traditionnelle du Népal, largement diffusée dans les exploitations, représente 80% du riz pluvial cultivé sur les Hautes-Terres à Madagascar. Cette variété pousse bien, surtout à 1650-1900 m d'altitude et est tolérante à la pyriculariose.
WAB 880	Culture optimale entre 700-1200 m d'altitude.

Le lien de parenté entre ses variétés est représenté dans la figure ci-dessous

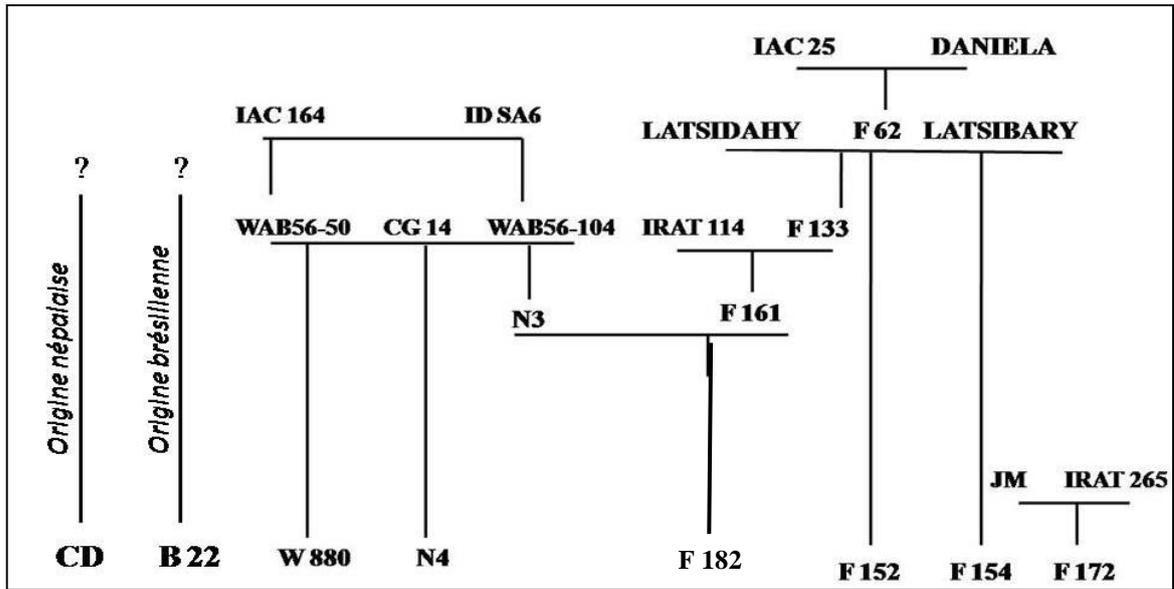


Figure 7 : Lien de parenté entre les huit variétés étudiées (FOFIFA, Agrisud International, 2015)

II.2.2. Les nématodes bactérivores

Les nématodes ont été extraits par élutriation (Seinhorst, 1962), à partir de 300 g de sol frais prélevé à la tarière (0 – 10 cm) du site de Lazaina. Un piégeage actif par filtration de 48 heures a permis la collecte des individus vivants. L'élevage monoxénique de nématodes bactérivores a été mis en place sur *Escherichia. Colis*. Brièvement, à l'aide d'une loupe binoculaire, une femelle gravide est sélectionnée et inoculée sur *E. Colis*. La femelle gravide et les œufs sont collectés à l'aide d'une pipette puis stérilisés à l'eau de javel. Après stérilisation, les œufs sont placés sur une culture fraîche de bactéries. Comme les nématodes ont un cycle de 7 jours, le repiquage se fait régulièrement, environ toutes les semaines. Le repiquage se fait sur milieu solide contenant 1% d'agar, 3 g/L de Tryptic Soy Broth (Flukaref 22092) amendé à froid de cholestérol (concentration finale de 5 mg/L). Le cholestérol est ajouté après autoclavage du milieu. L'opération est renouvelée plusieurs fois si nécessaire. Le nématode bactérivore sélectionné appartient au genre *Cephalobidae*. La Figure 8 suivante explique la culture des nématodes bactérivores.

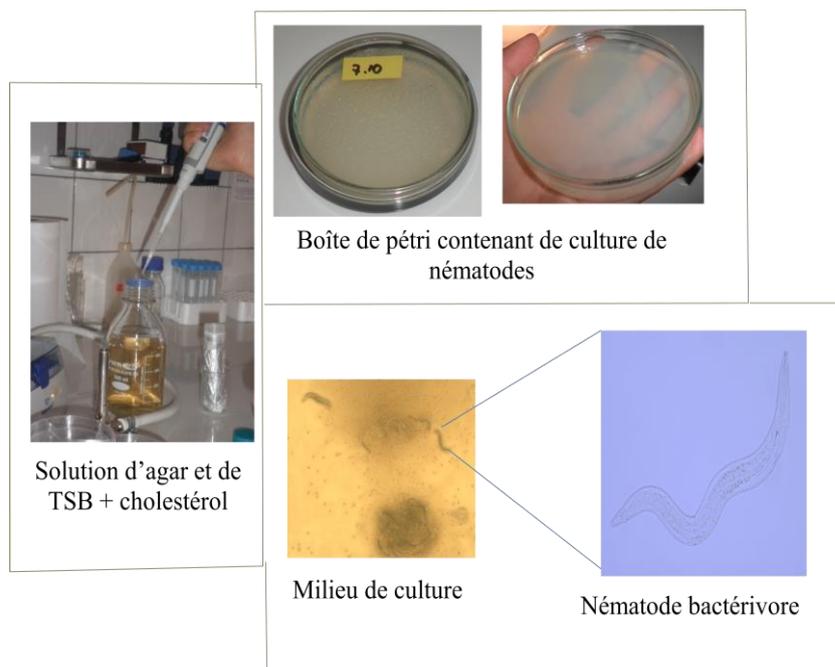


Figure 8 : Culture de nématodes bactéricivores (novembre 2015)

II.3. Phénotypage des variétés pour la sélection des 2 variétés contrastantes

II.3.1. Mesure des traits phénotypiques des graines

Quatre traits des graines ont été mesurés : le poids, la longueur, la largeur des graines et la capacité de germination. Pour cela, les graines des huit variétés ont été pesées avec la balance de précision. Un total de 20 graines a été échantillonné au hasard pour chaque variété pour les pesées. Le poids moyen a été calculé. Aussi, la taille des graines (la longueur et la largeur) ont été mesurées à l'aide de photographie à haute résolution de 10 graines par variétés avec des règles graduées disposées perpendiculairement. Les photographies des graines ont été exploitées à l'aide du logiciel "Plot Digitizer", qui fournit les distances souhaitées en millimètre. Les huit variétés de riz pluvial sélectionnées ont ensuite été plantées dans des sols natifs, c'est-à-dire dans les sols venant de Lazaina, sous serre pour estimer leur capacité de germination. Toutes les variétés ont été plantées dans le même sol tamisé à 2 mm afin de les comparer. Sous serre, les conditions climatiques sont contrôlées. Pour chaque variété, trois graines ont été semées dans un pot contenant 1 kg de sol natif. La Figure 9 suivante illustre les travaux effectués pour mesurer les traits phénotypiques des graines.

Mesure des traits phénotypiques des graines

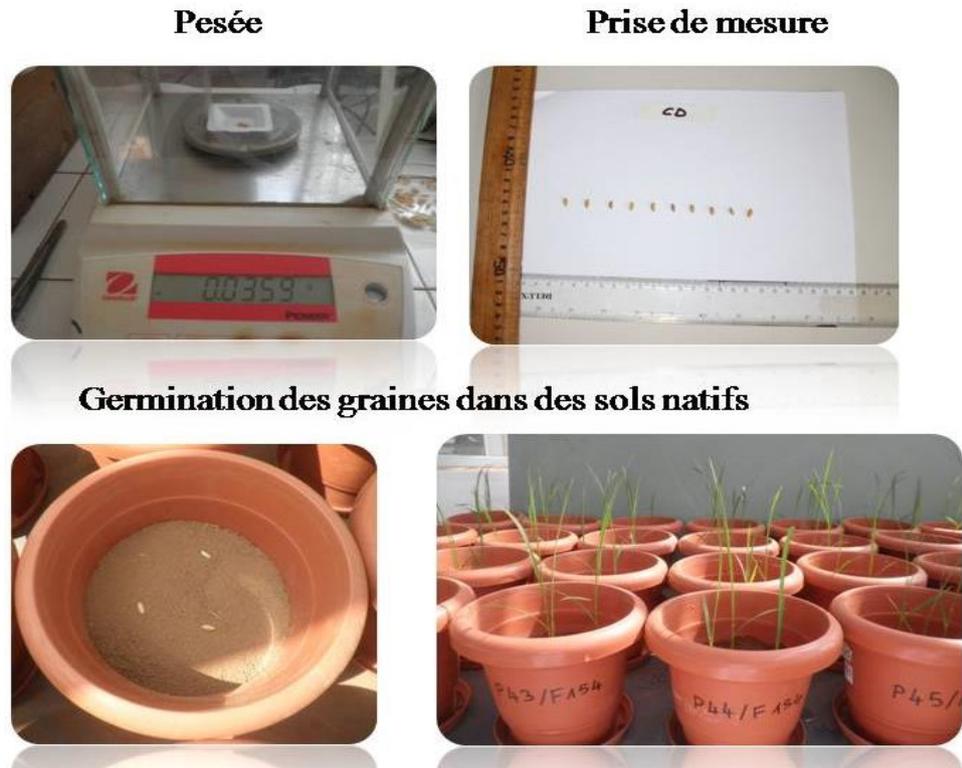


Figure 9 : Mesure des traits phénotypiques des graines (octobre 2015)

Le volume d'eau versé dans chaque pot est calculé selon la capacité de rétention d'eau du sol. Le volume d'eau ajouté tous les matins correspond à 80% de cette capacité. L'humidité du sol a donc été ajustée et corrigée chaque jour. Chaque variété possède dix pots soit 30 graines semées par variété. La capacité de rétention d'eau du sol a été déterminée tout au début de la manipulation par la méthode décrite par la figure suivante



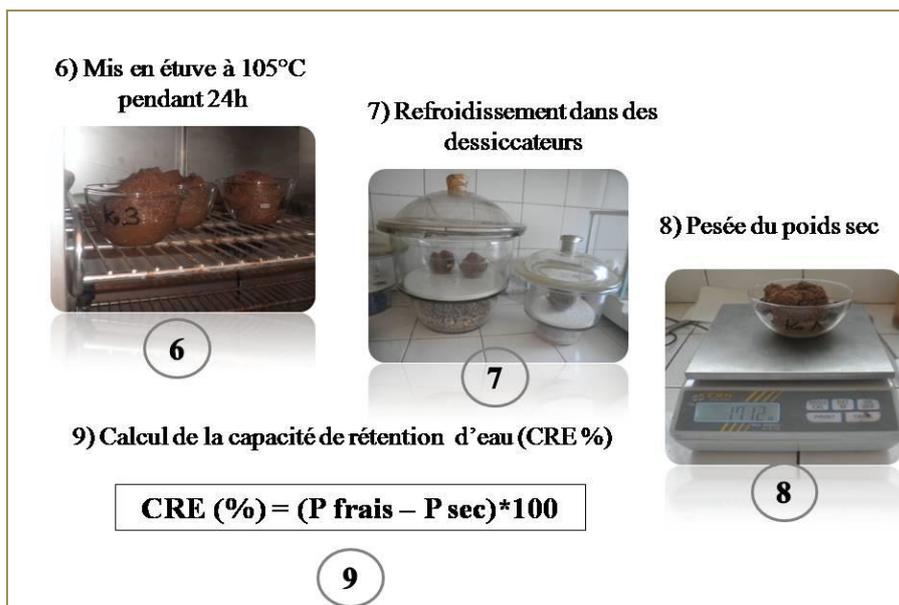


Figure 10 : Méthodologie pour déterminer la capacité de rétention d'eau (octobre 2015)

Le taux de germination est ensuite calculé par la formule suivante :

$$\text{Taux de germination} = \frac{\text{Nombre de graines germées}}{\text{Nombre de graines semées}} * 100$$

Le taux de germination est le pourcentage des graines qui germent par rapport à la quantité totale semée. Il détermine la capacité et l'aptitude des semences à germer dans les conditions du milieu (contrôlées). L'apparition de la partie aérienne hors du sol a été mesurée tous les deux jours et l'arrosage se fait tous les matins avant 9h au plus tard. Le poids des graines s'exprime en milligramme. La longueur et la largeur des graines s'expriment en millimètre et le taux de germination en pourcentage.

Dans cette expérience, nous avons également mesuré le nombre de nématode dans la rhizosphère des plantes à la fin de l'incubation. L'éluatriation permet d'extraire les nématodes du sol. Elle consiste à introduire 100 g de sol dans une bouteille rempli d'eau. Après mélange, le sol et les nématodes sont séparés à l'aide d'un courant d'eau ascendant crée par le placement du goulot de la bouteille à la surface d'un bocal rempli d'eau. Le sol, plus dense que les nématodes, sédimente au fond de la bouteille créant le courant d'eau ascendant. Les nématodes sont piégés dans ce courant d'eau. Après 4minutes d'éluatriation, l'eau contenant les nématodes est filtré deux fois à travers un tamis de maille de 50µm, ce qui permet d'éliminer les particules fines (<50µm) sachant que les nématodes ont une longueur supérieure à 200µm, ils n'arriveront pas à traverser le tamis. Ensuite, les nématodes et les autres particules retenues sont placés sur un filtre en ouate (papier Kleenex) monté sur un

tamis de 1000 μm de maille et placé pendant 48 heures (2 jours) sur des petites assiettes remplies d'eau. Les nématodes vivants traversent le filtre, se séparent des débris et sont retrouvés dans l'eau. Les suspensions sont alors concentrées par décantation et aspiration du surnageant. Pour chaque échantillon, deux comptages indépendants sont réalisés sur 5 ml de suspension sous un microscope binoculaire ; la moyenne de deux comptages est la valeur retenue pour déterminer la densité totale de nématodes qui est exprimé en nombre de nématodes par 100g de sol sec. Le résultat obtenu est illustré en annexe la méthodologie est décrite par la figure suivante

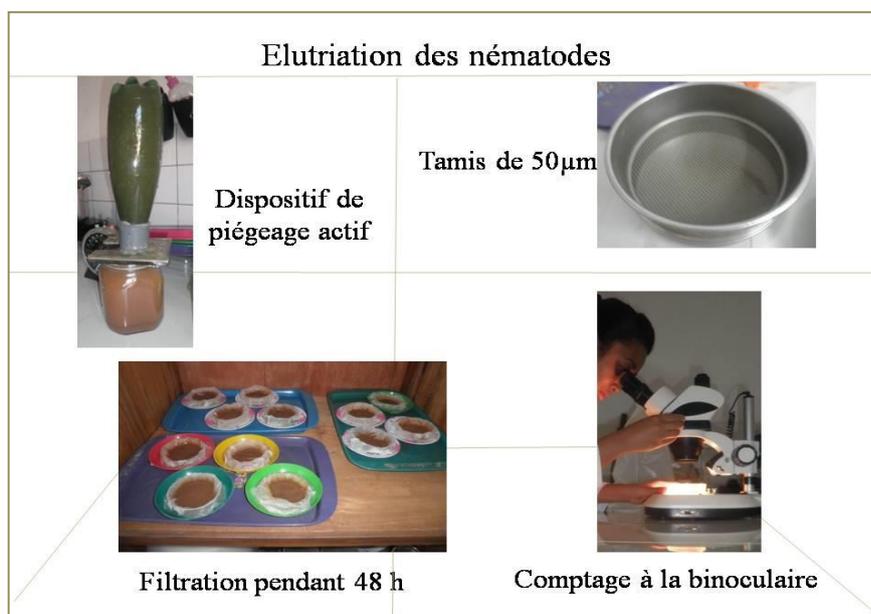


Figure 11 : Protocole d'élutriation des nématodes (novembre 2015)

II.3.2. Mesure des traits de croissance dans un sol natif

Au cours de l'expérience de croissance décrite dans la section précédente (III.3.1), la hauteur des plantes a été mesurée tous les deux jours. Après 32 jours de croissance, soit durant la période de tallage des riz, les parties aériennes et les racines de cinq pots parmi les dix plantes de chaque variété ont été échantillonnées, soit un total de 15 plantes par variété. Les 5 pots restant ont été mis de côté comme réserve. Les biomasses contenues dans un pot (biomasses aériennes et racinaires de 3 plantes) ont été mis dans des petits pots en plastiques puis mis en étuve à 60°C pendant 48 heures pour les faire sécher. Les biomasses de chaque plante ont été pesées à la balance de précision (Figure 12). Les résultats sont exprimés en centimètre pour la hauteur et en gramme pour les biomasses.



Figure 12 : Mesure des traits de croissance des variétés (novembre 2015)

II.3.3. Mesure des traits de sensibilité à la faune et aux nutriments

Deux autres traits ont été mesurés : (i) la sensibilité de la variété à la défaunation du sol qui renseigne sur sa capacité à exploiter la fertilité biologique du sol (CFB) et (ii) la sensibilité à la fertilisation minérale azote (N), phosphore (P) et potassium (K) qui renseigne sur sa capacité à exploiter la fertilité minérale du sol (CFM). Pour cela, deux expériences microcosmes en PVC (tubes de 15cm de hauteur et 6cm de diamètre) ont été menées sous serre. La première s'attache à caractériser la CFB alors que la seconde s'attache à caractériser la CFM.

Pour la première expérience, les sols ont été humidifiés à 50% CRE puis stérilisés à 120°C dans une cocotte à injection pendant 10 min (Figure 13). Cette opération est connue sous l'appellation « la défaunation ». La défaunation du sol tue tous les animaux du sol que ce soit des insectes, les nématodes ou les vers de terre. Seuls les bactéries, les champignons et quelques protistes ont la faculté de se transformer en spores en présence de haute température et de résister à la défaunation. Ces organismes ne font pas partie de la faune du sol car ce ne sont pas des métazoaires.

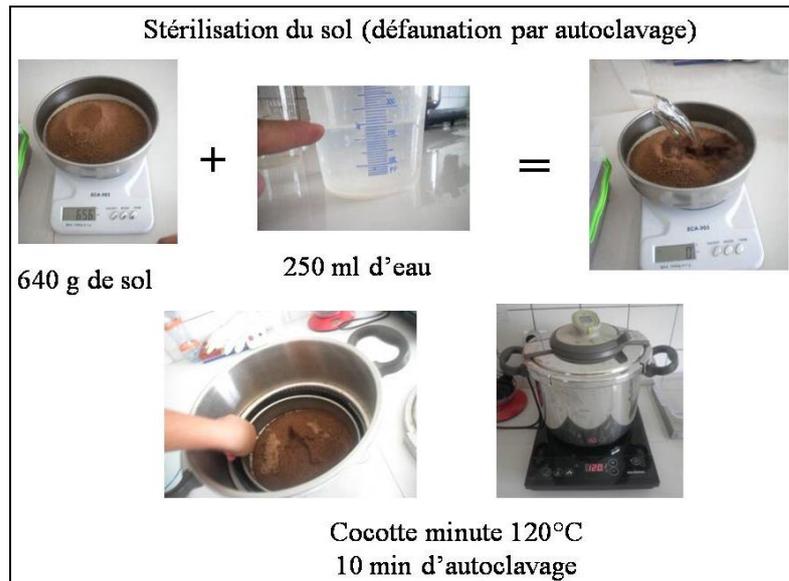


Figure 13 : Processus de stérilisation du sol (octobre 2015)

Une fois les sols refroidit, ils ont été distribués dans les tubes (100 g par tubes). Afin de reconstituer une communauté microbienne (bactéries + champignons) riche, une suspension microbienne a été réalisée. Des bactéries et des champignons ont été extraits du sol natif suivant le protocole développé dans la Figure 14. Après cette manipulation 4,5 ml de solution contenant de bactéries et de champignon ont été versés dans chaque microcosme puis laissée baigner pendant une nuit. Le lendemain des graines ont été semées dans les tubes.

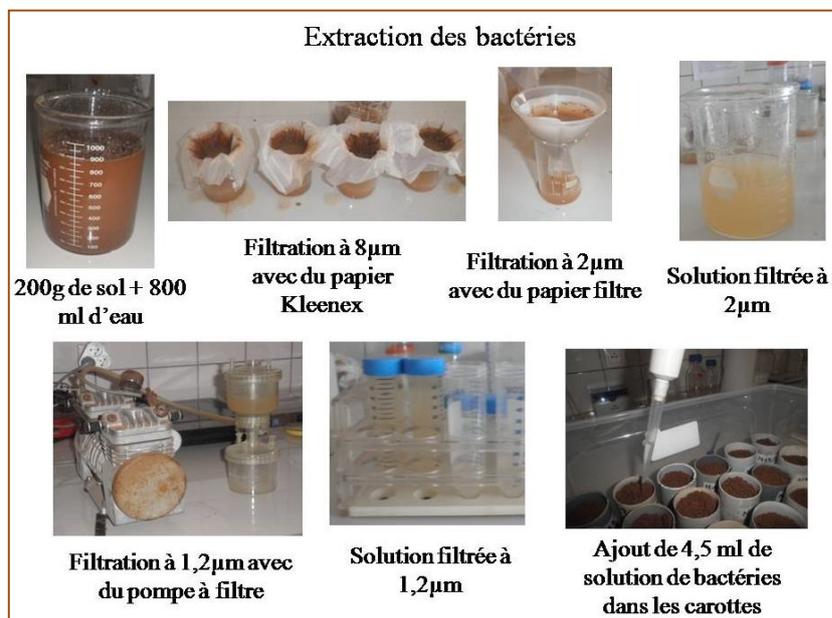


Figure 14 : Protocole d'extraction des bactéries et des champignons (octobre 2015)

Les graines des variétés ont été stérilisées pendant 30 secondes avec de l'eau de javel diluée à 3%, puis rincées 3 fois avec de l'eau stérilisée et mis en étuve à 30°C pendant 3 jours afin de favoriser un taux de germination maximal.

Une fois le sol enrichi en microorganisme, une graine a été placée au centre du microcosme. Pour chaque variété, trois microcosmes ont été mis en place. Pour éviter un effet de placement sur les résultats, les microcosmes ont été répartis de manière aléatoire dans des blocs. La hauteur de la plante a été mesurée tous les 2 jours et l'arrosage a été effectué tous les matins sans dépasser 70% de la capacité de rétention. Les manipulations ont été arrêtées 18 jours après le lancement de l'expérience. Les biomasses aériennes ont été prélevées directement et séchées pendant 48h à l'étuve de 60°C. Il en est de même pour les racines.

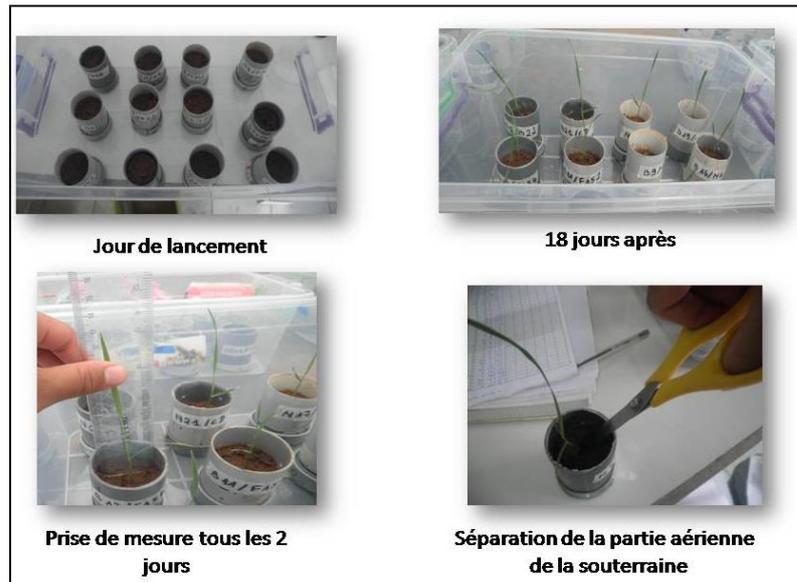


Figure 15 : Manipulation des microcosmes (octobre 2015)

Pour la deuxième expérience, une solution riche en NPK a été apportée dans les microcosmes. Cette seconde expérience est identique à celle décrite précédemment : autoclavage du sol, apport de microorganismes, stérilisation des graines et mesure de la hauteur de la plante et de la biomasse. La seule différence est l'apport de NPK sous forme de solution.

La différence de biomasse des plantes entre l'expérience de croissance en pot dans un sol natif (décrit dans la section II.3.1), donc riche en faune du sol, et l'expérience 1 sans faune du sol, permet d'estimer la réponse de la plante à la présence de faune du sol : la CFB. La capacité à exploiter la fertilité biologique du sol est calculée en divisant la biomasse avec faune par la biomasse sans faune. Il s'agit donc d'un ratio sans unité selon les formules suivantes

$$\text{Ratio BA} = \frac{\text{BA sol natif}}{\text{BA sol défauné}}$$

$$\text{Ratio BR} = \frac{\text{BR sol natif}}{\text{BR sol défauné}}$$

De même, la différence de biomasse des plantes entre les expériences en microcosmes 1 et 2 permet d'estimer la réponse de la plante à l'apport de fertilisant : la CFM. La capacité à exploiter la fertilité biologique du sol est aussi calculée en divisant la biomasse avec NPK par la biomasse sans NPK, respectivement. Il s'agit aussi d'un ratio sans unité soit

$$\text{Ratio BA} = \frac{\text{BA avec NPK}}{\text{BA sans NPK}}$$

$$\text{Ratio BR} = \frac{\text{BR avec NPK}}{\text{BR sans NPK}}$$

II.4. Expérience d'attractivité et de croissance des nématodes bactérivores

L'objectif de notre étude est de mesurer l'attractivité des nématodes bactérivores par les racines de deux variétés de riz pluvial contrastées d'un point de vue des traits phénotypiques, ainsi que la capacité de ces deux variétés à favoriser la croissance des nématodes. Pour cela, deux tests ont été mis en place : un test d'attractivité et un test de croissance.

II.4.1. Echantillonnage des sols adhérents aux racines

La première étape est l'échantillonnage du sol sous l'influence des racines des différentes variétés, soit le sol adhérent aux racines. C'est ce sol qui sera utilisé pour les deux tests. Pour cela, les racines de l'expérience en pot décrite dans la section II.3.1, ont été soigneusement retiré du sol et le sol adhérent a été échantillonné. L'échantillonnage a été réalisé à l'aide d'un protocole standard identique pour toutes les variétés (Figure 16). Les sols adhérents sont ensuite séchés à l'air libre sous serre.



Figure 16 : Echantillonnage des sols adhérents aux racines (novembre 2015)

II.4.2. Test d'attractivité

Le test d'attractivité a été effectué dans des boîtes de pétri à trois compartiments. Des ouvertures, dites « portes » ont été créées entre certains compartiments afin de permettre aux nématodes de se déplacer vers les compartiments comme nous le montre la Figure 17.

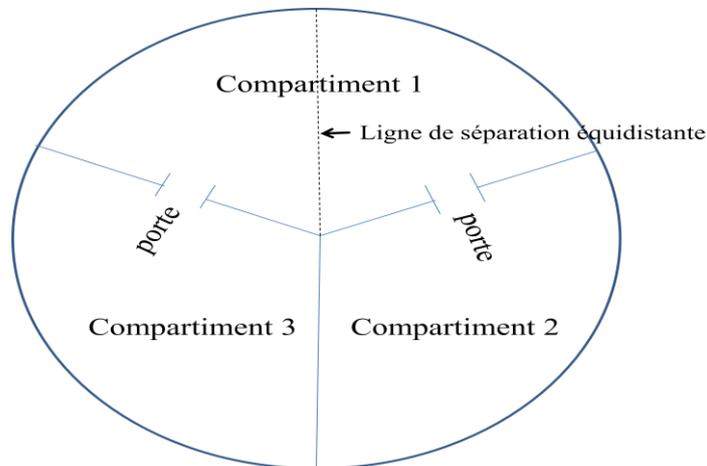


Figure 17 : Boîte de pétri (décembre 2015)

Dans le compartiment 1, nous avons versé 7 ml d'agarose (ne contenant pas de carbone). Dans le compartiment 2, nous avons mis 10g de sol non adhérent avec 4.4ml d'eau distillée. Dans le troisième compartiment, nous avons mis 10g de sol adhérent avec 4.8ml d'eau distillée. Cette manipulation a été réalisée pour les deux variétés les plus contrastantes mis en valeur dans les premières manipulations.

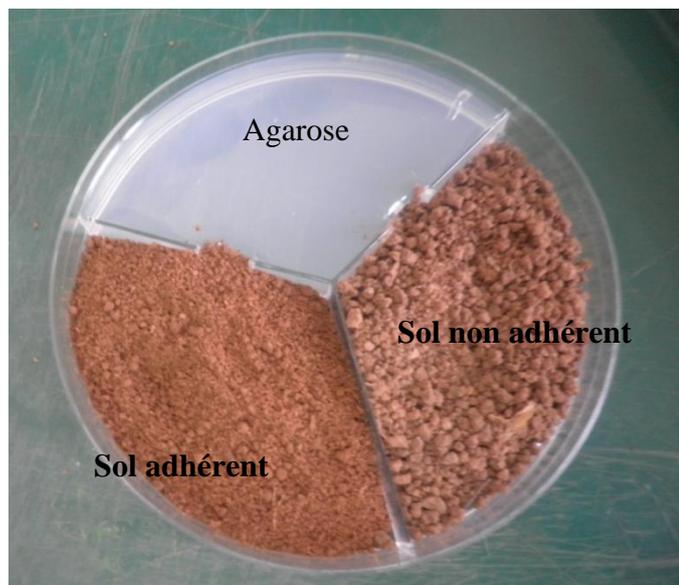


Figure 18 : Test d'attractivité (décembre 2015)

L'agarose a été humidifié avec 200µl d'eau distillée avant d'inoculer 50 µl de nématodes tout en haut de la ligne de séparation équidistante aux portes. Le nombre moyen de nématodes inoculés est de 100 individus par boîte. 5 répétitions ont été réalisées pour les deux variétés les plus contrastantes soit 10 boîtes de pétri au total. Les dix boîtes ont été placées dans la salle d'incubation dont la température est maintenue stable entre 24°C à 26°C pour le bien être des nématodes. Un premier comptage est effectué 16h après la manipulation puis un deuxième après 24h. Les individus à gauche de la ligne équidistante sont attirés par le sol adhérent et ceux qui sont à droite sont attirés par le sol non adhérent. Les résultats sont exprimés en pourcentage de nématodes attirés ou non par le sol adhérent.

II.4.3. Test de croissance des nématodes

Le test de croissance des nématodes sous l'influence des sols adhérents se fait également dans des boîtes de pétri à trois compartiments sans porte. Chaque compartiment est rempli de 10g de sol adhérent des deux variétés sélectionnées. Trois répétitions sont faites pour chaque variété, soit un total de 6 boîtes de pétri. Par contre, 3 autres boîtes remplies de sol non adhérent ont été mis en place comme témoin. Chaque compartiment a été humidifié avec 4ml d'eau distillée puis deux compartiments ont été inoculés avec 50µl de nématodes, soit 6 individus par compartiment. Le troisième compartiment servira de témoin négatif.

Après 7 jours d'incubation à 25°C à l'obscurité, les nématodes ont été extraits par piégeage actif. Pour cela, 5g de sol du compartiment 1 a été prélevé puis mis dans un dispositif de filtre contenant un kleenex. Après 48h, 2 comptages par échantillon ont été réalisés. Une deuxième intervention avec les mêmes méthodologies a été effectuée 14 jours après inoculation des nématodes. La figure suivante résume ses manipulations



Croissance pendant 7 ou 14 jours



Filtration pendant 48h

Figure 19 : test de croissance (décembre 2015)

II.5. Tests statistiques

Les résultats sont présentés en moyenne \pm écart-type. La normalité des différentes variables étant trop peu respectée, les différences entre les moyennes ont été testées par un test non paramétrique de rang de Kruskal-Wallis à l'aide du logiciel XLSTAT 2008. La comparaison des moyennes pour le test de croissance a été réalisée en utilisant le test t de Student. Une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été utilisée pour visualiser la ressemblance des variétés vis-à-vis de l'expression des différents traits phénotypiques. Cette ACP permet d'avoir une interprétation globale du phénotypage. Une classification ascendante hiérarchique sur les composantes de l'ACP a été utilisée pour classer les différentes variétés dans des groupes en fonction des traits phénotypiques. Un test binomial a été utilisé pour tester la significativité de l'attractivité des sols adhérents. Le seuil de significativité de 5% a été utilisé pour l'ensemble des tests statistiques.

III. RESULTATS

III.1. Phénotypage des huit variétés de riz pluvial

III.1. Traits phénotypique des graines

Tableau 3 : Principaux traits des graines des huit variétés de riz pluvial

Variétés	Traits				
	Poids (mg)	Longueur (µm)	largeur (µm)	L/l \$	Hauteur*(cm)
B22	39,8 a	961,4 a	329,7 a	2,92 cd	22,45 bcd
F182	30,4 c	870,1 bc	313,8 a	2,79 d	20,9 cd
F172	27,9 cd	831,9 c	155 c	5,37 a	20,8 d
F152	29,3 cd	844,9 c	303,2 ab	2,86 cd	23,1 abc
F154	33,7 b	982,8 a	288,7 ab	3,4 b	23,33 ab
N4	26,6 d	879,7 bc	265,5 b	3,31 bc	20,44 d
CD	30,9 bc	742,7 d	328,9 a	2,26 e	23,94 ab
WAB	29,5 cd	921,8 ab	312,1 a	2,95 bcd	25,05 a

§: Rapport entre la Longueur et la largeur

*: Hauteur de la plante mesurée après 32 jours

Le Tableau 3 nous résume les différents traits des graines des huit variétés sélectionnées. Suivant le test non paramétrique de Kruskal-Wallis les poids, longueur, largeur, hauteur ou ratio L/l sont classés selon un ordre de grandeur. Sur le poids, les graines les plus lourdes appartiennent à la variété *B22*, les plus légères sont celles du *Nerica 4*. Les graines les plus longues sont celles du *B22* et *F154*, les plus courtes, celles du *Chomrong Dhan*. Les graines des variétés *B22*, *F182*, *CD* et *WAB* sont tous larges par rapport à celles du *F172*. Si on fait le ratio longueur sur largeur des graines, c'est la variété *F172* qui a un valeur le plus élevé et *CD* a la plus petite valeur. Concernant la faculté des graines à germer ou leur hauteur mesurée après 32 jours, la variété *WAB* est la plus sortante parmi les autres avec une hauteur moyenne de 25,05 cm et les variétés *N4* et *F172* sont les moins sortantes avec des hauteurs d'environ 20 cm.

III.2. Traits de croissance dans un sol natif

- Germination des graines

La Figure 20 suivante remet en valeur la capacité des graines à germer durant la période d'expérimentation.

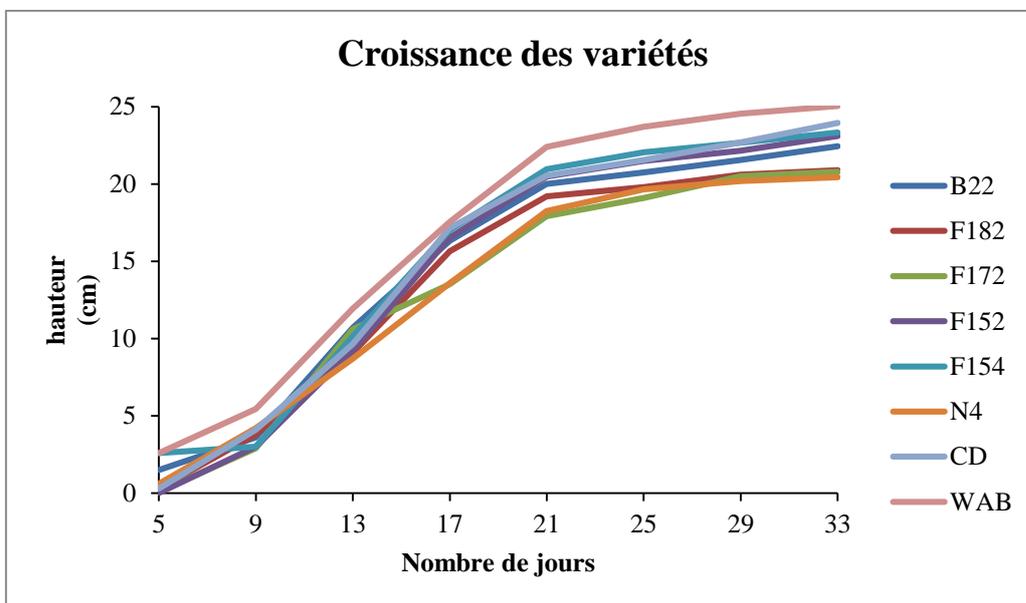


Figure 20 : Croissance des huit variétés dans un sol natif de Lazaina

Cette figure met en exergue les hauteurs mesurées tous les 2 jours mais ici, afin de bien faciliter la lecture du graphe, nous avons représenté que les hauteurs relevées tous les 4 jours. *WAB 880* est la variété qui pousse le mieux depuis la germination jusqu'au jour d'arrêt (32 jours après semis). *WAB* est donc la variété la mieux adaptée aux conditions de culture du sol de Lazaina. Par contre, deux variétés n'arrivent pas à pousser comme les autres à savoir le *F 172* et le *Nerica 4*. Du 10^e au 17^e jours, le *N4* a la plus faible hauteur et du 17^e au 27^e jours, le *F172* a la plus faible croissance (période de début tallage). C'est donc cette variété qui est la plus contrastante par rapport au *WAB 880* même si la croissance de toutes les variétés se stabilise au 20 ou 21^e jours. C'est également cette variété qui est la plus contrastante au niveau du lien de parenté (cf. Figure 7) contrairement à *Nerica 4*. Pour la partie deux de l'étude, nous avons donc choisis de sélectionner les deux variétés suivantes : *WAB880* et *F172*.

- Biomasses aériennes et racinaires des huit variétés

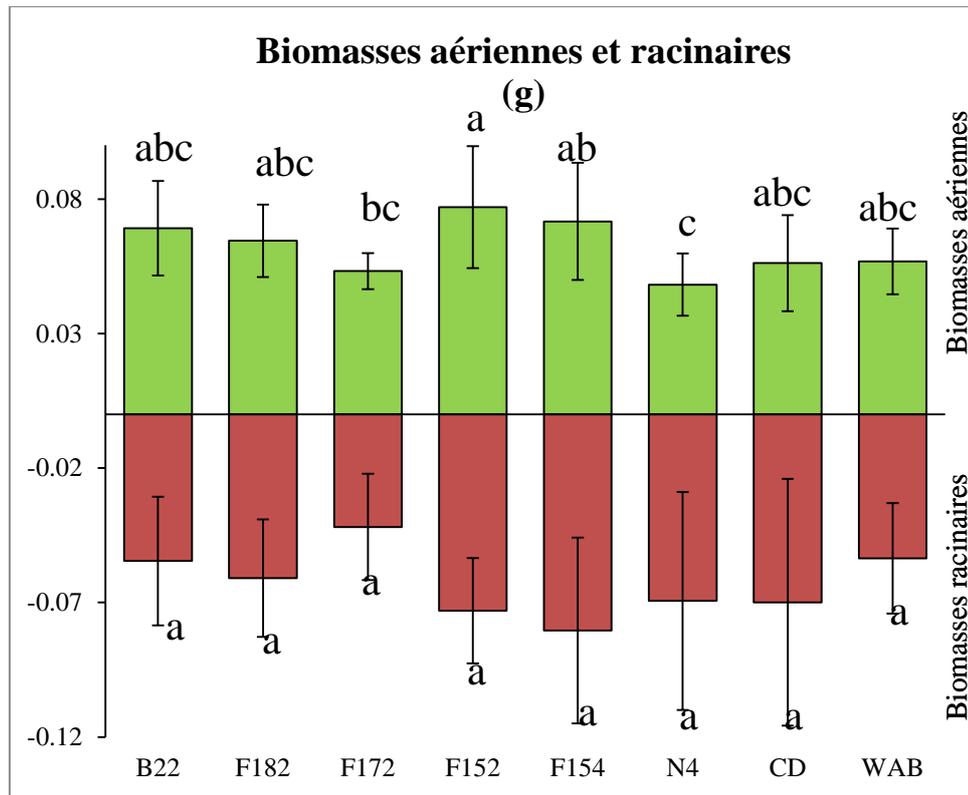


Figure 21 : Biomasses aériennes et racinaires des huit variétés poussant dans un sol natif après 32 jours de croissance. Les lettres (a, b et c) indiquent des différences significatives d'après le test de Kruskal-Wallis au seuil de 5%

La figure 21 illustre la moyenne des biomasses aériennes (en haut) et racinaires (en bas) des plants de riz plantés dans les pots contenant le sol natif. Les variétés *F152* et *F154* ont les biomasses aériennes et racinaires les plus élevées. Les variétés *B22*, *F182* et *CD* présentent des valeurs intermédiaires. La variété *F172* présente les valeurs de biomasse les plus faibles. Le test de Kruskal-Wallis révèle des différences significatives entre les variétés mais uniquement pour la biomasse aérienne.

III.3. Traits de sensibilité à la faune et aux nutriments

- Sensibilité à la faune du sol CFB (Capacité à exploiter la Fertilité Biologique du sol)

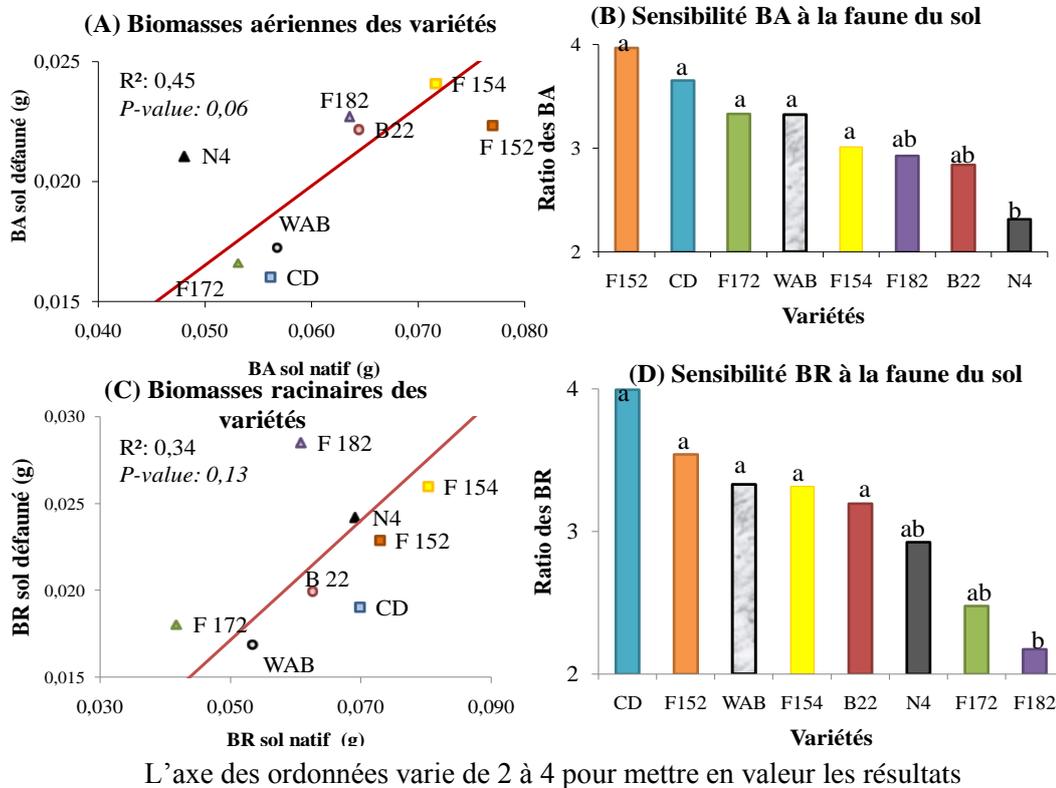


Figure 22 :(A) biomasse aérienne des variétés mesurée sur sol natif (abscisse) et sol défauné (ordonnée) ; la droite correspond à la moyenne. (B) sensibilité des variétés à la défaunation du sol exprimé en ratio des biomasses aériennes (C) biomasse racinaire des variétés mesurée sur sol natif (abscisse) et sol défauné (ordonnée) ; la droite correspond à la moyenne. (D) sensibilité des variétés à la défaunation du sol exprimée en ratio des biomasses racinaires.

La Figure 22(A) présente la relation entre les biomasses aériennes des variétés qui ont poussées dans un sol natif et dans un sol défauné. De même, la Figure 22(C) représente la relation entre les biomasses racinaires des variétés qui poussent dans un sol natif et dans un sol défauné. Les variétés pour lesquelles les valeurs de biomasses aériennes et racinaires sont en dessous de la ligne rouge moyenne sont les plus sensibles à la défaunation. Plus précisément, il s'agit de *CD*, *WAB* et *F172* pour la biomasse aérienne et *WAB* et *CD* pour la biomasse racinaire. Les variétés dont les valeurs sont au dessus de la droite sont les moins sensibles à la défaunation : *F182* et *N4*.

La significativité des deux droites de corrélation en rouge a été traitée avec un test de corrélation de Pearson au seuil de signification $\alpha=0,05$; les valeurs de R^2 et p -value sont insérés dans les figures. Tandis que les graphes (B) et (D) représentent le ratio des biomasses. Les lettres (a e tb) sur les diagrammes ont été issus du test de Kruskal-Wallis avec un seuil de signification $\alpha=0,05$ et p -value $\leq 0,001$. Le test de Kruskal-Wallis permet donc de déterminer si les échantillons proviennent d'une même population ou si au moins un échantillon provient d'une population différente des autres. 3 classes ont été ainsi identifiées pour le ratio des biomasses aériennes de même que pour le ratio des biomasses racinaires : **a**, **ab** et **b**.

- Sensibilité à la fertilisation NPK, CFM (Capacité à exploiter la Fertilité Minérale du sol).

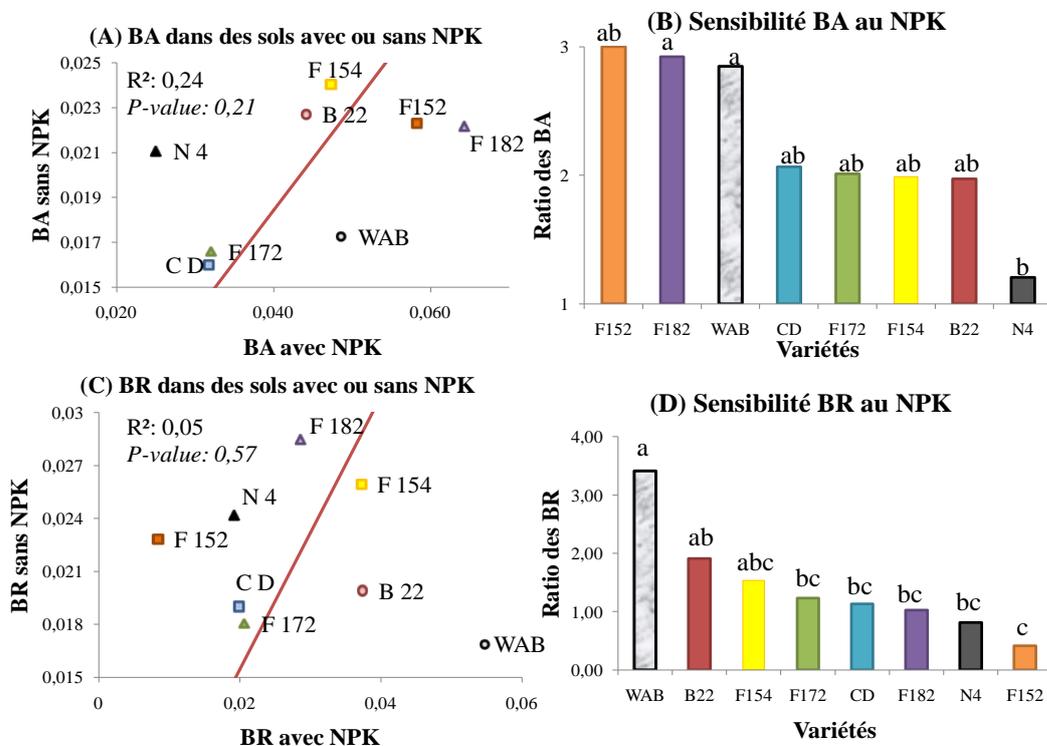


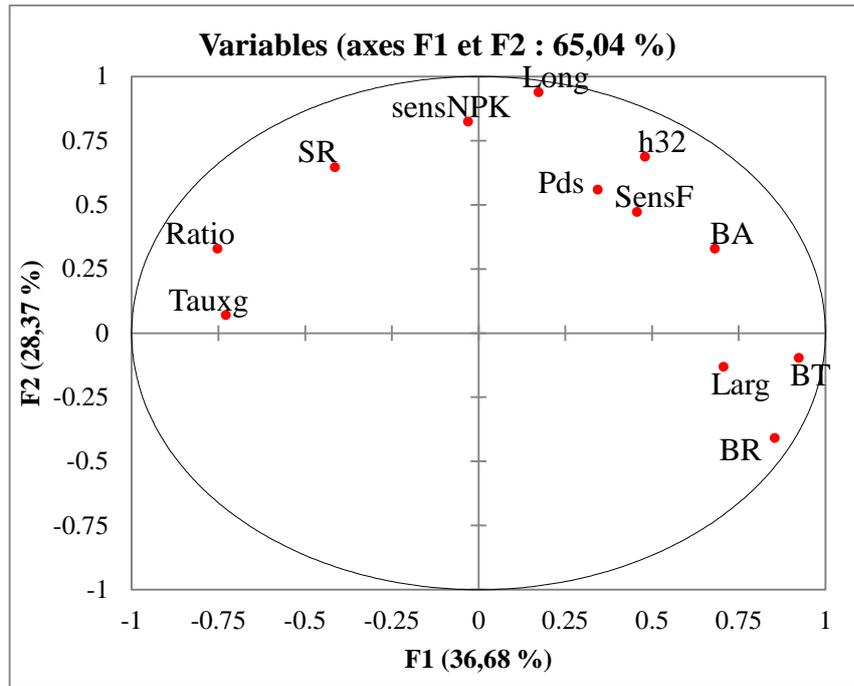
Figure 23 : (A) biomasse aérienne des variétés mesurée sur sol avec NPK (abscisse) et sol sans NPK (ordonnée) ; la droite correspond à la moyenne. (B) sensibilité des variétés à la fertilisation NPK exprimé en ratio des biomasses aériennes (C) biomasse racinaire des variétés mesurée sur sol avec NPK (abscisse) et sol sans NPK (ordonnée) ; la droite correspond à la moyenne. (D) sensibilité des variétés à la fertilisation NPK exprimée en ratio des biomasses racinaires

La Figure 23 met en valeur l'apport de nutriment sur la biomasse des plantes. Le traitement avec de l'amendement NPK a fortement augmenté la valeur de la biomasse aérienne chez trois variétés : *F152*, *WAB* et *F182* mais n'a eu aucun effet sur *N4*. Les variétés *CD*, *F172*, *F154* et *B22* présentent des valeurs intermédiaires (Figure 23). *WAB 880* est la variété la plus impactée au niveau de la biomasse racinaire par l'apport de NPK. Au contraire, *F152* présente une très faible réponse.

Le test de corrélation des graphes (A) et (B) avec la méthode de Pearson a donné un seuil de signification $\alpha = 0,05$, pour les biomasses aériennes, $R^2 = 0,242$ et $p\text{-value} = 0,214$; pour les biomasses racinaires, $R^2 = 0,055$ et $p\text{-value} = 0,575$. Les lettres (a,b,c) sur les diagrammes des graphes (C) et (D) ont été issus du test de Kruskal-Wallis avec un seuil de signification $\alpha = 0,05$ et $p\text{-value} \leq 0,002$ pour la biomasse aérienne et $p\text{-value} \leq 0,0001$ pour la biomasse racinaires. Trois classes ont été identifiées pour le ratio des biomasses aériennes: **a**, **ab** et **b**. Par contre 5 classes ont été identifiées pour le ratio des biomasses racinaires : **a**, **ab**, **abc**, **bc** et **c**.

III.4. Analyse en composante principale (ACP)

Le Tableau 3 précédent, combiné avec la sensibilité à la faune du sol et à la sensibilité NPK, a été analysé à l'aide d'une ACP. Le cercle de corrélation entre les variables et les composantes principales de l'ACP est présenté dans la Figure 24. Nous observons dans un premier temps que 65% de la variabilité du tableau est expliqué par les 2 premiers axes de l'ACP. Nous observons également sur l'axe 1 de l'ACP que les biomasses aériennes et racinaires de la plante sont fortement corrélées avec la largeur de la graine (corrélation positive) et le taux de germination (corrélation négative). Sur l'axe 2, la sensibilité à la faune du sol et à la fertilisation NPK sont corrélées à la hauteur de la plante, la longueur de la graine, et au rapport shoot root (SR).



BA : biomasses aériennes dans le sol natif

Pds : Poids des graines

BR : biomasses racinaires dans le sol natif

Long : Longueur des graines

BT: Biomasses total (BT= BA+BR)

Larg: Largeur des graines

SR: Shoot root (SR= BA/BR)

Tauxg: Taux de germination des graines

SensF : sensibilité à la faune du sol

SensNPK : Sensibilité au NPK

h32 : Hauteurs mesurées après 32 jours

Figure 24 : Cercle de corrélation des variables sur les axes 1 et 2 de l'Analyse en Composantes Principales

Le plan factoriel des individus (les variétés) et le cercle de corrélation nous a permis de distinguer 4 grandes classes à savoir :

- ❖ Les variétés répondantes à la fois à la fertilisation NPK et à la faune du sol avec une biomasse intermédiaire : **WAB** et **B22**
- ❖ Les variétés répondantes à la faune du sol et qui présente une forte biomasse totale : **CD**, **F154** et **F152**
- ❖ Les variétés peu répondantes divisées en 2 sous-classes :
 - Variété peu sensible au NPK et à la faune du sol : **F172**
 - Variété intermédiaire proprement dite : **F182**
- ❖ La variété non répondante que ce soit à l'amendement NPK ou à la faune du sol et présentant une faible biomasse : **N4**

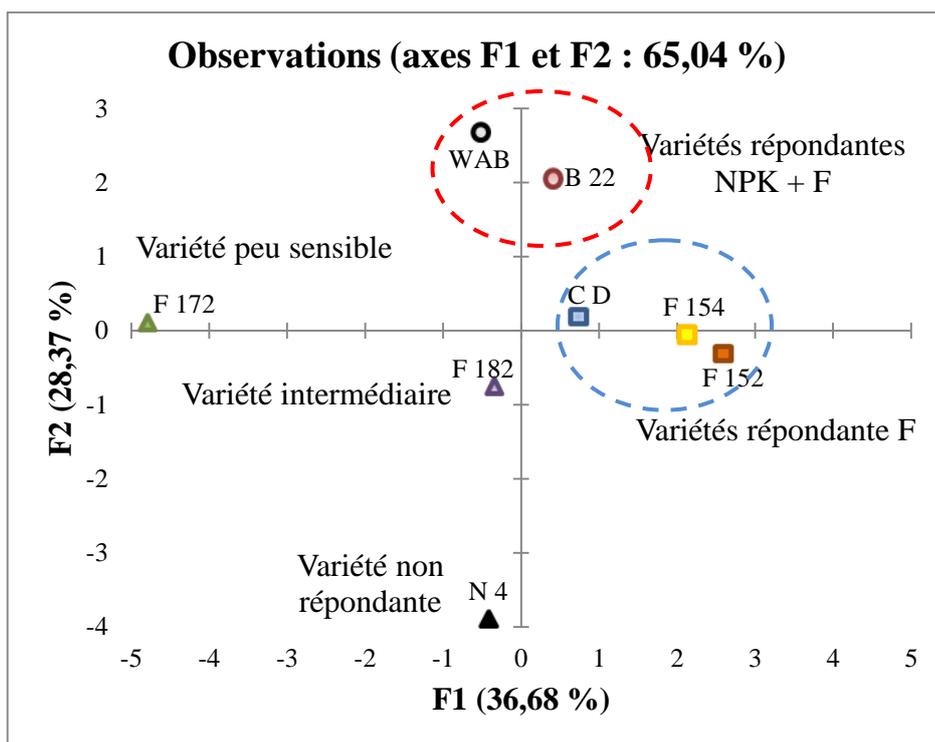
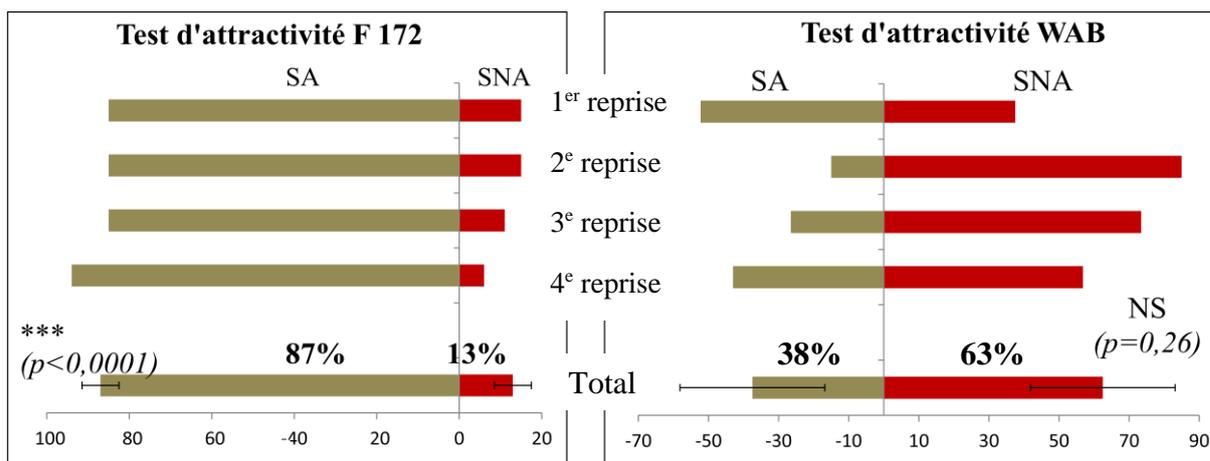


Figure 25 :Plan factoriel des individus (les variétés) sur les axes 1 (36.68%) et 2 (28.37%) de l'Analyse en Composante Principale

III.2. Test d'attractivité et de croissance

III.2.1. Test d'attractivité

La Figure 26 suivante met en exergue les résultats du test d'attractivité dans les deux variétés les plus contrastantes.



Binomial test (5%)

SA: Sol adhérent aux racines, SNA: Sol non adhérent aux racines

Figure 26: Test d'attractivité pour les deux variétés les plus contrastantes

En dénombrant les nématodes à gauche et à droite de la ligne équidistante des portes, nous avons obtenus le résultat suivant : 87% des individus de nématodes injectés dans les boîtes de *F172* ont choisis le sol adhérent et seulement 13% ont choisis le sol non adhérent. Le test statistique utilisé est le test bilatéral ou binomial test avec $\alpha = 0,05$. Le test binomial révèle que cette attractivité est significative au seuil de signification de 5%. Pour le cas de la variété *WAB*, seulement 38% des individus se sont dirigés vers le sol adhérent et 63% ont été attirés par le sol non adhérent. Le test révèle que cette attractivité n'est pas significative. La variété *F172* produit une rhizosphère plus attirante pour les nématodes que celle produite par la variété *WAB*.

III.2.1. Test de croissance

Les travaux de laboratoire concernant le test de croissance nous a donné la figure suivante

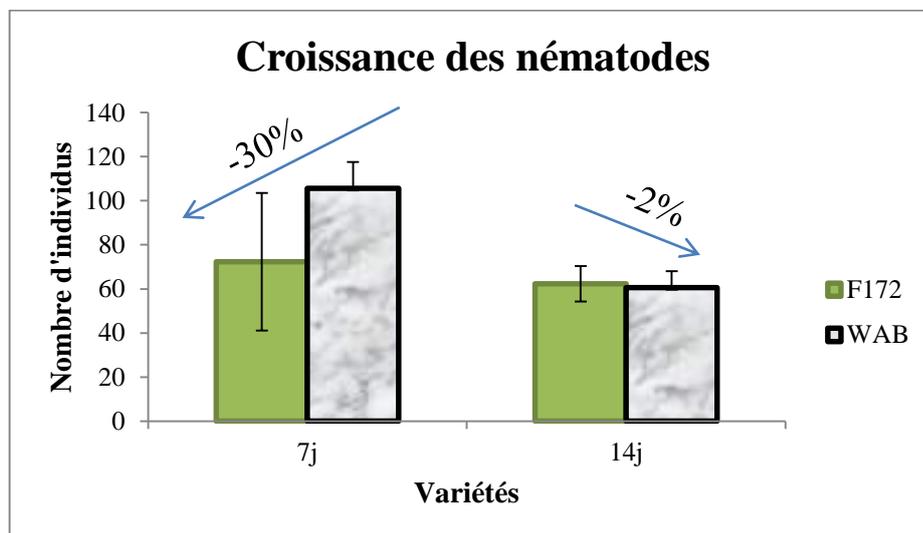


Figure 27 Test de croissance des nématodes pour les deux variétés les plus contrastantes

Après 7 jours de croissance et après avoir inoculés environ 6 nématodes par compartiment, 72 individus de nématodes ont été comptés dans la variété *F172* et 106 individus de nématodes dans la variété *WAB*, soit une différence de 30% de moins entre les deux variétés. Le nombre d'individus recensés a diminué après 14 jours dans les deux variétés : 62 individus de nématodes dans *F172*, soit une diminution de 14% au nombre recensé au 7^e jour et 60 individus dans *WAB*, soit une diminution de 43% au nombre recensé au 7^e jour. D'ailleurs, il existe 2% de différence entre les deux variétés au 14^e jour avec un renversement d'ordre. Le test paramétrique pour deux échantillons a été utilisé (test t-Student) pour traiter les résultats. L'intervalle de confiance est de 95%, $\alpha = 0,05$ et $p = 0,159$. Donc $p > \alpha$, les moyennes ne sont pas significativement différentes.

IV. DISCUSSION

IV.1. Relations entre géotypes et écologie des huit variétés de riz pluvial

IV.1.1. Effet de la défaunation

La faune du sol procure des nutriments qui vont être absorbés par les racines des plantes. En prélevant les éléments minéraux suffisants, les plants de riz produisent des petites racines et des biomasses aériennes. En procédant à la défaunation du sol, ces processus vont être perturbés, les racines iront plus loin pour trouver les éléments nutritifs nécessaires pour la croissance de la plante. Ainsi les effets attendus par cette manipulation sont des biomasses racinaires élevées et des biomasses aériennes faibles. Les variétés sensibles à la défaunation doivent répondre ainsi. Les variétés *CD*, *F152*, *F154*, *B22* et *N4* suivent cette norme, sachant que *F152* et *F154* sont très proches génétiquement. Par contre la variété *F182* ne suit pas ce rythme, elle s'affirme aussi être peu sensible en biomasse aérienne et non sensible (la dernière) en biomasse racinaire (Figure 22)

L'effet de la défaunation a été évalué au niveau des biomasses (aériennes et racinaires) et non sur les hauteurs des plantes puisqu'elle met en valeur l'acquisition des nutriments due aux nématodes du sol. La biomasse aérienne est ainsi représentée parce que c'est la partie aérienne de la plante qui reçoit la lumière pour faire la photosynthèse. Tant que la plante effectue de la photosynthèse, et que les nutriments sont disponibles dans le sol, la plante accroît en biomasse aérienne. Les variétés *F152*, *WAB*, *F172* et *CD* sont sensibles à cette défaunation en termes de biomasses aériennes (justifiés par les Figures 22(A) et 22(B)). Plus le ratio « biomasse aérienne sol natif » sur « biomasse aérienne sol défauné » est élevé, plus la variété est sensible à la défaunation.

La biomasse racinaire est aussi représentée pour mesurer la capacité des plantes à explorer le sol pour acquérir les nutriments nécessaires à leur croissance. En termes de partie racinaire, les variétés *CD*, *F152*, *F154* et *WAB* sont les plus sensibles à la défaunation.

Si on récapitule, les deux variétés qui sont les plus sensibles à la défaunation tant en biomasses aériennes que racinaires alors qu'elles ont des biomasses élevées dans des conditions naturelles sont le *FOFIFA 152*, *FOFIFA 154* (qui ont un fort lien de parenté), et *Chomrong Dhan* et *WAB 880*.

Dans l'arbre phylogénétique (à part le *F152* et *F154*), ces quatre variétés ne sont pas liées génétiquement donc leur sensibilité dépend surtout du milieu écologique et de la présence de la faune du sol proprement dite.

IV.1.2. Effet de l'amendement NPK

En fertilisant le sol avec une solution NPK dans les traitements, on doit s'attendre à l'annulation des effets des nématodes du sol et à l'annulation de l'exploration des racines. C'est le cas observé chez la variété *F152*, la variété la plus sensible en termes de biomasses aériennes et la moins sensible en biomasses racinaires. La raison est qu'elle va consacrer toute l'énergie qu'elle acquerra à la photosynthèse dans ses biomasses aériennes.

La variété *WAB* se rétracte de cette règle. Tant que le sol est fertilisé de NPK elle a des biomasses aériennes élevées et continue à faire des racines. Cette variété va donc émettre plus de carbone que l'autre variété (*F152*). Ainsi cette variété va intensifier la boucle microbienne du sol.

Quelques variétés sont aussi sensibles à la fertilisation malgré qu'ils aient des biomasses élevées en conditions naturelles à savoir le *F182* en biomasse aérienne et *F154* en biomasse racinaires. Sachant que la variété *F154* possède le plus grand nombre de nématode dans un sol natif (résultat présenté en annexe) elle est sensible au NPK. On peut ainsi conclure que les biomasses du *F154* nécessitent une grande quantité de nutriment que ce soit venant des nématodes du sol ou de l'apport de fertilisation.

Les variétés *F152* et *F154* sont très proches génétiquement si bien qu'elles partagent à peu près les mêmes traits dans les différentes interventions entreprises (défaunation et fertilisation) leurs traits phénotypiques sont donc liées à leur parenté génétique. La variété *N4* quand à elle ne répond ni à la défaunation ni à la fertilisation les résultats de l'ACP la classe dans une catégorie différente des autres. Pourtant génétiquement, elle est très proche du *WAB* qui agit différemment. Malgré cette différence de comportement vis-à-vis de la faune du sol ou de la fertilisation ces deux variétés ne peuvent pas être prises comme les deux variétés les plus contrastantes.

Ces résultats montrent que la ressemblance phénotypique n'est pas équivalente à la ressemblance génétique. A part le *F152* et *F154* les autres variétés agissent différemment et indépendamment des liens génétiques.

IV.2. Classement des variétés à partir de l'ACP

L'Analyse en Composantes Principales nous a permis de dégager 4 grandes classes pour les huit variétés : classe des variétés répondante à la faune du sol et au NPK, classe des variétés répondantes à la faune du sol, classe des variétés intermédiaires et classes des variétés non répondante à la faune du sol et au NPK.

L'axe 1 est essentiellement expliqué par la capacité de la plante à pousser dans un sol natif, c'est-à-dire les variétés qui font beaucoup de biomasses racinaires, qui ont des graines larges et un ratio (Longueur/largeur) faible et un taux de germination faible. Les graines de *F152*, *CD*, *F154* sont donc petites mais larges, elles ont aussi beaucoup de biomasses aériennes qui leur font des biomasses totales estimables. La variété *Nerica 4* a la plus petite graine de toutes les variétés puisqu'elle est complètement opposée à la longueur des graines sur la matrice de corrélation. Par contre *F152* et *F154* comme elles sont toujours proches (génétique et phénotype), elles sont encore très bien corrélées à la longueur et largeur des graines. *WAB* est corrélée positivement à la longueur des graines et *N4* est corrélée négativement. Ceux-ci coïncident avec notre conclusion de relation entre génotype et biomasses.

F152 est corrélée négativement à toutes les variables de l'axe 1 : longueur des graines, sensibilité au NPK, hauteur, poids des graines,...). Elle a donc des petites graines légères, une hauteur faible et n'est pas sensible au NPK. Notre précédent résultat (Figure 23 B et D) nous a montré qu'elle est sensible au niveau aérienne mais non sensible au niveau racinaire. Contrairement à *WAB* et *B22* qui répondent positivement à ses variables. Elles ont des grosses graines, des hauteurs élevées et sont sensibles à la fois à la défaunation et au NPK. Génétiquement parlant ces deux variétés ne présentent aucun lien de parenté.

La sensibilité à la faune est intermédiaire. 5 variétés sont répondantes à la faune du sol avec 2 autres critères combinés avec :

- Répondante avec NPK : *WAB* et *B22*
- Répondante sans NPK : *F152*, *CD*, *F154*

L'effet de la faune du sol est peut être lié à la libération de nutriments par les organismes du sol comme l'impact du *WAB* et *B22* car l'ajout de NPK donne des effets positifs. Elle peut être aussi liée à d'autres mécanismes non nutritionnels pour les 3 autres

variétés (*F152*, *CD*, *F154*) telle que la libération d'hormones, de vitamines ou une modification des paramètres physico-chimiques du sol.

F172 est une variété peu répondante à la faune du sol avec un taux de germination élevé et un ratio, un shoot-root élevé. La variété *N4* résistante au STRIGA est une variété peu sensible aux interactions biologiques pathogènes mais aussi d'après nos études peu sensible aux interactions biologiques mutualistes. C'est une variété qui ne répond aucunement à la biologie du sol que ce soit agresseurs ou mutualistes. Les raisons de cette tolérance sont encore à déterminer mais du point de vue agronomique et agro écologique, elle ne va pas favoriser la boucle microbienne du sol donc elle n'attirera pas et ne favorisera pas la croissance des nématodes bactéricivores du sol. Vu que cette variété est liée génétiquement à la variété *WAB*, les deux variétés choisies pour les prochains tests sont donc le *WAB 880* et *F172*. Le tableau suivant résume nos critères

Tableau 4 : Critères de sélection des deux variétés les plus contrastantes

Critères	<i>WAB 880</i>	<i>F 172</i>
Lien de parenté	Aucun	
Hauteur	La plus élevée	La moins élevée
Biomasses	Normales	Faibles
Défaunation	Sensible	Peu sensible
Fertilisation NPK	Sensible	Peu sensible
Classification	Variété la plus favorable	Variété la plus défavorable

La figure suivante résume les relations entre phénotype et génotype des huit variétés avec les 4 classes mis en exergue par l'ACP et une classification hiérarchique sur les composantes ACP.

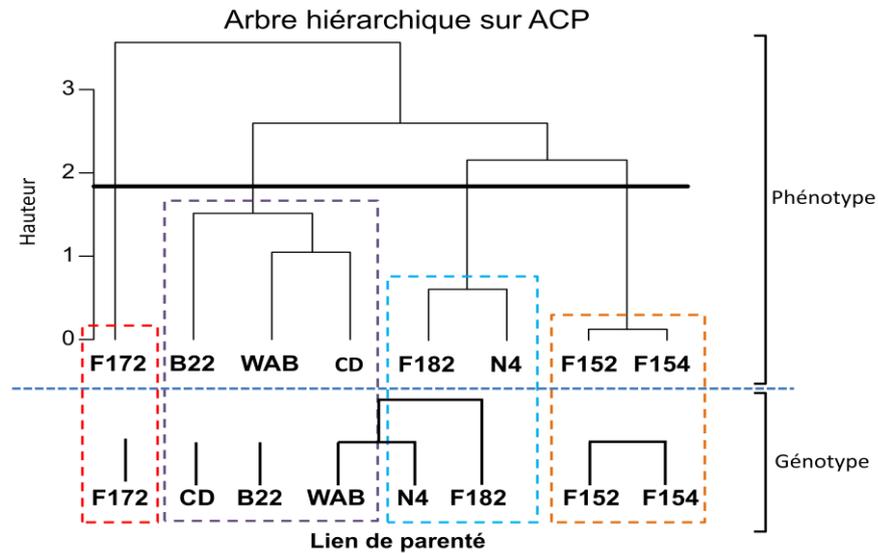


Figure 28 : Relation entre génotype et phénotype des variétés

IV.3. Effets des rhizosphères des deux variétés les plus contrastantes sur l'attractivité des nématodes bactériovores du sol

Le principe de cette expérience est que le carbone sert de nourriture pour les bactéries qui sont les proies des nématodes bactériovores. Du fait que le tégument des nématodes bactériovores est imbibé de bactéries, ceux-ci arriveront bien à vivre dans un milieu où il y a abondance de carbone (agar). Mais l'agarose n'en contient plus, donc les nématodes bactériovores inoculés dans l'agarose sont obligés de se déplacer pour chercher de la nourriture. Le déplacement des nématodes sera donc mesurer à l'aide de la ligne équidistante. La préférence des nématodes était mesurée à chaque éloignement de la ligne.

Durant les manipulations et les analyses effectués, environ 18% (en masse) des sols de départ se sont transformés en sol adhérent aux racines. Les tests d'attractivité ont montré que la variété *F172*, malgré sa faible biomasse et ses difficultés à croître dans différentes conditions, est plus attractive que la variété *WAB 880*. Sachant que les nématodes bactériovores sont attirés plus précisément par le dioxyde de carbone (CO_2) dégagé par les bactéries *E. colis*, nous pouvons supposer que les composés libérés par les racines de *F172* peuvent nourrir les bactéries rhizosphériques. C'est la raison pour laquelle les nématodes sont attirés. Pourtant la forte potentialité du *WAB880* à croître plus que les autres est liée à la présence des organismes du sol (Figure 22), et également aux nématodes du sol (résultat non présenté).

IV.4. Effet des rhizosphères des deux variétés les plus contrastante sur la croissance des nématodes bactérivores du sol

Après 7 jours de croissance 72 individus de nématodes ont été comptés dans la variété *F172* et 106 individus de nématodes dans la variété *WAB*, soit une différence de 30% entre les deux variétés. Ceci justifie que le *WAB* offre un bon milieu écologique pour les nématodes bactérivores et que le *F172* n'offre pas. Certes le nombre d'individus recensé a diminué après 14 jours dans les deux variétés : 62 individus de nématodes dans *F172*, soit une diminution de 14% au nombre recensé au 7^e jour et 60 individus dans *WAB*, soit une diminution de 43% au nombre recensé au 7^e jour). Cette diminution est liée à la diminution du nombre de bactérie au cours du temps : les proies diminuent donc le nombre de nématode diminue.

La variété *WAB 880* favorise donc la croissance des nématodes mais pas leur attraction. En revanche, la variété *F172* attire les nématodes mais ne favorise pas leur croissance, ce qui peut expliquer la faible biomasse de cette variété dans le sol natif. La résidence et l'attractivité des nématodes sont donc expliquées par des phénomènes écologiques à déterminer.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusion

Nos questions de recherche de départ étaient de déterminer si les variétés de riz pluvial sélectionnées par les agronomes sont capables d'attirer les nématodes bactériovores du sol. Sachant que la variété *Chomrong Dhan* est très répandue à Madagascar en terme de riziculture pluviale, nos études nous ont permis d'en déduire que *WAB 880* est une variété qui pousse le mieux et qui a des biomasses élevées mais ses sols adhérents n'attirent pas les nématodes bactériovores du sol. Tandis que la variété *F172*, qui n'arrive pas à s'accroître comme les autres et qui a des faibles biomasses, a des sols adhérents qui attirent les nématodes bactériovores des sols. Nous pouvons en déduire ainsi que **les variétés de riz pluvial sélectionnées par les agronomes seront capable ou non d'attirer les nématodes bactériovores du sol**. Cette conclusion valide ainsi notre première hypothèse que « l'attractivité des nématodes bactériovores varie selon les variétés de riz pluvial »

Notre deuxième question était de savoir si la rhizosphère des différentes variétés du riz favorise la croissance des populations de nématodes bactériovores. Notre expérience nous a démontrée que les deux variétés les plus contrastantes ont favorisé la croissance des nématodes bactériovores mais pas de la même façon. La variété la plus favorable en termes de croissance en hauteur et en biomasse a favorisé une croissance estimable des nématodes soit dix sept fois de plus que les nématodes injectés au début de nos expérimentations. L'autre variété *F172* a aussi favorisé la croissance mais elle reste faible comparée à l'autre variété, les différences significatives des tests statistiques l'ont aussi confirmé. Aussi cette variété a des faibles biomasses et une croissance moins élevée puisque les nématodes sont attirés par ses sols adhérents mais ne se multiplient pas. Ainsi, notre deuxième hypothèse formulant que « les nématodes bactériovores favorisent la croissance de certaines variétés de riz pluvial » est aussi validée. Il est donc possible de dire que **la rhizosphère de certaines variétés de riz pluvial favorise la croissance des populations de nématodes bactériovores**.

Perspectives

Les résultats obtenus durant ce travail permettent d'envisager plusieurs perspectives.

(1) Dans ce stage, nous nous sommes attachés à l'effet des variétés sur les nématodes bactérivores. Or, en retour, les nématodes bactérivores sont connus pour avoir un effet sur les plantes (Trap et al., 2015). Une perspective majeure de cette première étude serait de tester l'effet des nématodes sur la croissance et la nutrition des différentes variétés dans des expériences de co-inoculation au laboratoire. Cette perspective est une pièce manquante importante dans notre ambition de vouloir exploiter les interactions entre les nématodes bactérivores et la croissance des riz pluviaux. Nous avons tenté durant le stage de combler cette lacune. Néanmoins, les résultats n'ont pas été exposés car le taux de survie des nématodes n'a pas été satisfaisant. Nous avons effectué plusieurs expériences simultanément dû à la contrainte de la durée du stage sans avoir l'occasion de vérifier le taux de survie des nématodes. C'est au jour de comptage (2 jours après arrêt de manipulation) que nous nous sommes rendu compte qu'il fallait effectuer les croissances dans une chambre climatique qui ne serait pas affecté par le changement brusque du climat actuel. Pour ce faire, des nouveaux matériels sont sollicités pour la régulation de la lumière à l'exemple de Néon.

(2) Nous avons cependant observé que seule la variété *Chomrong Dhan* permet une survie satisfaisant des nématodes. En effet, une dizaine d'individus a été comptés à la fin de la manipulation. Les raisons pour lesquelles les nématodes survivent dans la rhizosphère de cette variété nous sont inconnus. Il serait donc intéressant d'effectuer des tests d'attractivité et de croissance pour cette variété. Et cela n'empêche pas d'effectuer les tests pour les autres.

(3) Une troisième perspective est de décortiquer le milieu écologique des nématodes dans les sols rhizosphériques de *WAB* puisqu'il n'attire pas les nématodes comparée à la variété la plus défavorisée *F172* alors qu'elle est sensible à la faune du sol et à la fertilisation NPK.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Blanchart E., Lavelle P., Bernard L., *La vie dans le sol*, Le journal de l'IRD, avril/mai 2012, 2 pages
- Bonkowski, M., Villenave, C., Griffiths, B., 2009. *Rhizosphere fauna: the functional and structural diversity of interactions of soil fauna with plant roots*. Plant and soil 321, 213-233
- Bourgeat F. et Aubert G., 1971. Les sols ferrallitiques à Madagascar. ORSTOM. Centre de Tananarive Madagascar. Sciences de la Terre.
- Byerly, L., Cassada, R. C., Russell, R. L., 1976. *Life-Cycle of Nematoda Caenorhabditis-Elegans.1. Wild-Type Growth and Reproduction*. Developmental Biology 51, 23-33.
- Clarholm, M. 1985, *Interactions of bacteria, protozoa and plants leading to mineralization of soil nitrogen*. Soil Bio.Biochem 17, 181-187
- Clarholm, M, 2005. *Soil protozoa: an under-researched microbial group gaining momentum*. Soil Biology and Biochemistry 37, 811–817.
- DP SPAD (Système de Production d'Altitude Durable), Antsirabe
- Duchaufour P., 1954. *Propriétés des complexes humiques dans différents types de sols*. Science de l'ingénieur. Montpellier.
- Hugot, J. P., 2002. *Changes in numbers of publications on the main groups of Nematoda and Helminthes between 1971 and 1995*. Nematology 4, 567-571.
- Kuikman, P. J., Jansen, A. G., Van Veen, J. A., 1991. *¹⁵N-Nitrogen mineralization from bacteria by protozoan grazing at different soil moisture regimes*. Soil Biology and Biochemistry 23, 193-200
- MAEP, GSDM, SDMad, 2007. Mise en place de collection généalogique et de collections testées. Rapport final, Catalogue des variétés. 111 p.
- MAEP, 2005 - Enquête annuelle sur la production agricole, service statistique agricole, campagne 2004-2005, 9-12 pages.
- Pande H.K., 1997 - Systèmes améliorées de riziculture pluviale, DPV, 121 pages.

Razafimandimby S., Dabat M.H., Ratsisetraina Z., Ramanantsoanirina A., 2008. Pratiques paysannes en riziculture aquatique sur les hautes terres malgaches : Quelle logique de gestion des risques face à la contrainte de maîtrise de l'eau? Document de travail BV lac n° 8.18p.

Ritz, K., Trudgill, D. L., 1999. *Utility of nematode community analysis as an integrated measure of the functional state of soils: perspectives and challenges*. Plant and Soil 212

Somasundaram S., Bonkowski, M., Lijima M., 2008, *Functional Role of mucilage-Border cells: A complex facilitating protozoan effects on plant growth*, Graduate school of bioagricultural sciences, Nagoya University, Japan

U.S. Census Bureau, 2012. Statistical Abstract of the United States. 836-838.

Usman IRSHAD, décembre 2011, *Relation trophiques dans la rhizosphère : effet des interactions entre champignon ectomycorhizien, bactéries et nématodes bactéricivores sur le prélèvement minéral du Pin maritime (Pinus pinaster)*, Ecole doctorale Montpellier SupAgro

Villenave C., Ekschmitt, K., Nazaret, S., Bongers, T., 2004. *Interactions between nematodes and microbial communities in a tropical soil following manipulation of the soil food web*. Soil Biology and Biochemistry 36, 2033-2043.

Villenave C., A. Oumar Ba, B. Rabary, 2009. *Analyse du fonctionnement biologique du sol par l'étude de la nématofaune : semis direct versus labour sur les hautes terres près d'Antsirabe Madagascar.*, IRD UMR Eco-Sols, FOFIFA

Villenave C., Irshad, U., Brauman, A., Plassard, C., 2011. *Grazing by nematodes on rhizosphere bacteria enhances nitrate and phosphorus availability to Pinus pinaster seedlings*. Soil Biology and Biochemistry, 43, 2121-2126.

WEBOGRAPHIE

http://www.ricehub.org/MG/ankazomiriotra/LANG_PATH?lang=fr (07/12/15)

http://www.routard.com/photos/madagascar/30960-la_riziculture_irriguee.htm (07/12/15)

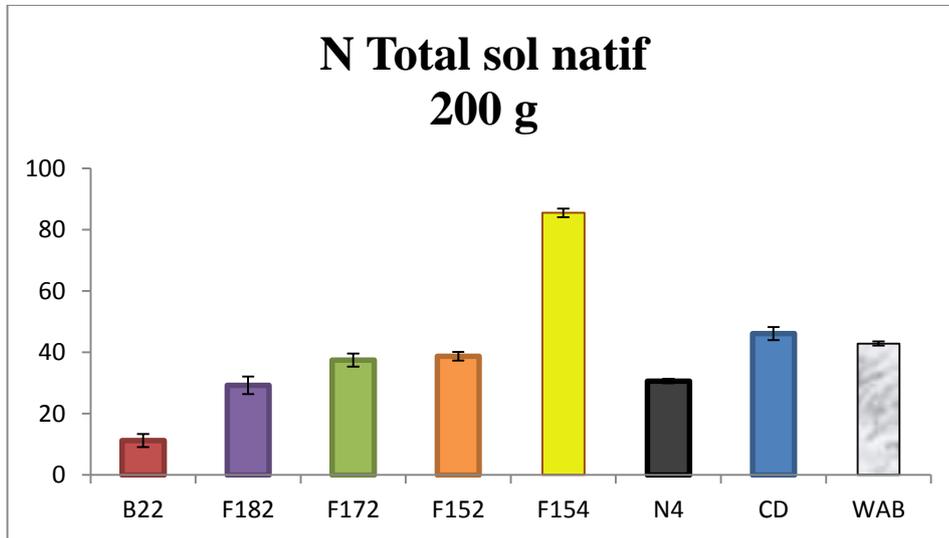
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Riz> (22/10/15)

<http://www.aquaportail.com/> (11/11/15)

ANNEXE

Les nombre de nématodes recensés à la fin de chaque manipulation sont représentés par les trois figures suivantes

- Nématodes dans le sol natif venant de Lazaina



- Nématodes recensés à la fin de la manipulation de défaunation

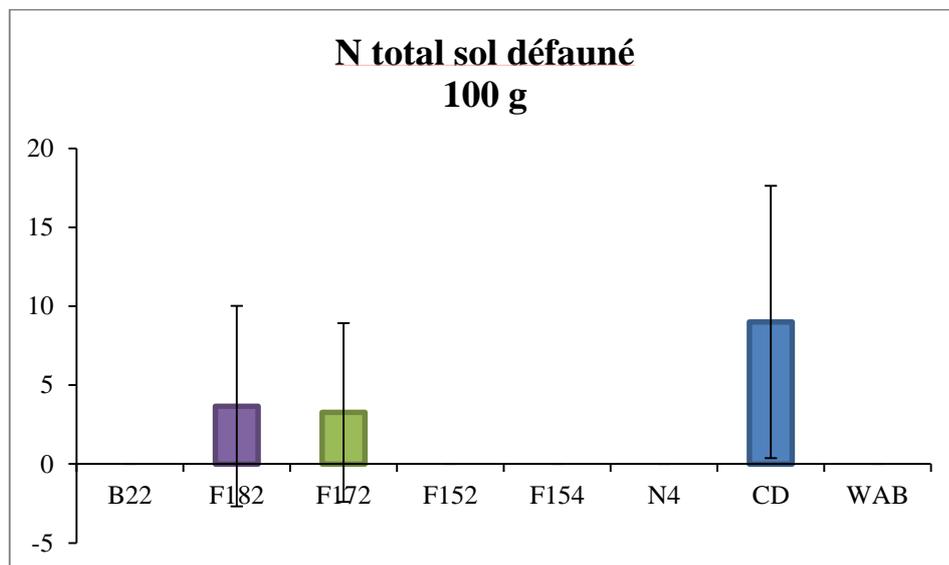


Table des matières

AVANT-PROPOS	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES	iii
LISTE DES ILLUSTRATIONS	iv
LISTE DES UNITES ET SYMBOLES	v
LEXIQUE	vi
RESUME	vii
SOMMAIRE	viii
INTRODUCTION	1
I. ETAT DE L'ART	4
I.1. Le riz pluvial à Madagascar	4
I.1.1. Description et caractéristique	4
I.1.2. Systèmes de riziculture à Madagascar	5
I.2. Les nématodes	7
I.2.1. Morphologie et reproduction	7
I.2.2. Ecologie	7
I.2.3. Classification taxonomique et fonctionnelle	8
I.2.4. Les nématodes bactérivores	9
II. MATERIELS ET METHODES	10
II.1. Dispositif expérimental et échantillonnage du sol	10
II.1.1 Zone de prélèvement des sols	10
II.1.2. Traitement des sols	11
II.2. Matériels biologiques	12
II.2.1. Les variétés de riz	12
II.2.2. Les nématodes bactérivores	13

III

II.3. Phénotypage des variétés pour la sélection des 2 variétés contrastantes	14
II.3.1. Mesure des traits phénotypiques des graines	14
II.3.2. Mesure des traits de croissance dans un sol natif.....	17
II.3.3. Mesure des traits de sensibilité à la faune et aux nutriments	18
II.4. Expérience d'attractivité et de croissance des nématodes bactérivores.....	21
II.4.1. Echantillonnage des sols adhérents aux racines.....	21
II.4.2. Test d'attractivité	22
II.4.3. Test de croissance des nématodes	23
II.5. Tests statistiques	24
III. RESULTATS.....	25
III.1. Phénotypage des huit variétés de riz pluvial.....	25
III.1.1. Traits phénotypique des graines	25
III.1.2. Traits de croissance dans un sol natif	26
III.1.3. Traits de sensibilité à la faune et aux nutriments.....	28
III.1.4. Analyse en composante principale (ACP).....	30
III.2. Test d'attractivité et de croissance.....	32
III.2.1. Test d'attractivité	32
III.2.1. Test de croissance	33
IV. DISCUSSION.....	34
IV.1. Relations entre génotypes et écologie des huit variétés de riz pluvial	34
IV.1.1. Effet de la défaunation.....	34
IV.1.2. Effet de l'amendement NPK	35
IV.2. Classement des variétés à partir de l'ACP	36
IV.3. Effets des rhizosphères des deux variétés les plus contrastantes sur l'attractivité des nématodes bactérivores du sol.....	38
IV.4. Effet des rhizosphères des deux variétés les plus contrastante sur la croissance des nématodes bactérivores du sol.....	39
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	40

Conclusion	40
Perspectives	41
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	42
ANNEXE.....	I