



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DEPARTEMENT AGRICULTURE

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome
Option Agriculture

Effet de la nutrition azotée sur la pyriculariose du riz pluvial dans la région de Vakinankaratra



Soutenu publiquement le 20 Août 2012

Par RANDRIANANDRASANA Lalaina Norotiana

Devant les membres du jury composé de :

- Président : RAKOTONDRAVELO Jean Chrysostôme
- Maître de stage : RAVELOSON Harinjaka
- Examineur : RANDRIAMAMPIONONA Denis
- Tuteur : RAFALIMANANA Halitiana Josée



*« ...Tsy ny Fahombiazana no valiako soa fa ny Faharetana sy ny Fahasahiranana
noho ny amiko... »*

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pu être achevé sans la bénédiction de Dieu qui nous a donné la santé, la force et le courage.

Nous adressons tous nos sincères remerciements à :

- ✿ Monsieur RAKOTONDRAVELO Jean Chrysostôme, Docteur en Agro-économie, Chef du Département Agriculture, d'avoir fait le grand honneur de présider le jury.
- ✿ Monsieur RANDRIAMAMPIONONA Denis, Enseignant chercheur à l'ESSA, d'avoir accepté de siéger parmi les membres du jury en tant qu'examineur et d'avoir apporté des critiques constructives pour améliorer la qualité de ce mémoire.
- ✿ Monsieur RAVELOSON Harinjaka, Assistant de Recherche en Phytopathologie au sein du FOFIFA Antsirabe, d'avoir fait l'honneur d'être l'encadreur professionnel, d'avoir assuré les encadrements sur terrain et partagé vos connaissances et vos expériences tout au long de ce travail.
- ✿ Madame RAFALIMANANA Halitiana Joséa, Docteur Ingénieur, Maître de Conférences, Enseignante chercheur à l'ESSA, d'avoir fait le grand privilège d'être l'encadreur pédagogique de ce travail et d'avoir consacré beaucoup de temps dans l'accomplissement de ce mémoire.

Veillez trouver ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous remercions également :

- ✿ Madame DUSSERE Julie, Docteur en Ecophysiologie, Chercheur du CIRAD, de nous avoir accueilli au sein de l'Unité de recherche URP-SCRiD et d'avoir apporté des conseils judicieux voire pertinents et des recommandations utiles pour mener à bien ce stage.
- ✿ Madame SESTER Mathilde, Docteur en Epidémiologie, Chercheur du CIRAD, d'avoir contribué aux encadrements techniques et d'avoir donné des conseils et des instructions pour la rédaction de ce mémoire.

- CIRAD, FOFIFA Antsirabe et le Projet GARP pour avoir fourni les matériels et l'appui financier pour la réalisation de ce travail.
- Tous les Techniciens et mains d'œuvre à Andranomanelatra et à Ivory pour les travaux de terrain effectués dans les sites d'expérimentation.
- Toute l'équipe pédagogique de l'ESSA de nous avoir formé durant ces cinq années d'études et de nous avoir préparé à être des ingénieurs agronomes.
- Tout le personnel des bibliothèques de l'ESSA, du CITE, du FOFIFA et d'autres organismes
- Ma mère, ma sœur, Aiméline, Hoby et Daniel, de m'avoir donné le courage et d'avoir toujours été présent près de moi pour me soutenir durant la réalisation de ce mémoire.

Veillez trouver ici le témoignage de notre estime et nos remerciements les plus distingués.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance avec nos meilleures considérations à tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Que Dieu vous bénisse

Lalaina.

RESUME

Dans la région de Vakinankaratra, la riziculture pluviale tient une place importante dans la production rizicole. Cependant, elle est confrontée à divers contraintes biotiques dont la principale est la pyriculariose. C'est une maladie fongique causée par *Magnaporthe oryzae*. Nous avons effectué des expérimentations en plein champ à Andranomanelatra et à Ivory. Elles ont pour but de déterminer les effets de la nutrition azotée sur la pyriculariose du riz pluvial. Dans ces deux sites d'expérimentation, nous avons étudié trois facteurs à savoir le système de culture, la fertilisation azotée et les variétés de riz pluvial. Il en ressort que la fertilisation azotée favorise la maladie dans le système labour. Par contre, le système SCV régule l'offre en azote et l'attaque de maladie est atténuée dans ce système. Les rendements obtenus sont toutefois meilleurs en labour par rapport au SCV. Cette étude a permis de mettre en évidence l'intérêt de la gestion de la nutrition azotée par le système de culture dans la lutte contre la pyriculariose.

Mots clés : Andranomanelatra, Ivory, labour, nutrition azotée, pyriculariose, SCV.

ABSTRACT

In the region of Vakinankaratra, upland rice crop holds a significant place in rice production. However, this crop faces several constraints whose primary rice blast. This is a fungal disease caused by *Magnaporthe oryzae*. We conducted in field experiments in Andranomanelatra and in Ivory to determine the effects of nitrogen nutrition on rice blast. In the two sites of experimentation, we used three factors such as cultural system, nitrogen fertilization and variety of upland rice. Nitrogen fertilization promotes disease in conventional cropping system with tillage. While, the no-till cropping system regulates the nitrogen income from the soil, and the symptoms increase slightly in this system. However, higher or equivalent yields were obtained in conventional cropping system with tillage than in no-till cropping systems. This study has highlighted the importance of the management of the nitrogen nutrition by the cropping system to reduce the impact of the disease.

Keywords: Andranomanelatra, Ivory, rice blast, nitrogen nutrition, cropping system, tillage, direct seeding.

Sommaire

SOMMAIRE

LISTE DES ILLUSTRATIONS	i
ABREVIATIONS	iii
SYMBOLES CHIMIQUES	iv
SIGLES	iv
GLOSSAIRE	v
INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE	3
1.1. Riz pluvial à Madagascar	3
1.1.1. Classification et description morphologique	3
1.1.2. Cycle du riz et élaboration du rendement	3
1.1.3. Systèmes de riziculture à Madagascar	4
1.1.4. Riz pluvial à Madagascar	5
1.1.5. Contraintes de production du riz pluvial à Madagascar	5
1.2. Pyriculariose	6
1.2.1. Historique et répartition	6
1.2.2. Biologie de <i>Magnaporthe oryzae</i> et cycle d'infection foliaire	7
1.2.3. Conditions de développement de l'épidémie de la pyriculariose	8
1.2.4. Dégâts sur la plante	8
1.2.5. Méthodes de lutte	10
1.3. Nutrition azotée du riz	10
1.3.1. Azote	10
1.3.2. Carence et excès en azote	11
1.3.3. Méthodes de mesure de la teneur en azote de la plante	11
1.4. Impacts du système de culture sur la pyriculariose	13
1.4.1. Cas de la rotation culturale	13
1.4.2. Cas de la densité de semis	14
1.4.3. Cas du mode de gestion du sol	14
1.4.4. Cas de la fertilisation azotée	14

1.5. Cadre général de l'étude.....	15
1.5.1. Projet GARP.....	15
1.5.2. Problématique et hypothèses de recherche	16

DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES.....17

2.1. Sites d'expérimentation.....	17
2.2. Mise en place des dispositifs	18
2.3.1. Dispositif d'Andranomanelatra	18
2.3.2. Dispositif d'Ivory	22
2.3. Mesures	25
2.3.1. Prélèvements en cours de cycle.....	25
2.3.2. Suivis épidémiologiques	27
2.3.3. Rendement et composantes du rendement.....	28
2.4. Analyses statistiques	28

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....29

3.1. Effets du système de culture et de la fertilisation azotée sur le dispositif d'Andranomanelatra	29
3.1.1. Paramètres de croissance du riz.....	29
3.1.2. Statut azoté du riz	31
3.1.3. Pyriculariose foliaire et pyriculariose paniculaire.....	32
3.1.4. Rendement et composantes du rendement.....	33
3.1.5. Relations entre rendement, notations de pyriculariose, indicateurs du statut azoté et paramètres de croissance	34
3.2. Effets du système de culture et de fertilisation azotée sur le dispositif d'Ivory.....	36
3.2.1. Paramètres de croissance du riz.....	36
3.2.2. Statut azoté du riz	38
3.2.3. Pyriculariose foliaire et pyriculariose paniculaire.....	39
3.2.4. Rendement et composantes du rendement.....	40
3.2.5. Relations entre rendement, notations de pyriculariose, indicateurs du statut azoté et paramètres de croissance	42

QUATRIEME PARTIE : DISCUSSIONS43

4.1. Bilan sur les effets du système de culture et de la fertilisation azotée sur les dispositifs d'Andranomanelatra et d'Ivory 43

 4.1.1. Sur le dispositif d'Andranomanelatra 43

 4.1.2. Sur le dispositif d'Ivory 44

4.2. Discussions sur les effets du système de culture et de la fertilisation azotée dans les deux sites d'expérimentation..... 45

 4.2.1. Effet du système de culture sur la pyriculariose et le rendement 45

 4.2.2. Effet du niveau de sensibilité de la variété sur la pyriculariose et le rendement 45

 4.2.3. Effet de la fertilisation azotée sur la pyriculariose et le rendement 45

 4.2.4. Analyse comparative des deux sites d'expérimentation 47

4.3. Analyse de la méthodologie 48

CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....50

REFERENCES.....52

ANNEXES

Liste des illustrations

LISTE DES ILLUSTRATIONS

- **Listes des figures**

Figure 1 : Symptômes de pyriculariose.....	9
Figure 2 : SPAD.....	12
Figure 3 : Dualex.....	13
Figure 4 : Courbe Ombrothermique de Gaussen pour la campagne de riziculture pluviale de 2011-2012 à Andranomanelatra (a) et à Ivory	17
Figure 5 : Dispositif d'Andranomanelatra.....	20
Figure 6 : Dispositif d'Ivory.....	23
Figure 7 : Prélèvements au cours du cycle, suivis épidémiologiques, carré de rendement et composantes du rendement du riz à Andranomanelatra et à Ivory	27
Figure 8 : Evolution de la biomasse aérienne pour les variétés sensible F154 (a) et moyennement sensible F161 (b) à Andranomanelatra.....	29
Figure 9 : Evolution du nombre de talles par m ² pour les variétés sensible F154 (a) et moyennement sensible F161 (b) à Andranomanelatra.....	30
Figure 10 : (a) Pyriculariose foliaire (94 JAS) et (b) Pyriculariose paniculaire (128 JAS) pour les variétés sensible F154 et moyennement sensible F161 à Andranomanelatra.....	33
Figure 11 : Rendement en grain de paddy des trois variétés à Andranomanelatra.....	33
Figure 12 : Evolution de la biomasse aérienne pour les variétés sensible F154 (a) et moyennement sensible B22 (b) à Ivory.....	36
Figure 13 : Evolution du nombre de talles par m ² pour les variétés sensible F154 (a) et moyennement sensible B22 (b) à Ivory.....	37
Figure 14 : (a) Pyriculariose foliaire (70 JAS) et (b) Pyriculariose paniculaire (102 JAS) pour les variétés sensible F154 et moyennement sensible B22 à Ivory.....	39
Figure 15 : Rendement en grain de paddy des trois variétés à Ivory.....	40

- **Liste des tableaux**

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des prélèvements effectués à Andranomanelatra et à Ivory (AvDF : Avant Dernière Feuille, FP : Feuille Paniculaire).....	26
Tableau 2 : Valeurs SPAD et Dualex NBI en fonction du stade de développement du riz pour les variétés sensible F154 et moyennement sensible F161 à Andranomanelatra.	31
Tableau 3 : Composantes du rendement des trois variétés à Andranomanelatra.	34
Tableau 4 : Tableau des corrélations entre les différents paramètres mesurés pour les variétés sensible F154 (a) et moyennement sensible F161 (b) à Andranomanelatra.....	35
Tableau 5 : Valeurs SPAD et Dualex NBI en fonction du stade de développement du riz pour les variétés sensible F154 et moyennement sensible B22 à Ivory.	38
Tableau 6 : Composantes du rendement des trois variétés à Ivory.....	41
Tableau 7 : Tableau des corrélations entre les différents paramètres mesurés pour les variétés sensible F154 (a) et moyennement sensible B22 (b) à Ivory.....	42

- **Liste des annexes**

Annexe 1 : Classification du riz	I
Annexe 2 : Cycle du riz, composantes des rendements élaborées et période de formation de ces composantes au cours du cycle du riz	I
Annexe 3 : Répartition de la pyriculariose du riz à Madagascar.....	II
Annexe 4 : Cycle d'infection foliaire de la pyriculariose du riz	II
Annexe 5 : Caractéristiques des plantes de couverture.....	III
Annexe 6 : Sun Scan.....	III
Annexe 7 : Méthode d'estimation de l'importance de l'épidémie de pyriculariose.....	IV
Annexe 8 : Vers blancs.	V

ABREVIATIONS

ANR	:	Agence Nationale de Recherche
ASJA	:	Athénée Saint Joseph Antsirabe
AvDF	:	Avant Dernière Feuille
CITE	:	Centre d'Information Technique et Economique
CIRAD	:	Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement
CTA	:	Centre Technique de coopération Agricole et rural
DPV	:	Direction de la Protection des Végétaux
ESSA	:	Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
F154	:	Variété FOFIFA 154
F161	:	Variété FOFIFA 161
F172	:	Variété FOFIFA 172
FOFIFA	:	FOibe Fikarohana ampiharina amin' ny FAmpandrosoana ny eny ambanovohitra
FP	:	Feuille Paniculaire
GARP	:	Gestion Agronomique de la résistance du Riz à la Pyriculariose
GRET	:	Groupe de Recherches et d'Echange Technologiques
IRAT	:	Institut de Recherches Agronomiques Tropicales
IRRI	:	International Rice Research Institute
JAS	:	Jours Après Semis
LAI	:	Leaf Area Index
NBI	:	Nitrogen Balance Index
Nep/Pa	:	Nombre d'épillets par panicule
NP/m ²	:	Nombre de pieds par m ²
NPa/m ²	:	Nombre de panicule par m ²
NPa/P	:	Nombre de panicules par pied
PG	:	Poids moyen d'un grain
PMG	:	Poids de Milles Grains
SCV	:	Système de culture sous Couverture Végétale
SPAD	:	Soil Plant Analysis Development
UN	:	Unité d'azote
URP SCRiD	:	Unité de recherche en Partenariat sur les Systèmes de Culture et Riziculture Durable

SYMBOLES CHIMIQUES

CaO	:	oxyde de calcium
K ₂ O	:	potasse
KCl	:	chlorure de potassium
N	:	azote
NH ₄ ⁺	:	ion ammonium
NO ₃ ⁻	:	ion nitrate
P ₂ O ₅	:	anhydride phosphorique

SIGLES

%	:	pourcentage
°C	:	degré Celsius
g	:	gramme
ha	:	hectare
kg	:	kilogramme
kg/ha	:	kilogramme par hectare
l/ha	:	litre par hectare
m	:	mètre
m ²	:	mètre carré
mm	:	millimètre
nm	:	nanomètre
t	:	tonne
t/ha	:	tonne par hectare

GLOSSAIRE

Absorbance : Capacité d'un milieu à absorber la lumière qui la traverse (Larousse, 1998).

Appressorium : Structure utilisée par les champignons pour pénétrer dans une cellule hôte. Après sporulation, la spore va adhérer à la surface de la plante et va germer, menant à la formation d'un appressorium. Il exerce à son tour une pression mécanique, entre par force à l'intérieur de la cellule et la colonise (Dobinson et Hamer, 1991).

Alluvions : Dépôt laissé par un cours d'eau quand sa vitesse réduite n'en permet plus le transport (Larousse, 1998).

Colluvions : Dépôt fin résultant d'un remaniement à faible distance, sols provenant de l'érosion sur les pentes supérieures (Larousse, 1998).

Conidies : Spores issues de multiplication végétative d'un champignon produites par les hyphes mycéliennes spécialisées ou conidiophores (Ratsimba, 2005).

Croissance : Augmentation de la taille, du volume et du poids d'une plante au cours de sa vie. Il y a deux types de croissance : croissance en dimension (auxésis ou élongation cellulaire) et multiplication de nombreux organes dans les zones méristématiques (meresis ou division cellulaire) (Rabezandrina, 2004).

Feuille paniculaire : Dernière feuille d'une talle se trouvant en dessous de la panicule.

Indicateur de statut azoté d'une plante : Sert à estimer les besoins en azote d'une plante à un moment donné afin de déterminer son statut nutritionnel et fixer les doses d'engrais à apporter (Balasubramanian *et al.*, 2000).

Inoculum : Terme générique qui caractérise tout élément du parasite capable de contaminer un hôte. L'inoculum primaire permet la maladie et initie l'épidémie, l'inoculum secondaire assure la progression de l'épidémie (Rapilly, 1991).

Mycélium : Appareil végétatif des champignons constitué de filaments ramifiés, quelquefois agglomérés en masse simulant un tissu (Larousse, 1998).

Nécrose: Altération d'un tissu vivant provoquée par la mort de certaines cellules (Larousse, 1998).

Oxisol : Sol très altéré, de couleur rougeâtre et jaunâtre, très acide avec une faible capacité d'échange cationique. Il a un profil friable à teneur élevée en fer, en aluminium et en kaolin. Il a une capacité de rétention hydrique modérément favorable et une faible sensibilité à l'érosion. Il est profond, bien drainé et n'offre pas d'obstacles physiques au développement des racines. C'est un sol très ancien développé dans un profil topographique stable (Classification des sols USDA).

Phytoalexines : Substances chimiques produites uniquement lorsque les cellules vivantes de la plante sont envahies par un parasite et se nécrosent (Ratsimba, 2005).

Sol exondé : En riziculture, c'est un sol qui ne présente pas une nappe phréatique peu profonde ou affleurant pendant toute l'année (Jacquot *et al.*, 1983).

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

Ultisol : Sol caractérisé par un horizon profond formé d'argile accumulée de type kaolinite ou à sesquioxydes à pH faible. C'est un sol intensément lessivé avec des carences en bases (Classification des sols USDA).

Verse : Accident de végétation dû à l'effet du vent, d'une maladie ou d'un excès de fertilité. Cela permet aux plantes de coucher sur le sol et conduit souvent à des pertes importantes de rendement (Jacquot *et al.*, 1983).

Introduction

INTRODUCTION

Le riz figure parmi les trois céréales les plus cultivées dans le monde avec le blé et le maïs et se répartie à environ 150 millions d'hectares de superficie. L'Asie et l'Afrique sont les continents représentant les plus grands parts de productions. Madagascar est le deuxième pays producteur de riz du continent africain après l'Égypte. La grande île produit près de 4 millions de tonnes de paddy par an dont plus de la moitié est du riz irrigué (FAO, 2008). Il constitue ainsi la base de l'alimentation malgache avec une consommation moyenne de 115 kg par habitant en 2010 (David-Benz, 2011). Malheureusement, cette production ne suffit pas à couvrir les besoins de la population estimée à 19 625 000 habitants. L'Etat a alors importé 167 572 tonnes en 2008, soit l'équivalent de 10% de la consommation totale (FAO, 2008).

La production de riz est assurée par la riziculture inondée sur les plaines et les bas fonds jusqu'à 2000m d'altitude. Mais depuis 1980, les besoins alimentaires, la demande croissante en riz et l'augmentation de la pression foncière sur les terres inondées conduisent au développement de la riziculture pluviale sur les collines. Cette extension est cependant limitée à 1200m d'altitude par manque de variétés tolérantes au froid. Deux organismes (CIRAD et FOFIFA) sont alors intervenus pour élargir cette pratique sur les Hautes-Terres Malgaches grâce à la création et à la diffusion de nouvelles variétés de riz pluvial d'altitude (CIRAD et FOFIFA, 1993). En outre, le riz en système pluvial se trouve confronté à divers problèmes notamment les insectes, les adventices et les maladies. La pyriculariose figure parmi les maladies fongiques les plus redoutées du riz. Elle est causée par le champignon pathogène *Magnaporthe oryzae* (Kürschner *et al.*, 1994).

Cette présente étude se concentre sur la sensibilité du riz pluvial face à la pyriculariose. L'utilisation de variétés résistantes est le meilleur moyen de lutte contre cette maladie (Kim *et al.*, 2008). Cependant, le champignon responsable de la maladie peut muter et contourner les résistances de la plante en l'espace de deux ans (Seebold *et al.*, 2000). Quant aux fongicides, ils présentent certains inconvénients : ils sont polluants et présentent des risques sanitaires et environnementaux importants. Ils ne sont pas toujours efficaces (Kim *et al.*, 2008) et sont particulièrement coûteux pour les agriculteurs (Seebold *et al.*, 2004). Il sera donc plus approprié de se tourner vers des solutions plus durables pour l'environnement.

L'intégration des pratiques agronomiques permet de réduire cette sensibilité de la plante à la maladie en jouant sur la nutrition de la plante et sur le mode de gestion du sol.

Dans une première partie, nous ferons un bilan des connaissances sur le riz pluvial à Madagascar, nous présenterons la pyriculariose, la nutrition azotée du riz et l'effet du système de culture dans la gestion de cette maladie. Cette partie aboutira à l'établissement de la problématique de l'étude et des hypothèses de recherche. Dans une seconde partie, nous présenterons les dispositifs expérimentaux dans deux sites différents, les mesures et suivis effectués. Dans une troisième partie, nous présenterons les résultats statistiques qui seront analysés et discutés dans la dernière partie.

Première partie :

Contexte général de l'étude

PREMIERE PARTIE : CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

1.1. Riz pluvial à Madagascar

1.1.1. Classification et description morphologique

Le riz appartient à la famille des graminées, à la classe des Monocotylédones et au genre *Oryza* (Cf. Annexe 1). Le genre *Oryza* comprend de nombreuses espèces sauvages et deux espèces cultivées : *Oryza glaberrima*, originaire d'Afrique et *Oryza sativa*, originaire d'Asie. Largement diffusée à Madagascar, *O. sativa* se distingue en deux types :

- Le type *Indica* est réparti sur l'Asie tropicale. Il regroupe les variétés à fort tallage, à feuilles longues et fines et à grains longs et fins.
- Le type *Japonica* est réparti sur la zone tempérée et subtropicale d'Asie. Il regroupe les variétés à tallage moyen, à feuilles courtes et fines et à grains courts et ronds (Arraudeau, 1998).

Morphologiquement, le riz est une plante glabre à chaumes dressées, étalées ou flottantes pour certaines variétés. Ses racines sont abondantes, touffues et de type fasciculé. Sa tige est creuse et elle est formée par une alternance de nœuds et d'entre nœuds. Chaque nœud porte une feuille et un bourgeon donnant naissance à une talle. Ses feuilles sont sessiles, alternes, linéaires. Elles comprennent une gaine et un limbe séparé par une ligule et une auricule. Ses fleurs sont autogames, érigées à l'état jeune et plus ou moins pendantes à maturité. Le fruit est un caryopse et les grains sont de forme et de taille variable selon les variétés (Arraudeau, 1998).

1.1.2. Cycle du riz et élaboration du rendement

La vie d'un plant de riz se divise en trois phases : la phase végétative de la germination à l'initiation paniculaire, la phase reproductive de l'initiation paniculaire à la floraison et la phase de maturation de la floraison à la maturité. Au cours de chaque phase, des composantes participent l'une après l'autre à l'élaboration du rendement (Cf. Annexe 2) (Moreau, 1987).

- *La phase végétative*

Elle est caractérisée par la formation des talles et des feuilles, et par l'augmentation de la surface foliaire. Les composantes élaborées sont le nombre de pieds par m² (NP/m²) et le nombre de panicules par pied (NPa/P). Elles permettent l'obtention du nombre de panicules par m² (NPa/m²).

- *La phase reproductive*

Elle est caractérisée par le gonflement de la partie basale de la talle et la sortie de la panicule hors de la gaine foliaire. Le nombre d'épillets par panicule (Nep/Pa) et le pourcentage de grains pleins (% GP) sont les composantes élaborées pendant la phase de reproduction.

- *La phase de maturation*

L'état de maturité du grain se définit par l'état de dureté aux différents étages de la panicule. Les grains passent par 3 stades successifs : laiteux, pâteux et mûre. A maturité, les grains peuvent être farineux ou vitreux. Le poids moyen d'un grain (PG) est une caractéristique variétale dépendant de la taille de l'enveloppe (poids maximum atteint par les grains) et du remplissage du grain. Le poids de mille grains est calculé avant de déduire le PG.

Avec la connaissance de ces composantes, on peut obtenir une estimation du rendement du riz :

Rendement = nombre de pieds par m² x nombre de panicules par pieds x nombre d'épillets par panicule x % grains pleins x poids moyen d'un grain.

1.1.3. 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. On peut distinguer deux types de riziculture : la riziculture irriguée et la riziculture pluviale.

La riziculture avec submersion est fonction de la maîtrise ou non de l'eau. Le cas de mauvaise maîtrise de l'eau est dû soit à un manque d'eau, soit à un excès. Une bonne maîtrise de l'eau implique un planage rigoureux pour maîtriser la hauteur du plan d'eau dans la rizière et des installations de réseaux hydrauliques permettant un assèchement éventuel nécessaire dans l'épandage des engrais, les traitements phytosanitaires ou pour la récolte.

La riziculture sans submersion est une culture de riz sans irrigation mais alimentée en eau de pluie ou par la nappe phréatique. On peut donc parler de riziculture pluviale stricte où

les sols sont exondés et non endigués et de riziculture pluviale assistée de nappe (appelé aussi culture de décrue), localisée dans les bas de pente (Jacquot *et al.*, 1983).

1.1.4. Riz pluvial à Madagascar

Il y a 150 millions d'hectares de rizières dans le monde. Le riz pluvial est réparti sur une superficie de 19 millions d'hectares. L'Asie représente 10,7 millions d'hectares, l'Amérique latine 3,7 millions d'hectares et l'Afrique 2,3 millions d'hectares. Le rendement obtenu en système pluvial est généralement faible et se situe en moyenne au environ d'une tonne de paddy à l'hectare (Papasolomontos, 2002). Quant à 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, 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. En effet, le SCV est caractérisé par un non travail du sol et une couverture végétale morte (résidus de la culture précédente) ou vivante (Séguy, 2006).

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 filière 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.

1.1.5. Contraintes de production du riz pluvial à Madagascar

Les contraintes de production du riz pluvial sont d'ordre pédologique, climatique et biologique.

- *Contraintes liées au sol*

Elles sont à la fois chimiques et physiques. En effet, la rétention d'humidité du sol dépend de l'eau de pluie, alors, les sols grossiers et peu profonds ayant une faible capacité au

champ réduisent la quantité d'eau dans le sol. Dans les topographies onduleuses, les fortes pluies accélèrent considérablement l'érosion entraînant le décapage de la couche arable et l'appauvrissement du sol en éléments nutritifs. En outre, la plupart des sols de la riziculture pluviale sont acides et peu riches en azote, en phosphore, en soufre et en fer et les fortes pluies lessivent les bases et rendent les sols acides (Pande, 1997).

- *Contraintes liées au climat*

La quantité et la variabilité des pluies sont deux paramètres importants dans la production de riz pluvial. Le riz résiste mal au stress hydrique affectant l'élaboration du rendement lorsqu'il intervient pendant le développement de la panicule et le remplissage des grains. Il est aussi néfaste pendant la levée et la floraison. Dans les zones agricoles d'altitude, les écarts brusques de température peuvent affaiblir la plante. Les températures basses (14 à 18°C) ont donc des effets négatifs pendant l'initiation florale, la méiose et le développement du pollen (Pande, 1997).

- *Contraintes biologiques*

Les adventices nuisent beaucoup à la riziculture pluviale. Elles sont des concurrents pour les nutriments, l'eau et la lumière. Le désherbage manuel ou l'utilisation d'herbicide est indispensable. Le riz pluvial souffre également d'attaques d'insectes, de maladies, de nématodes, de rongeurs et d'autres animaux. En particulier, les insectes ravageurs s'attaquent aux feuilles, aux tiges et aux racines, détruisent les organes et se nourrissent de la sève. Les vers blancs sont les ravageurs les plus redoutés du riz pluvial (Pande, 1997).

1.2. Pyriculariose

La pyriculariose est considérée comme la principale maladie fongique du riz dans presque toutes les régions productrices de riz, y compris à Madagascar. L'agent responsable de cette maladie est un champignon filamenteux de la famille des *Magnaporthaceae*, classe des Ascomycètes et de type pyrénomycète.

1.2.1. Historique et répartition

Le champignon responsable de la pyriculariose a été découvert pour la première fois en 1891 au champ, sous la forme asexuée, et porte le nom de *Pyricularia oryzae* Cavara (Rossman et al., 1990). Il n'y avait à l'époque aucune distinction entre la pyriculariose du riz

et celle d'autres graminées et le groupe fut appelé *Pyricularia grisea*. La forme sexuée, connue sous le nom de *Magnaporthe grisea*, a été obtenue pour la première fois au laboratoire en 1971 par Hebert (Rakotonantoandro, 1996). La distinction selon la plante hôte a donné naissance à deux appellations : *M. grisea* pour l'espèce qui attaque la Digitale (*Digitaria sanguinalis*) et *M. oryzae* pour l'espèce qui attaque le riz et les autres graminées hôtes (Couch and Kohn, 2002).

Le stade plantule, le tallage et l'initiation paniculaire sont les stades les plus sensibles aux attaques de ce champignon. Le riz pluvial y est particulièrement sensible. La pyriculariose cause de très graves dégâts sur une large gamme de graminées telles que le riz, l'orge et le blé (Talbot, 2003). A Madagascar, elle sévit surtout sur la Côte Est avec une pluviométrie élevée. Elle est aussi importante sur les Hautes Terres (Cf. Annexe 3) (FOFIFA et DPV, 1990).

1.2.2. Biologie de *Magnaporthe oryzae* et cycle d'infection foliaire

Le cycle infectieux (Cf. Annexe 4) commence lorsque les spores se déposent sur la surface des feuilles, après transport par le vent, à l'aide de substances adhésives produites sur le compartiment apical. La présence d'eau libre est nécessaire pour la germination des spores (Hamer et al., 2001). La spore produit un tube germinatif qui arrête sa croissance après deux heures pour se différencier en une cellule spécialisée favorisant la pénétration : l'appressorium. La phase de maturation débute après huit heures lorsque l'appressorium est rendu imperméable aux solutés grâce à la mélanisation de sa paroi (Bourett et al., 1990).

La pénétration mécanique à travers la cuticule et la paroi des cellules végétales est réalisée par la formation d'un hyphé de pénétration et par la forte pression osmotique dans l'appressorium. Cet organe de pénétration transperce la cuticule et les parois cellulaires (Ribot et al., 2007). Le champignon colonise alors les tissus végétaux, envahit les cellules épidermiques adjacentes et les cellules sous-jacentes du mésophylle. L'apparition des premières lésions ne débute que quelques jours plus tard (5 jours), libérant des milliers de nouvelles conidies par jour (Richard et al., 1996). Les premiers symptômes visibles à l'œil nu apparaissent 4 à 5 jours après l'arrivée de la spore (Kato, 1974). Les lésions sporulent et libèrent des conidies qui assurent la dissémination du champignon. Un cycle infectieux foliaire peut être réalisé en moins de 7 jours dans les conditions les plus favorables.

1.2.3. Conditions de développement de l'épidémie de la pyriculariose

Le développement d'une épidémie de pyriculariose est le résultat de plusieurs facteurs tels que des conditions environnementales favorables, la sensibilité de la plante, la présence d'une souche virulente de l'agent pathogène et le seuil épidémique est atteint

- *Facteurs climatiques*

Le développement des lésions se fait à de basses températures nocturnes (20°C). La germination des conidies demande un degré d'hygrométrie élevé de 93% et la présence d'une goutte d'eau. Ces conditions sont en général réunies pendant la nuit, entre janvier et mars sur les Hautes-Terres (FOFIFA et DPV, 1990).

- *Sensibilité de la plante hôte*

La sensibilité de la plante hôte peut être modifiée par la présence de gènes de résistance dans la plante. Les résistances peuvent concerner différentes étapes du cycle infectieux qui sont ralenties ou stoppées (pénétration du champignon, développement des lésions ou sporulation). Des déséquilibres minéraux (excès d'azote, déficit en éléments minéraux tels que la silice) peuvent également affaiblir les mécanismes de résistance de la plante (Ou, 1985).

- *Facteurs relatifs au pathogène*

Ils sont liés au degré de virulence du pathogène, à la quantité d'inoculum présente à proximité de l'hôte, au type de reproduction et au mode de dispersion du pathogène (George, 1997). Le mycélium survie aux dépens des pailles contaminées, des grains infectés, des résidus de récolte et des repousses pendant plus d'un an sur la parcelle (Ziegler *et al.*, 1994). Il peut survivre pendant une durée de trois ans (Ou, 1985). Les capacités de mutation du champignon qui font qu'il s'adapte aux résistances de l'hôte dépendent de l'agressivité de la maladie. Une lésion produit 2000 à 6000 spores par jour pendant 15 jours au moins. Ces spores sont dispersées par la pluie et le vent sur des distances inférieures à 3 m (Notteghem *et al.*, 1977).

1.2.4. Dégâts sur la plante

M. oryzae s'attaque à plusieurs organes du riz tels que la feuille, la panicule, le cou et les nœuds. Il provoque des dégâts très importants lorsque les conditions sont favorables allant jusqu'à la perte totale de la récolte (Ribot *et al.*, 2007).

Les symptômes foliaires (Figure 1a) se présentent sous forme de taches grises au centre et entourées d'une auréole brun-jaune. Les lésions ont une forme elliptique avec des extrémités plus ou moins allongées, gris blanchâtre au centre et brun rougeâtre sur le pourtour (FOFIFA et DPV, 1990). Sur les plantes sensibles, les lésions sont très développées et les feuilles fortement infectées se dessèchent rapidement et meurent. Sur les plantes moyennement sensibles, les lésions sont petites, de forme circulaire ou elliptique. Sur les plantes résistantes, elles ne sont pas présentes ou il n'y a que des minuscules taches brunes (Agarwal *et al.*, 1994). La pyriculariose foliaire interfère avec la photosynthèse et la respiration en diminuant la surface photosynthétique et l'efficacité des radiations interceptées par la feuille (Kato, 1974). Elle peut provoquer des baisses de tallage et de nombre de grains par panicule.

Les symptômes paniculaires (Figure 1b) se caractérisent par la formation de tache brun noirâtre au niveau du cou et à la base de la feuille paniculaire, empêchant la circulation de la sève jusqu'aux grains. A partir de la floraison, des lésions peuvent se développer au niveau des rachis de l'inflorescence (Kato, 1974). La pyriculariose paniculaire conduit à l'avortement des fleurs, le blanchissement de la panicule et la cassure au niveau de la partie infectée (FOFIFA et DPV, 1990). Les flux de sève sont rompus par la nécrose des tissus. Les grains sont peu remplis si le remplissage avait déjà été initié avant la nécrose et il n'y a que des grains vides si elle est installée avant le début du remplissage (Kato, 1974).

La pyriculariose peut aussi se développer sur les nœuds de la tige paniculaire (Figure 1c). On observe alors une pourriture de couleur brun foncé sur la gaine entraînant le dessèchement au-dessus des nœuds infectés et la cassure de la tige sur les nœuds pourris (FOFIFA et DPV, 1990).



a. Pyriculariose foliaire b. Pyriculariose paniculaire c. Pyriculariose nodale

Figure 1 : Symptômes de pyriculariose (JL Dzido, Andriantsimialona, IRRI).

1.2.5. Méthodes de lutte

Les moyens de lutte contre la pyriculariose peuvent être préventifs ou curatifs. Il est possible d'agir sur la plante hôte ou sur le pathogène lui-même.

Les recommandations pour lutter contre la maladie sont le tri des semences, la rotation des cultures et le brûlage des pailles contaminées, de manière à supprimer les sources potentielles d'inoculum. La meilleure méthode de lutte préventive réside dans l'emploi de variétés résistantes (Pande, 1997). Il y a aussi les méthodes basées sur la nutrition telles que l'apport de silice et la fertilisation azotée raisonnée. Cet apport de silice permet de supprimer les effets de la pyriculariose en augmentant la teneur en silice et en diminuant la teneur en azote, en phosphore, en fer et en manganèse dans la plante. Le dépôt de silice sous l'épiderme de la feuille crée une membrane de protection contre les insectes et les maladies. Il est donc possible que la moindre sévérité de la maladie soit due à la baisse de la teneur en azote constatée sur divers organes de la plante (Seebold et *al.*, 2004 ; Velly, 1975).

Les traitements des semences permettent également de détruire le mycélium présent sur les graines. Les traitements foliaires doivent se faire deux fois à un intervalle de 10 jours entre les stades de début montaison et floraison (FOFIFA et DPV, 1990). Les fongicides utilisés contre cette maladie sont le Tricyclazole (0,5 kg/ha Beam 75WP), l'Edifenphos (1 l/ha Hinosan), le Bénomyl (100 kg/ha Benlate 50CE) (Andriantsimalona, 2004). Cette méthode peut être efficace mais ne représentent pas le moyen de lutte durable contre la pyriculariose.

1.3. Nutrition azotée du riz

1.3.1. Azote

L'azote est le quatrième constituant des plantes utilisé dans l'élaboration de molécules importantes telles que les protéines, les nucléotides, les acides nucléiques et la chlorophylle. Il est essentiel pour la synthèse des enzymes de la photosynthèse et joue un rôle primordial dans le métabolisme des plantes. Il peut être absorbé par la plante sous forme réduite (NH_4^+) ou sous forme oxydée (NO_3^-) (Arraudeau, 1998).

Dans le sol, l'azote se trouve sous forme organique (humus) ou minérale (NH_4^+ , NO_3^-). L'azote organique provient des résidus des récoltes précédentes et d'engrais organiques. Il doit donc être transformé par les bactéries présentes dans le sol en nitrates pour être utilisable par

les plantes (minéralisation). L'essentiel de la nutrition azotée des plantes, est assurée par les nitrates. Sous forme d'ions nitrate, l'azote est un élément très soluble et peu retenu par le sol. Apporté en trop grande quantité, l'excédent est lessivé et emporté par l'eau circulant dans le sol. L'azote doit donc être apporté, autant que possible, juste avant son absorption par la plante afin d'éviter le lessivage vers la nappe phréatique (Arraudeau, 1998).

1.3.2. Carence et excès en azote

La carence en azote se traduit par une teinte vert clair sur les vieilles feuilles, puis en une coloration des pointes des feuilles les plus âgées en brun rougeâtre puis jaune pâle, un flétrissement et un arrêt progressif de la croissance (Arraudeau, 1998).

L'excès d'azote entraîne un retard de la maturité et un retard de la floraison par allongement de la période végétative. Il favorise la synthèse accrue des sucres, des glucoses et des acides aminés simples. Cet excès contribue également à l'affaiblissement de la résistance mécanique (verse des céréales) et chimique de la plante (baisse de la teneur en phytoalexine et des réactions de défense naturelle de la plante). Il affecte la taille des cellules, l'épaisseur des parois cellulaires et augmente la sensibilité de la plante aux maladies (Kürschner *et al*, 1992).

1.3.3. Méthodes de mesure de la teneur en azote de la plante

La teneur en azote assimilé par la plante se mesure avec divers indicateurs tels que le SPAD (Minolta) et le Dualex (ForceA). Ils permettent une mesure non destructive de l'absorbance de la feuille, proportionnelle à la concentration de chlorophylle dans la feuille.

- *SPAD*

Le SPAD (Figure 2) est un outil portable permettant de mesurer l'absorbance d'une feuille de riz à deux longueurs d'ondes différentes grâce à deux diodes électroluminescentes émettant respectivement une lumière bleue (entre 400 nm et 500 nm) et une lumière rouge (entre 600 nm et 700 nm). Ces deux longueurs d'ondes correspondent à un pic dans le spectre d'absorbance de la chlorophylle. Cet appareil sert à estimer la teneur en chlorophylle d'un végétal en mesurant la quantité de lumière transmise à travers la feuille et à évaluer le statut azoté de la plante à différents stades de sa croissance afin de déterminer les doses d'azote à apporter.

Les mesures SPAD se font au tiers supérieur de la face supérieure de la plus jeune feuille développée tout en évitant la nervure centrale et doivent être prises à l'ombre. Lorsque les valeurs SPAD descendent en dessous d'un seuil critique (teneur en chlorophylle inférieure à 20% et visuellement, les feuilles sont de couleur jaune), il faut appliquer de l'engrais azoté afin d'éviter les pertes de rendement dues à une déficience en azote. Différents facteurs peuvent affecter ces valeurs SPAD : les différences de radiation entre les saisons, la densité des plantes, les variétés, le statut minéral de la plante, les stress biotiques et abiotiques influencé par la coloration de la feuille (Balasubramanian *et al.*, 2000).



Figure 2 : SPAD (DUSSERRE Julie)

- *Dualex*

Le Dualex (Figure 3) est un appareil portable, doté d'une pince à feuille et d'un écran qui affiche trois valeurs : Chlorophylle, Flavonoïdes et NBI (Nitrogen Balance Index : ratio entre Chlorophylle et Flavonoïdes). Il mesure l'absorbance dans une longueur d'onde d'ultra violet (flavonols) et la transmittance dans deux longueurs d'ondes de l'infrarouge (chlorophylle). Les flavonoïdes ont la propriété d'être des absorbeurs d'ultra violet et de faire écran à la chlorophylle pour l'absorption des longueurs d'ondes situées dans cette partie du spectre (Demotes-Mainard *et al.*, 2008). Cet appareil permet de suivre simultanément la teneur en chlorophylle et flavonoïdes (polyphénols) de l'épiderme foliaire et sert donc à évaluer le statut azoté de la plante durant son cycle (Tremblay *et al.*, 2010).

La mesure Dualex se fait sur la dernière feuille développée car elle est suffisamment exposée à la lumière du soleil pour avoir assez de polyphénols. Comme avantage, cet appareil permet d'avoir des valeurs plus proches de la teneur réelle en chlorophylle de la feuille par rapport au SPAD, mais son utilisation est plus complexe surtout les variétés à feuilles épaisses.



Figure 3 : Dualox (DUSSERE Julie).

1.4. Impacts du système de culture sur la pyriculariose

1.4.1. Cas de la rotation culturale

- *Effet de la rotation culturale sur la dynamique de l'offre en azote du sol*

Les légumineuses utilisées dans la rotation culturale ont un intérêt majeur pour la dynamique de l'azote. En effet, les légumineuses sont fixatrices de l'azote atmosphérique et leurs résidus contribuent à enrichir le sol en cet élément. De ce fait, les cultures succédant aux légumineuses peuvent bénéficier indirectement de l'azote fixé par la légumineuse. Les précédents légumineux augmentent généralement les rendements des cultures non fixatrices d'azote. D'autres effets bénéfiques des légumineuses semblent intervenir dans l'accroissement des rendements. Cet effet positif des légumineuses sur la culture suivante s'appelle « Effet rotation » (CIRAD, 2002).

- *Effet de la rotation culturale sur la pyriculariose*

La rotation de culture permet de limiter l'effet de la pyriculariose sur le riz pluvial. Le champignon survit sur les résidus à la surface du sol à travers les pailles contaminées et les chaumes infectés. Dans ce cas, il est nécessaire d'introduire une culture non hôte de ce champignon pathogène dans la rotation permettant ainsi de diminuer l'inoculum primaire présent dans la parcelle. De plus, si la rotation est suffisamment longue, la viabilité du pathogène sera diminuée (Krupinsky *et al.*, 2002). Sinon, il faut exporter tous les résidus et nettoyer complètement la parcelle.

1.4.2. Cas de la densité de semis

La caractérisation du couvert végétal est importante pour une maladie foliaire comme la pyriculariose car les spores peuvent se transmettre de plante à plante et la couverture crée aussi un microclimat pouvant influencer l'épidémie. En effet, on rapporte qu'une forte densité du couvert végétal favorise la progression de l'épidémie de pyriculariose (Kürschner *et al.*, 1992).

Divers éléments du système de culture peuvent être modifiés afin de mieux contrôler les maladies. En modifiant la densité de semis, la structure du couvert est modifiée et la distance entre les plantes ainsi que le microclimat (humidité et température dans le couvert) également. Un couvert dense facilite la propagation des spores entre les plantes et augmente l'hygrométrie, propice à la germination des spores. On peut également modifier l'espacement entre les rangs de semis pour limiter la dispersion de plante à plante et réduire l'hygrométrie (Krupinsky *et al.*, 2002). Ces modifications de la structure du couvert végétal peuvent donc permettre d'enrayer la dispersion du champignon et limiter la vitesse de propagation de l'épidémie.

1.4.3. Cas du mode de gestion du sol

Le choix du mode de gestion du sol influence la croissance du riz pluvial, sa résistance à la pyriculariose et son rendement (Séguy *et al.*, 1989). Au cours des années précédentes, des études menées au sein de l'URP SCRiD ont montré que le SCV était moins touché par la pyriculariose que le labour (Sester *et al.*, 2008 et 2010). La différence entre les deux systèmes de culture est significative aussi bien sur la pyriculariose foliaire que paniculaire. Le rendement sur les variétés sensibles demeure cependant extrêmement faible en SCV comme en labour (400 kg/ha) car la pyriculariose reste importante (Rakotoarisoa, 2006).

1.4.4. Cas de la fertilisation azotée

- *Effet de la fertilisation azotée sur la sensibilité de la plante à la pyriculariose*

L'effet de la fertilisation azotée sur la pyriculariose a été prouvé et étudié depuis de nombreuses années (Ou, 1985). La nutrition de la plante est un des facteurs clés de

l'interaction plante-pathogène. En effet, les relations entre plante hôte et pathogène sont d'ordre nutritionnel.

L'azote peut modifier la sensibilité de la plante à travers un aspect mécanique, chimique et nutritionnel. Mécaniquement, il joue sur la quantité de cellulose dans la plante et affecte la résistance mécanique des parois cellulaires (Datnoff *et al.*, 2007). Chimiquement, il diminue la teneur en phytoalexine. Or, cette substance antibiotique apparaît suite à une confrontation avec un organisme parasite, alors le pathogène arrive rapidement à coloniser la plante hôte. Sur le plan nutritionnel, la plante en excès d'azote serait un substrat plus favorable au développement du mycélium et à la sporulation. Une plante qui pousse de façon équilibrée serait moins sensible aux attaques (Chaboussou, 1985). C'est ainsi que la plupart des pathogènes foliaires arrivent à pénétrer et à se développer rapidement dans les tissus foliaires riches favorisés par l'azote (Huber, 1980). Il a été observé que l'apport d'azote en plusieurs fois plutôt qu'en une seule limite la pyriculariose. Le taux et la fréquence d'application ont une influence sur la maladie (Kürschner *et al.*, 1992).

- *Effet de la fertilisation azotée sur la densité du couvert végétal*

La fertilisation azotée entraîne également une modification de la structure du couvert qui devient très propice au développement de l'épidémie. En effet, une culture fortement fertilisée va avoir un tallage important et un couvert végétal dense. De ce fait, l'hygrométrie et la température seront plus rapidement propices à la germination des spores et à la sporulation des nouvelles lésions.

1.5. Cadre général de l'étude

1.5.1. Projet GARP

Le Projet GARP (Gestion Agronomique de la Résistance du riz à la Pyriculariose) se propose d'étudier les interactions entre système de culture, nutrition azotée et pyriculariose du riz pluvial. Ce projet est financé pour quatre ans par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR). Il œuvre dans la comparaison en plein champ de deux systèmes de culture (Labour et SCV) et des travaux génétiques sur les interactions entre le métabolisme azoté et les mécanismes de défense du riz.

Pour se faire, le Projet GARP, met en jeu des équipes pluridisciplinaires en France, en Bolivie, au Brésil et à Madagascar. Certaines expérimentations en plein champ sont réalisées à Madagascar vu que la riziculture pluviale est en plein essor au niveau des sites d'expérimentation (Andranomanelatra et Ivory). La réalisation de ce projet est assurée par l'équipe SCRiD, qui regroupe trois instituts : le FOFIFA, le CIRAD et l'Université d'Antananarivo.

1.5.2. Problématique et hypothèses de recherche

Dans le cadre d'une agriculture durable et respectueuse de l'environnement, cette étude a pour objectif de tester et d'expliquer l'effet du système de culture et de la fertilisation azotée sur les attaques de pyriculariose du riz pluvial.

La problématique qui se pose en est que : Quel rôle joue la nutrition azotée sur la pyriculariose du riz pluvial ?

Pour répondre à cette question centrale, deux hypothèses ont été formulées :

Hypothèse 1 : La fertilisation azotée augmente la sensibilité du riz pluvial à la pyriculariose.

Hypothèse 2 : Le système SCV régule l'offre en azote dans la plante et ses conséquences sur la maladie.

C'est dans le cadre du projet GARP que se déroule notre stage. A travers des suivis de dispositifs au champ, des mesures dynamiques d'indicateurs de nutrition azotée et de développement, mises en parallèle avec des mesures d'épidémie de pyriculariose, nous apporterons des éléments pour valider ou infirmer ces hypothèses de recherche.

Deuxième partie :

Matériels et méthodes

DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES

2.1. Sites d'expérimentation

Les zones d'étude se situent dans la région du Vakinankaratra. Les parcelles expérimentales ont été mises en place à Andranomanelatra et à Ivory.

Andranomanelatra se localise dans les Hautes Terres Malgaches à 17 km au Nord d'Antsirabe et à 1650 m d'altitude. Le climat est de type tropical d'altitude avec une saison froide et sèche de Juin à Septembre et une saison chaude et humide d'Octobre à Avril où la culture du riz pluvial y est pratiquée. La température moyenne est faible (15,9 °C à 19,8 °C), mais la précipitation est élevée et tourne autour de 308 mm en Février (Figure 4a). Le sol d'Andranomanelatra est constitué d'un sol ferralitique sur alluvions (Pande, 1997).

Ivory se situe dans le Moyen Ouest Malgache à 100 km d'Antsirabe et à une altitude moyenne de 900 m. Il est soumis à un régime de température relativement élevée (22,4 °C à 26 °C) mais la précipitation est faible par rapport à celle d'Andranomanelatra (273 mm en Janvier) (Figure 4b). Le sol est majoritairement un sol ferralitique sur colluvions (Pande, 1997). Durant la période d'essai, Ivory est plus chaud et moins humide qu'Andranomanelatra.

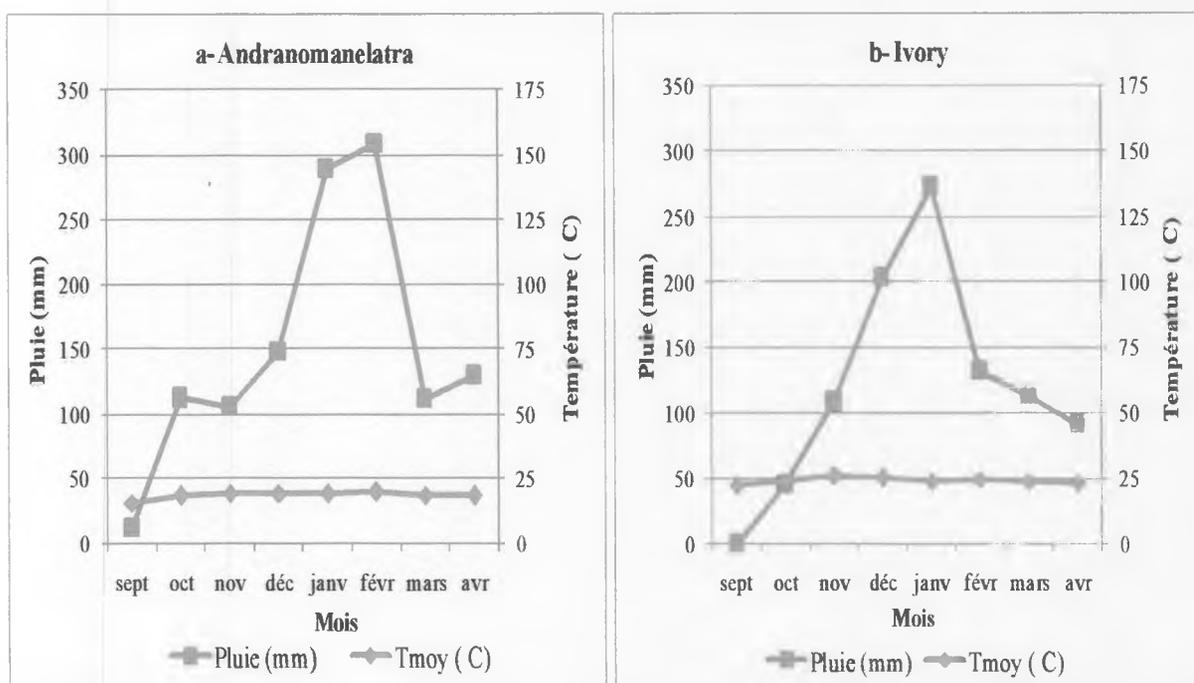


Figure 4 : Courbe Ombrothermique de Gaussen pour la campagne de riziculture pluviale de 2011-2012 à Andranomanelatra (a) et à Ivory (b) (Station CIMEL Andranomanelatra et Ivory).

2.2. Mise en place des dispositifs

2.3.1. Dispositif d'Andranomanelatra

Cet essai est mis en place dans le cadre du projet GARP pour évaluer l'interaction entre système de culture et sensibilité du riz pluvial due à l'apport d'azote. Les facteurs étudiés sont :

Fertilisation

Les niveaux de fertilisation diffèrent par la quantité d'azote minéral apportée :

- 0 UN (témoin)

Il n'y a pas d'apport d'azote minéral. La fertilisation est limitée à une fumure de base constituée de 5 t/ha de fumier de bovin + 150 kg/ha de superphosphate triple (soit 63 unités/ha de P_2O_5 et 60 unités/ha de CaO) + 80 kg/ha de KCl (soit 48 unités/ha de K_2O) + 500 kg/ha de dolomie.

- 76 UN (dose recommandée)

Il y a un apport de 76 unités d'azote minéral. La fertilisation est alors constituée de la fumure de base + 30 unités d'azote/ha apportées au semis + 23 unités d'azote/ha apportées 30 jours après semis + 23 unités d'azote/ha apportées 60 jours après semis.

- 152 UN (varie au cours du projet)

Il y a un apport de 152 unités d'azote minéral. La fertilisation est alors constituée de la fumure de base + 60 unités d'azote/ha apportées au semis + 46 unités d'azote/ha apportées 30 jours après semis + 46 unités d'azote/ha apportées 60 jours après semis.

L'apport de dolomie est nécessaire pour corriger le pH du sol car le sol d'Andranomanelatra est fortement acide. L'azote est apporté sous forme d'urée.

Système de culture

L'effet de l'azote est testé dans deux systèmes de culture : le système labour et le système SCV sous résidus de maïs, de soja, d'avoine et de vesce velue (Cf. Annexe 5).

Variétés

Trois variétés de riz pluvial de sensibilité différente à la pyriculariose sont utilisées :

- FOFIFA 154 (variété sensible)

Connu sous le nom vernaculaire « Lavarambo », la variété FOFIFA 154 est issue du croisement entre le FOFIFA 62 (mâle) et le Latsidahy (femelle). Elle atteint une hauteur de 75cm. Le port de sa panicule est retombant et le port de sa feuille paniculaire est dressé. Ses grains sont de type Indica, aristés, pileux, long, fin et de couleur jaune paille. Son cycle végétatif est de 156 jours à 1500 m d'altitude avec une productivité de 5 t/ha.

La variété FOFIFA 154 est un riz pluvial d'altitude et supporte l'inondation temporaire. Elle est aussi résistante à la verse. Cependant, il est très sensible à la pyriculariose surtout sur les Hauts-Plateaux.

- FOFIFA 161 (variété moyennement sensible)

Localement appelé « Mahefa », la variété FOFIFA 161 est issue du croisement entre FOFIFA 133 (mâle) et IRAT 144 (femelle). Elle a une hauteur de 90 cm. Ses feuilles sont grandes et sa panicule est compacte. Le port de sa feuille paniculaire est semi-dressée. Ses grains sont de type japonica, à aristation mutique, poilu, gros, demi-rond et de couleur blanchâtre. Son cycle végétatif est semi-précoce avec une productivité de 2,8 à 6,6 t/ha.

Comme points positifs, cette variété FOFIFA 161 est rustique, tolérante au froid et s'adapte bien à l'altitude. Par contre, son tallage est moyen et elle est peu sensible à l'égrenage et à la pyriculariose.

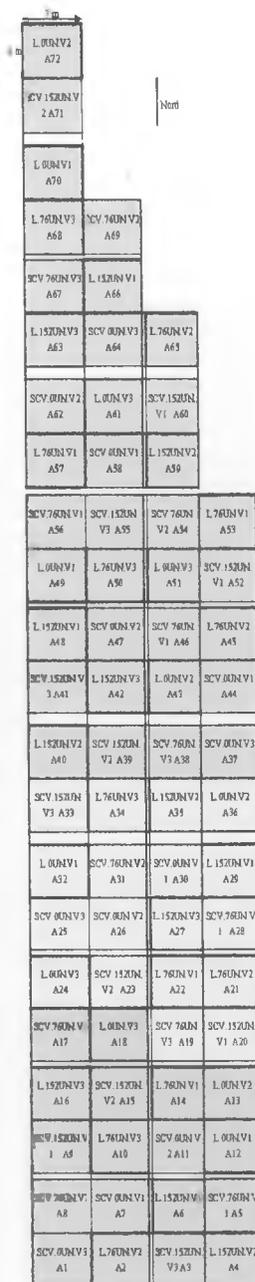
- FOFIFA 172 (variété résistante)

Connu sous le nom vernaculaire de « Botamainty », la variété FOFIFA 172 est issue du croisement entre Jumli Marshi (mâle) et IRAT 265 (femelle). Elle a une hauteur de 95 cm. Son grain est de type médium, bicolore (brun et paille), rouge à l'intérieur, et elle est munie d'une barbe de couleur brune et courte. Son cycle végétatif est précoce.

Comme atouts, cette variété FOFIFA 172 a un tallage précoce et s'adapte à une haute altitude. Elle est également très résistante à la pyriculariose. Cependant, elle est très sensible à l'égrenage.

2.3.1.1. Plan du dispositif

Le dispositif d'Andranomanelatra (Figure 5) est constitué de 4 blocs (A, B, C et D). Chaque bloc regroupe 18 parcelles élémentaires avec une surface de 42 m² (6 m x 7 m) chacune. Des allées de 0,5 m sont laissées pour les déplacements à l'intérieur du dispositif. Les parcelles cultivées se situent sur un terrain en pente faible de 5 %.



LEGENDES

SCV : semis direct sous couverture végétale

L : labour

0UN : aucun apport d'azote minéral

76UN : apport de 76 unités d'azote

152UN : apport de 152 unités d'azote

V1 : variété sensible (FOFIFA154)

V2 : variété moyennement sensible (FOFIFA161)

V3 : variété résistante (FOFIFA172)

 Bloc A

 Bloc C

 Bloc B

 Bloc D

Figure 5 : Dispositif d'Andranomanelatra

2.3.1.2. Précédent cultural

Avant l'année 2009, toutes les parcelles ont été conduites en SCV depuis une dizaine d'année avec une association d'haricot et de kikuyu. Durant la campagne culturale de 2010-2011, les parcelles en labour ont été cultivées avec une association de maïs et de soja conduite en labour. Les parcelles en SCV ont été cultivées avec une association de maïs, de soja, d'avoine et de vesce velue conduite en SCV. La fertilisation utilisée dans cette rotation est limitée à la fumure de base (sans fertilisation minérale).

2.3.1.3. Conduite de l'expérimentation

- *Installation de la culture*

Le labour est effectué du 25 au 29 Septembre 2011. Le sol est traité avec du Diméthoate (1 l/ha de Dimex 400 EC) le 13 Octobre 2011. Avant le semis, les parcelles labourées sont affinées à l'Angady et les semences sont traitées avec 0,9 g/kg d'Imidaclopride et 0,25 g/kg de Thirame (2,5 g/kg de Gaucho T45WS).

Les semis sont réalisés du 07 au 09 Novembre 2011 pour les 4 blocs (A, B, C et D) avec une densité de semis de 0,20 m x 0,30 m et 5 à 7 grains par poquet.

Les fertilisants sont apportés de façon localisée : mélange de 21 kg par parcelle de fumier de bovin, 630 g par parcelle de superphosphate triple, 360 g par parcelle de chlorure de potassium, 2,1 kg par parcelle de dolomie et d'urée (0 g, 275 g et 546 g par parcelle respectivement pour les traitements à 0UN, 76 UN et 152 UN).

Les apports d'azote supplémentaires sont réalisés le 09 Décembre 2011 (32 JAS) et le 18 Janvier 2012 (72 JAS) à la dose de 210g d'urée par parcelle (23UN) pour le traitement à 76UN et 420g d'urée par parcelle (46UN) pour le traitement à 152UN.

- *Entretiens et récolte*

Toutes les parcelles sont traitées avec un herbicide de pré-levée : 1500 g/ha de pendiméthaline (3 l/ha d'Alligator) le 17 Novembre 2011 (9 JAS). Les traitements contre les vers blancs sont effectués tous les mois durant la période de végétation du riz avec 50 g/l de cyperméthrine et 500 g/l de chlorpyrifos-éthyl (1 l/ha de Basy 550G) : les 22 Décembre 2011 (45 JAS), 18 Janvier (72 JAS) et 16 Février 2012 (103 JAS). Ces traitements insecticides sont complétés avec 500 g/ha de carbosulfan (5 kg/ha de Carbofuran 10G) le 09 Décembre 2011 (32 JAS). Les désherbages manuels ont lieu de décembre jusqu'à mi-février :

06 Décembre 2011 (29 JAS), 12 Janvier (68 JAS), 26 Janvier (82 JAS) et 07 Février 2012 (92 JAS). La récolte est effectuée du 23 au 25 Avril 2012 (160 JAS).

2.3.2. Dispositif d'Ivory

L'essai d'Ivory est conçu comme une réplique à moyenne altitude de l'essai d'Andranomanelatra avec quelques modifications des variétés, des types de rotations et des fertilisations, mieux adaptées à la moyenne altitude. Les facteurs étudiés sont :

Fertilisation

Les niveaux de fertilisation diffèrent par la quantité d'azote minéral apportée :

- **0 UN (témoin)**

Il n'y a pas d'apport d'azote minéral. La fertilisation est limitée à une fumure de base constituée de 5 t/ha de fumier de bovin + 150 kg/ha de superphosphate triple (63 unités/ha de P_2O_5 et 60 unités/ha de CaO) + 80 kg/ha de KCl (48 unités/ha de K_2O).

- **60 UN (dose recommandée)**

Il y a un apport de 60 unités d'azote minéral. La fertilisation est alors constituée de la fumure de base + 30 unités d'azote/ha apportées au semis + 15 unités d'azote/ha apportées 30 jours après semis + 15 unités d'azote/ha apportées 60 jours après semis.

- **120 UN (varie au cours du projet)**

Il y a un apport de 120 unités d'azote minéral. La fertilisation est alors constituée de la fumure de base + 60 unités d'azote/ha apportées au semis + 30 unités d'azote/ha apportées 30 jours après semis + 30 unités d'azote/ha apportées 60 jours après semis.

La dolomie n'est pas nécessaire car le pH du sol d'Ivory est plus élevé que le sol d'Andranomanelatra. L'azote est encore apporté sous forme d'urée.

Système de culture

Les systèmes de culture utilisés sont : le système labour et le système SCV sous résidus de maïs, de soja, d'*Eleusine coracana* et de *Cajanus cajan* (Cf. Annexe 5).

Variétés

Les variétés de riz pluvial utilisées dans ce dispositif sont :

- FOFIFA 154 (variété sensible)

- B22 (variété moyennement sensible)

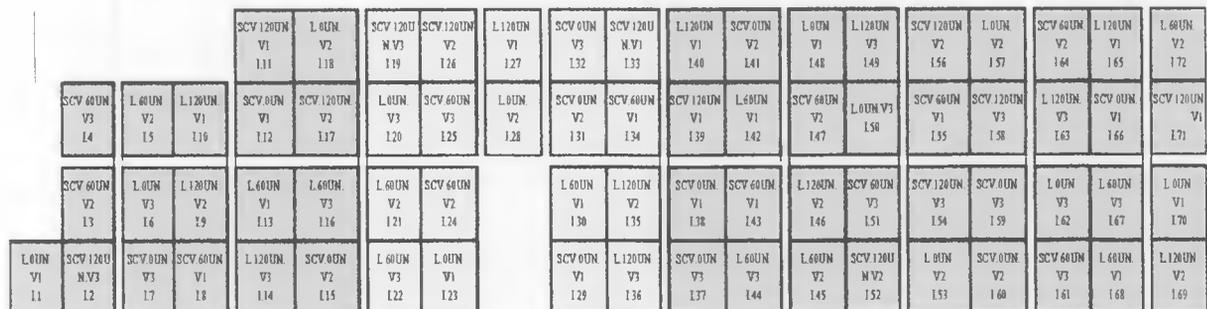
La variété B22 a une hauteur de 100 cm. Le port de sa panicule est retombant et le port de sa feuille paniculaire est semi-dressé. Ses grains sont non aristés, à apex mutique, pileux et de couleur jaune claire. Son cycle végétatif est de 105 jours. Elle est largement répandue à moins de 1 000 m d'altitude. Par ailleurs, la variété B22 est peu sensible à la pyriculariose surtout dans le Moyen-Ouest malgache.

- Nerica 4 (variété résistante)

La variété Nerica 4 a une hauteur de 100 cm. Le port de sa panicule est retombant et le port de sa feuille paniculaire est dressé. Ses grains sont non aristés et de couleur jaune foncé. Son cycle végétatif est de 100 jours. Elle est largement répandue à moins de 1 000 m d'altitude. En outre, elle est très résistante à la pyriculariose dans le Moyen Ouest malgache.

2.3.2.1. Plan du dispositif

Le dispositif d'Ivory (Figure 6) est constitué de 4 blocs regroupant 18 parcelles élémentaires de 42 m². Les parcelles cultivées se situent sur un terrain plat. Le pourtour du champ est bordé par du vétiver servant de brise vent.



LEGENDES

SCV : semis direct sous couverture végétale

L : labour

OUN : aucun apport d'azote minéral

60UN : apport de 60 unités d'azote

120UN : apport de 120 unités d'azote

V1 : variété sensible (FOFIFA154)

V2 : variété moyennement sensible (B22)

V3 : variété résistante (Nerica4)

Bloc A

Bloc B

Bloc C

Bloc D

Nord

Figure 6 : Dispositif d'Ivory

2.3.2.2. Précédent cultural

Avant l'année 2009, toutes les parcelles ont été cultivées de maïs et voandzou, conduites en système labour et sans fertilisation minérale pendant des années. Les parcelles labourées ont été cultivées avec une association de maïs et de soja et les parcelles en SCV avec une association de soja, de maïs, d'*Eleusine coracana* et de *Cajanus cajan* pour la campagne de 2010-2011. La fertilisation est limitée à la fumure de base dans la rotation.

2.3.2.3. Conduite de l'expérimentation

- *Installation de la culture*

Le labour est effectué du 30 Septembre au 02 Octobre 2011. Les parcelles sont traitées avec du Diméthoate (1 l/ha de Dimex 400 EC). Ces parcelles sont affinées à l'Angady et les semences sont traitées avec 0,9 g/kg d'Imidaclopride et 0,25 g/kg de Thirame (2,5 g/kg de Gaucho T45WS). Les semis sont réalisés du 28 Novembre au 01 Décembre 2011 pour les 4 blocs avec une densité de semis de 0,20 m x 0,30 m et 5 à 7 grains par poquet.

Les fertilisants sont apportés manuellement dans chaque trou : mélange de 21 kg par parcelle de fumier de bovin, 630 g par parcelle de superphosphate triple, 360 g par parcelle de chlorure de potassium et d'urée (0 g, 275 g et 546 g par parcelle respectivement pour les traitements à 0UN, 60 UN et 120 UN).

Le premier apport d'urée est effectué le 11 Janvier 2012 (42 JAS) et le deuxième apport le 02 Février 2012 (67 JAS) à la dose de 136 g d'urée par parcelle (15UN) pour le traitement à 60UN et 272 g d'urée par parcelle (30UN) pour le traitement à 120UN.

- *Entretiens et récolte*

Toutes les parcelles sont traitées avec un herbicide de pré-levée : 1500 g/ha de pendiméthaline (3 l/ha d'Alligator) le 02 Décembre 2011 (3 JAS). Les traitements contre les vers blancs sont réalisés le 11 Janvier 2012 (42 JAS) avec 500 g/ha de carbosulfan (5 kg/ha de Carbofuran 10G). Ces traitements insecticides sont complétés avec 50 g/l de cypermethrine et 500 g/l de chlorpyriphos-éthyl (1 l/ha de Basy 550G) tous les mois durant la période de végétation du riz : les 23 Décembre 2011 (25 JAS), 26 Janvier (55 JAS), 24 Février 2012 (84 JAS). Les sarclages manuels sont effectués en cours de cycle suivant les besoins : 22 Décembre 2011 (24 JAS), 10 Janvier (41 JAS) et 26 Janvier 2012 (58 JAS). La récolte est effectuée du 02 au 04 Avril 2012 (125 JAS).

2.3. Mesures

2.3.1. Prélèvements en cours de cycle

Durant le cycle végétatif du riz, 4 prélèvements destructifs sont réalisés sur la variété sensible et la variété moyennement sensible à la pyriculariose au stade début tallage, mi-tallage, début montaison et début épiaison.

La variété résistante n'est pas utilisée au cours des prélèvements et des notations de pyriculariose du fait de sa forte résistance à la maladie. Elle est utilisée comme témoin de l'effet du système de culture et de la fertilisation sans incidence de la pyriculariose.

- *Stade début tallage*

Les premiers prélèvements ont été faits les 7 et 8 Décembre 2011 à Andranomanelatra (30 JAS) et le 20 Décembre 2011 à Ivory (20 JAS).

Les opérations suivantes sont effectuées lors de ce prélèvement :

- Prélèvement de 30 feuilles par parcelle (dernière feuille ligulée soit la deuxième feuille en partant de l'apex). Ces feuilles sont séchées à l'étuve (72h à 60°C), puis pesées et envoyées en France pour analyse de la teneur en azote total.
- Prélèvement de 6 poquets de riz (surface égale à 0,36 m²). Avant d'arracher les poquets, leur hauteur est mesurée, le nombre de plantes et de talles totaux sont comptés et les racines sont coupées. La biomasse sèche aérienne est mesurée après séchage à l'étuve et pesage (Tableau 1, Figure 7).

- *Stade mi-tallage*

Les deuxièmes prélèvements ont été réalisés les 17 et 18 janvier 2012 à Andranomanelatra (70 JAS) et les 11 et 12 janvier 2012 à Ivory (41 JAS).

Les opérations suivantes sont effectuées lors de ce prélèvement :

- Mesure au SPAD (Minolta) et au Dualex (ForceA) de 20 feuilles par parcelle sur la dernière feuille ligulée (sur les 2/3 de la feuille en évitant la nervure centrale sur la face supérieure pour le SPAD et sur les 2 faces pour le Dualex). Ces feuilles ont été prélevées, séchées à l'étuve (72h à 60°C), pesées et envoyées en France pour analyse de la teneur en azote total.
- Prélèvement de 6 poquets de riz de la même façon que précédemment.

- Mesure du LAI (Leaf Area Index ou indice foliaire) au Sun Scan (DeltaT) (Cf. Annexe 6). La mesure retenue par parcelle est celle de la moyenne de 6 mesures réalisées sous le couvert proche de la placette des 6 poquets prélevés (Tableau 1, Figure 7).

- *Stade début montaison*

Les troisièmes prélèvements sont effectués les 31 Janvier et 1 Février 2012 à Andranomanelatra (84 JAS) et les 24 et 25 Janvier à Ivory (55 JAS).

Nous avons réalisé les opérations suivantes :

- Mesure au SPAD et au Dualex de 20 feuilles par parcelle et prélèvement de ces feuilles pour séchage, pesage et envoi en France pour l'analyse de la teneur en azote total et des formes d'azote soluble (NO_3^- et NH_4^+).
- Prélèvement de 6 poquets de riz de la même façon que précédemment.
- Mesure du LAI au Sun Scan (Tableau 1, Figure 7).

- *Stade début épiaison*

Les quatrièmes prélèvements sont faits les 13, 16 et 20 Février 2012 à Andranomanelatra (97JAS) et les 7 et 9 Février à Ivory (72 JAS).

Nous avons effectué les opérations suivantes :

- Mesure au SPAD et au Dualex de 20 feuilles par parcelle à Ivory et de 10 feuilles par parcelle à Andranomanelatra. La mesure est faite sur la feuille paniculaire à Ivory et sur la feuille paniculaire et sur l'avant dernière feuille à Andranomanelatra.
- Prélèvement de 6 poquets de riz de la même façon que précédemment.
- Mesure du LAI au Sun Scan (Tableau 1, Figure 7).

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des prélèvements effectués à Andranomanelatra et à Ivory (AvDF : Avant Dernière Feuille, FP : Feuille Paniculaire).

Stade	Site	JAS	SPAD	Dualex	Sun scan	Prélèvement feuille	Prélèvement 6 poquets
Début tallage	Andrano	30	-	-	-	30 AvDF	x
	Ivory	20	-	-	-	30 AvDF	x
Mi-tallage	Andrano	70	x	x	x	20 AvDF	x
	Ivory	41	x	x	-	20 AvDF	x
Début montaison	Andrano	84	x	x	x	20 AvDF	x
	Ivory	55	x	x	x	20 AvDF	x
Début épiaison	Andrano	97	x	x	x	10 FP + 10 AvDF	x
	Ivory	72	x	x	x	20 FP	x

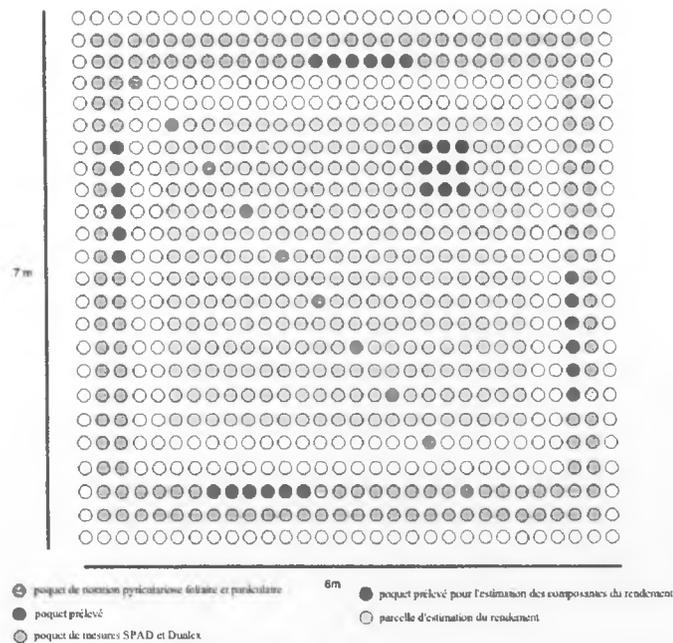


Figure 7 : Prélèvements au cours du cycle, suivis épidémiologiques, carré de rendement et composantes du rendement du riz à Andranomanelatra et à Ivory

2.3.2. Suivis épidémiologiques

- *Pyriculariose foliaire*

Le suivi de la pyriculariose foliaire permet d'estimer l'importance de la maladie dans chaque parcelle en fonction des traitements. La pyriculariose foliaire est caractérisée par des lésions au niveau des feuilles facilement reconnaissables à l'œil nu. Une feuille est dite malade lorsqu'elle présente une ou plusieurs taches ou lésions dues à la pyriculariose. Une talle est dite infectée si elle porte au moins une feuille malade. Le pourcentage de talles infectées est appelé « Incidence » et le pourcentage de surface foliaire nécrosée constitue la « Sévérité ». Le produit reflète la moyenne de la surface foliaire attaquée sur l'ensemble de la parcelle (Cf. Annexe 7).

La pyriculariose foliaire est estimée sur 10 poquets dans chaque parcelle. Ces poquets sont répartis sur la diagonale de la parcelle (Figure 7). A chaque poquet, on compte le nombre de talles et le nombre de talles malades, puis on estime sur 3 talles la sévérité de l'attaque sur les 4 feuilles les plus hautes. Les notations foliaires sont réalisées le 08 Février 2012 à Andranomanelatra (94 JAS) et le 06 Février 2012 à Ivory (70 JAS) sur les variétés sensible et moyennement sensible à la maladie.

- *Pyriculariose paniculaire*

Le suivi de la pyriculariose paniculaire permet de voir l'évolution de la maladie quand les panicules commencent à apparaître. En effet, ce sont les attaques sur les panicules qui influencent le plus le rendement car elles touchent directement le remplissage des grains. Il faut bien les distinguer des attaques causées par des insectes desséchant la panicule et des panicules blanches dues aux incidents climatiques pendant la floraison.

La pyriculariose paniculaire est également estimée sur 10 poquets par parcelle. La moyenne des dégâts sur la parcelle s'obtient par le produit du pourcentage de panicules infectées (incidence) et du pourcentage de grains infectés par panicule malade (sévérité) (Cf. Annexe 7). Pour évaluer l'épidémie de la pyriculariose paniculaire, des notations sont faites les 13 mars 2012 à Andranomanelatra (128 JAS) et les 09 mars 2012 à Ivory (102 JAS) sur la variété sensible et moyennement sensible à la maladie.

2.3.3. Rendement et composantes du rendement

Le rendement est mesuré sur l'ensemble de la parcelle en supprimant 5 lignes de bordure de chaque côté soit une surface de 16,8 m² pour les trois variétés utilisées (Figure 7). Après une coupe à la faucille, les données suivantes sont recueillies : nombre de poquets présents, nombre de poquets manquants, poids frais des grains et des pailles de la parcelle, poids frais et secs d'échantillons de grains et de pailles.

Les composantes du rendement sont mesurées sur 9 poquets pris au centre de la parcelle pour les trois variétés. On compte sur ces 9 poquets le nombre de plants, de talles et de panicules. Puis, les panicules sont prélevées et égrenées. Les grains pleins et les grains vides sont séparés et pesés après passage à l'étuve (72h à 60°C). Deux sous échantillons de 200 grains pleins et 200 grains vides sont pesés pour l'obtention du poids de 1000 grains vides et du poids de 1000 grains pleins, ce qui permet l'estimation du nombre de grains pleins et de grains vides et du taux de stérilité.

2.4. Analyses statistiques

Les analyses statistiques pour l'analyse de la variance sont faites avec le logiciel SAS version 6.12 Windows avec la procédure GLM (General Linear Model). Il permet de tester l'effet des différents traitements utilisés tels que l'effet du système de culture, de la fertilisation azotée et l'interaction entre système de culture et fertilisation azotée. Le résultat du test indique que si la valeur est inférieure à 0,05, alors l'effet est significatif, sinon, il ne l'est pas.

Troisième partie :

Résultats et interprétations

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

3.1. Effets du système de culture et de la fertilisation azotée sur le dispositif d'Andranomanelatra

3.1.1. Paramètres de croissance du riz

- *Evolution de la biomasse aérienne*

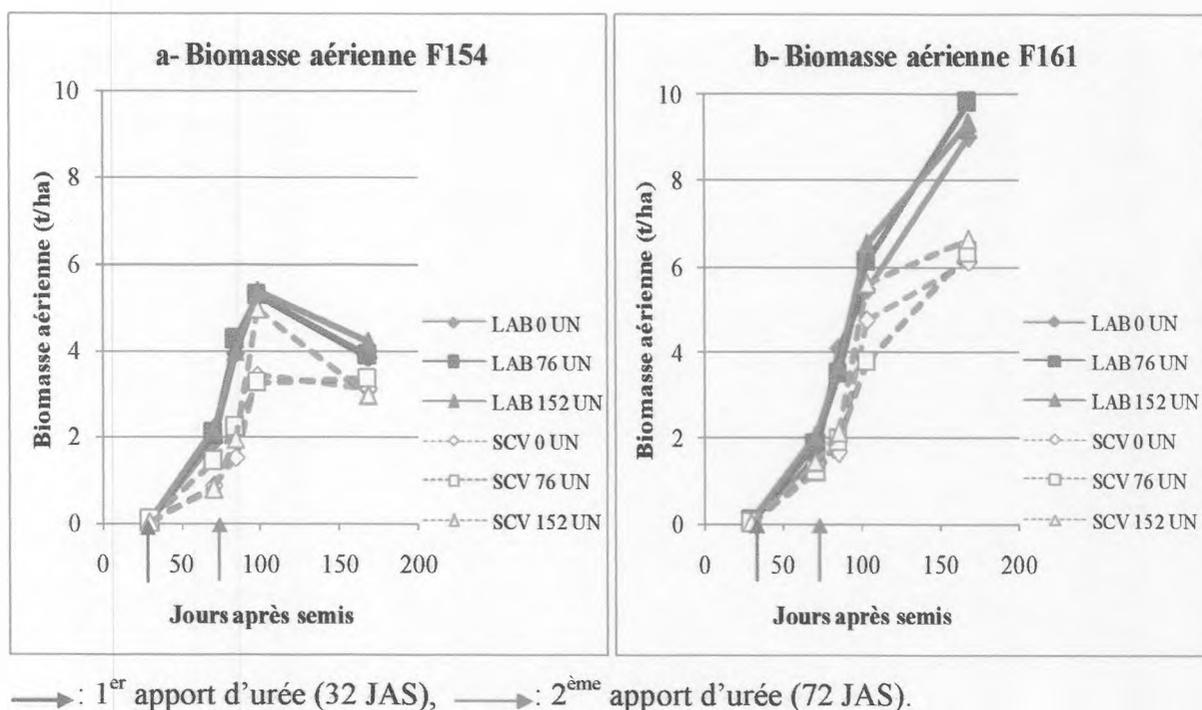


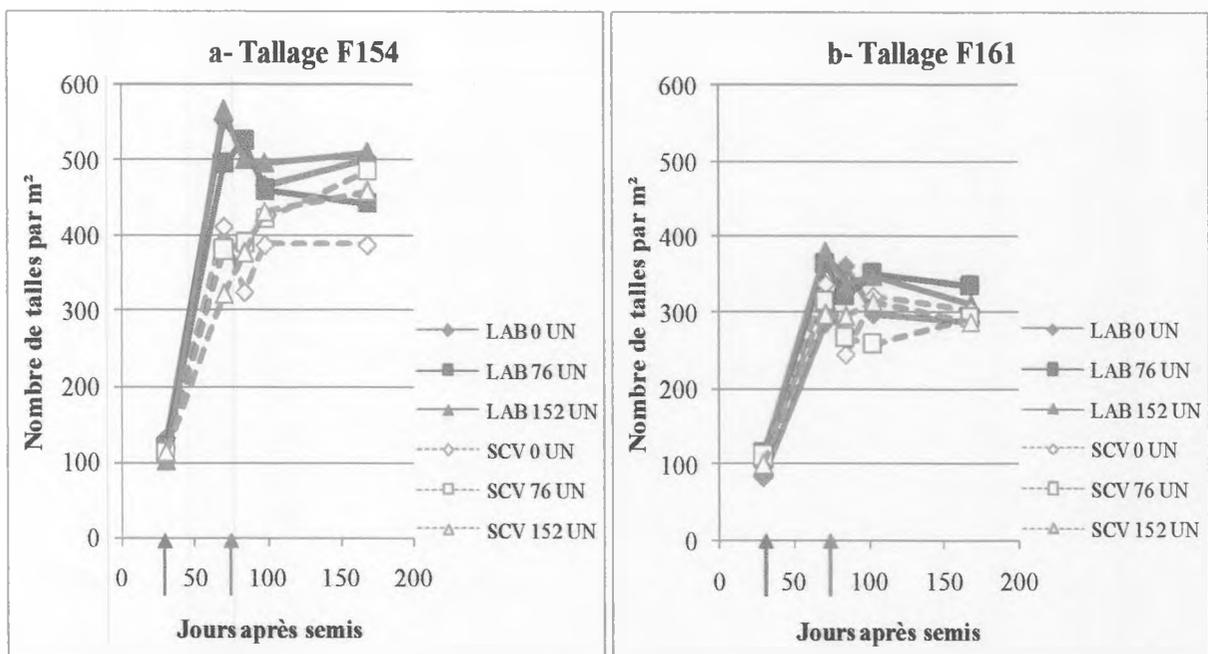
Figure 8 : Evolution de la biomasse aérienne pour les variétés sensible F154 (a) et moyennement sensible F161 (b) à Andranomanelatra.

La Figure 8 nous montre que le comportement du riz vis-à-vis de la production de biomasse aérienne varie en fonction de son niveau de résistance à la pyriculariose.

Pour la variété sensible à la pyriculariose (Figure 8a), les parcelles labourées produisent plus de biomasse aérienne que les parcelles en SCV. La quantité maximale de biomasse produite est atteinte au stade épiaison (97 JAS) pour tous les traitements et les systèmes. Cependant, cette quantité diminue à la récolte (160 JAS) car les grains sont fortement attaqués par la pyriculariose conduisant à un faible poids des grains récoltés.

Pour la variété moyennement sensible à la pyriculariose (Figure 8b), la biomasse aérienne est meilleure en labour qu'en SCV. En labour, on observe une forte croissance durant le cycle pour les trois niveaux de fertilisation. La quantité de biomasse produite à la récolte est peu différente entre ces niveaux de fertilisation. En SCV, la croissance est lente au départ, plus forte au stade épiaison, et la biomasse produite à la récolte n'atteint pas celle obtenu dans le système labour.

- *Evolution du tallage*



→ : 1^{er} apport d'urée (32 JAS), → : 2^{ème} apport d'urée (72 JAS).

Figure 9 : Evolution du nombre de talles par m² pour les variétés sensible F154 (a) et moyennement sensible F161 (b) à Andranomanelatra.

La courbe d'évolution du tallage nous indique que le comportement des deux variétés à produire des talles, se diffère en fonction de leur niveau de sensibilité à la pyriculariose.

Pour la variété sensible à la maladie (Figure 9a), les parcelles en labour produisent au stade mi-tallage (70 JAS) et montaison (84 JAS) plus de talles que les parcelles en SCV. Entre la montaison et la récolte, le nombre de talles par m² diminue en labour pour les traitements avec apport d'urée. En SCV, le tallage augmente jusqu'à la récolte pour les traitements avec apport d'urée. En effet, notre hypothèse est que l'assimilation de l'azote est plus lente dans ce

système de culture en début de cycle mais il deviendrait plus disponible pour la plante en cours du cycle.

Pour la variété moyennement sensible à la maladie (Figure 9b), le pic de production de talles est atteint au stade mi-tallage pour tous les traitements et les systèmes. Cependant, le nombre de talle par m² obtenu diffère en fonction du système de culture : il augmente en fonction de la fertilisation en labour mais diminue en SCV. Entre l'épiaison et la récolte, le nombre de talles par m² diminue pour tous les traitements et les systèmes hormis le SCV à 76UN où on a une augmentation du nombre de talle. On peut également dire que cette variété a une faible capacité d'émettre des talles compte tenu de ses caractéristiques variétales.

3.1.2. Statut azoté du riz

Tableau 2 : Valeurs SPAD et Dualex NBI en fonction du stade de développement du riz pour les variétés sensible F154 et moyennement sensible F161 à Andranomanelatra.

Traitements		Stade mi-tallage (70 JAS)		Stade début montaison (84 JAS)		Stade début épiaison (97 JAS)	
		SPAD	Dualex NBI	SPAD	Dualex NBI	SPAD	Dualex NBI
a- Variété sensible F154							
Labour	0 UN	42,8	28,8	45,2	27,9	42,7	21,5
	76 UN	43,7	31,8	46,1	29,8	45,4	24,5
	152 UN	45,2	31,6	46,6	32,3	46,8	26,1
SCV	0 UN	40,8	26,6	42,1	25,4	43,3	21,3
	76 UN	42,2	29,7	46,5	29,7	44,9	24,8
	152 UN	41,7	28,1	42,8	29,7	45,8	25,8
Analyse de variance							
	Effet Système de culture	0,0020	0,0038	0,0155	0,0507	0,7681	0,9161
	Effet Fertilisations	0,1265	0,0140	0,0431	0,0022	0,0208	0,0002
	Interaction SC x F	0,3947	0,7029	0,1036	0,4015	0,7469	0,9424
b- Variété moyennement sensible F161							
Labour	0 UN	41,5	27,9	43,7	26,7	35,6	16,3
	76 UN	42,3	28,8	45,2	29,2	40,4	21,1
	152 UN	42,3	29,4	45,1	29,2	41,6	20,8
SCV	0 UN	40,6	27,4	42,4	25,7	43,8	22,5
	76 UN	41,7	26,7	43,8	26,2	41,7	22,0
	152 UN	41,8	26,8	45,1	28,5	42,7	22,7
Analyse de variance							
	Effet Système de culture	0,4108	0,0273	0,1583	0,0057	0,0009	<0,0001
	Effet Fertilisations	0,5460	0,8556	0,0397	0,0020	0,0948	0,0028
	Interaction SC x F	0,9831	0,4630	0,6036	0,1459	0,0059	0,0013

Pour la variété sensible à la maladie (Tableau 2a), les valeurs SPAD et Dualex indiquent que les parcelles labourées assimilent plus d'azote que les parcelles en SCV au stade mi-tallage. Au stade montaison, il y a un effet significatif du système de culture avec des valeurs SPAD plus fortes en labour par rapport au SCV. Concernant l'effet de la fertilisation, la valeur Dualex montre que l'apport d'urée améliore l'assimilation azotée à tous les stades de développement du riz. Le premier apport d'urée (32 JAS) entraîne un effet significatif de la fertilisation uniquement avec le Dualex au stade mi-tallage. Par contre, après le deuxième apport (72 JAS), un effet significatif de la fertilisation est observé au stade montaison et épiaison avec les deux indicateurs de statut azoté. Il n'y a pas d'interaction entre système et fertilisation pour cette variété sensible.

Pour la variété moyennement sensible à la maladie (Tableau 2b), le SPAD ne permet d'observer un effet de l'assimilation de l'azote qu'au stade épiaison avec des valeurs supérieures en SCV qu'en labour. Avec le Dualex, la différence d'assimilation est très nette entre labour et SCV. De mi-tallage à montaison, le système labour assimile plus d'azote que le système SCV. Au stade épiaison, cet effet du système de culture est inversé avec plus d'assimilation azotée en SCV. Concernant l'effet de la fertilisation, il n'y a pas d'effet de l'apport d'urée sur l'assimilation azotée au stade mi-tallage. Au stade montaison, plus on apporte de l'urée, plus l'assimilation de l'azote est meilleure avec les deux indicateurs de statut azoté. Au stade épiaison, l'effet de la fertilisation est seulement significatif sur le SPAD pour le système labour. En SCV, l'assimilation de l'azote est meilleure en cas d'apport d'azote qu'en absence d'apport d'azote.

3.1.3. Pyriculariose foliaire et pyriculariose paniculaire

Les attaques de pyriculariose foliaire sont plus sévères en labour qu'en SCV pour la variété sensible à la pyriculariose (Figure 10a). En labour, l'analyse statistique montre que plus on apporte de l'azote, plus l'attaque de pyriculariose est sévère pour la variété sensible à la maladie. Pour la variété moyennement sensible à la maladie, il y a moins de pyriculariose foliaire en absence d'apport d'azote et l'attaque est peu importante pour les traitements avec apport d'urée ($p < 0,001$). En SCV, ces deux variétés sont moins touchées par la pyriculariose et il n'y a pas de différence d'attaque en fonction de l'apport d'urée.

Les plantes issues du système avec labour sont plus attaquées par la pyriculariose paniculaire que celles issues du système SCV. En labour, on note un effet significatif de la fertilisation pour la variété sensible à la pyriculariose (Figure 10b). En SCV, cette variété

sensible fait ressortir des différences très significatives de l'épidémie entre les trois niveaux de fertilisations. Pour la variété moyennement sensible, l'attaque de pyriculariose est moins sévère dans les deux systèmes de culture et aucun effet n'est donc détecté pour cette variété.

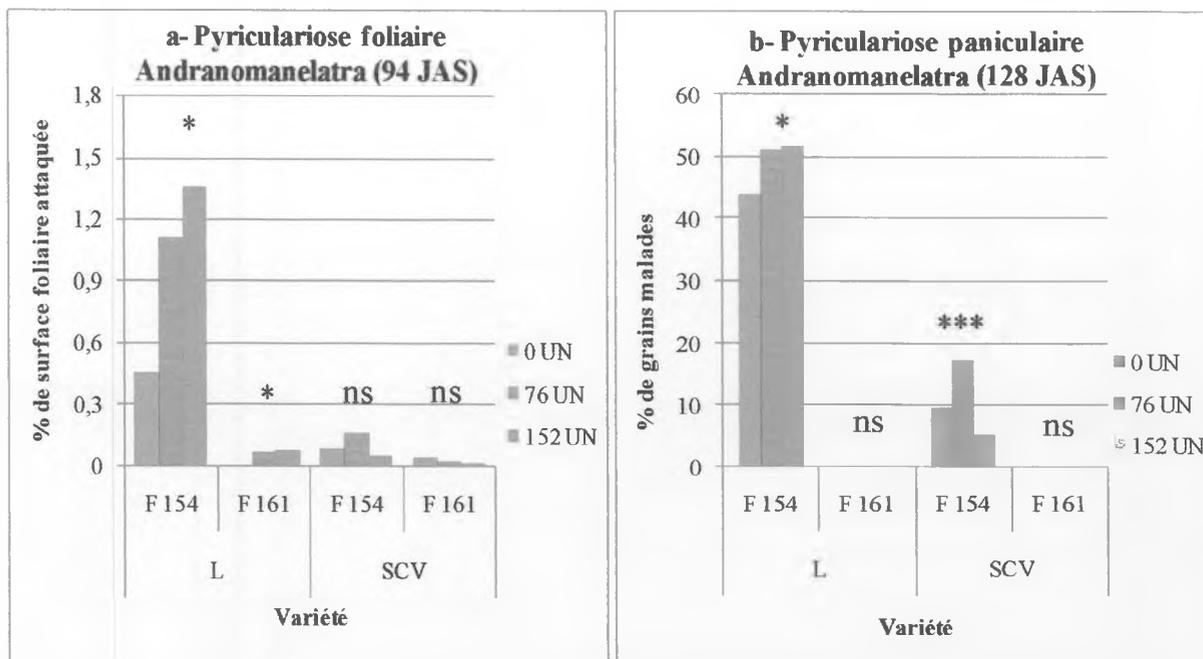


Figure 10 : (a) Pyriculariose foliaire (94 JAS) et (b) Pyriculariose paniculaire (128 JAS) pour les variétés sensible F154 et moyennement sensible F161 à Andranomanelatra.

(ns : $p > 0,05$; * : $0,05 < p < 0,01$; *** : $p < 0,001$).

3.1.4. Rendement et composants du rendement

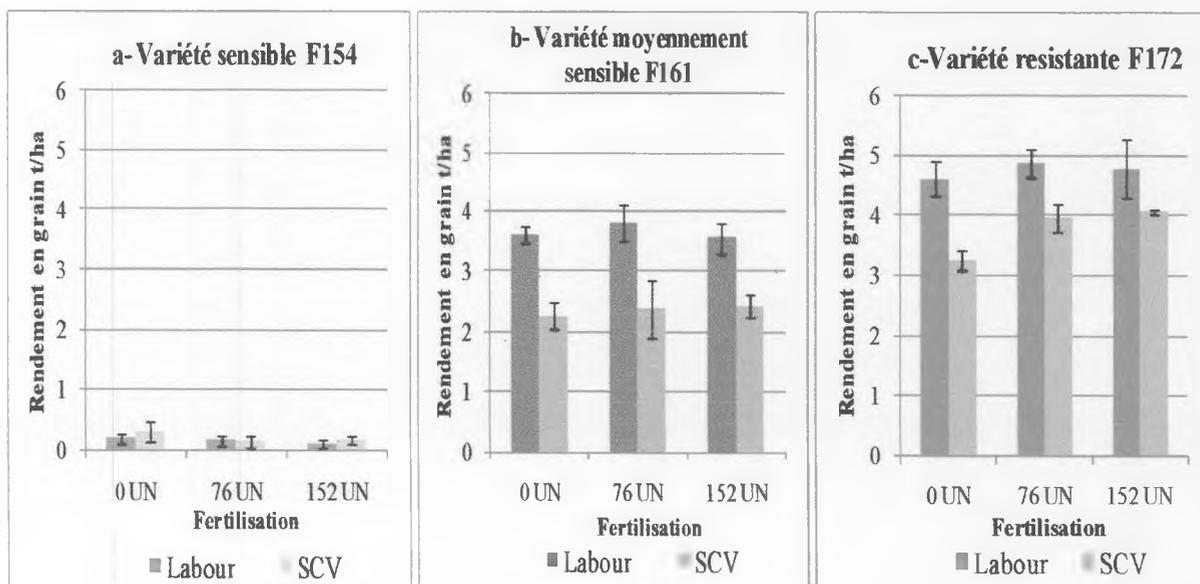


Figure 11 : Rendement en grain de paddy des trois variétés à Andranomanelatra.

Tableau 3 : Composantes du rendement des trois variétés à Andranomanelatra.

Traitements		Nombre de plants par m ²	Nombre de panicules par plant	Nombre d'épillets par panicule	% de grains pleins	PMG (en g)
a- Variété sensible F154						
Labour	0 UN	118,4	2,7	32,9	11,1	22,4
	76 UN	95,6	2,9	42,5	3,4	22,0
	152 UN	95,2	2,7	44,2	3,2	23,7
SCV	0 UN	108,4	2,7	41,1	16,9	22,0
	76 UN	97,6	3,6	42,5	11,6	24,0
	152 UN	88,8	4,0	39,4	11,5	22,1
<u>Analyse de variance</u>						
	Effet Système de culture	0,3218	0,0056	0,8052	0,0645	0,9998
	Effet Fertilisations	0,0050	0,0674	0,5598	0,2786	0,5652
	Interaction SC x F	0,5796	0,0742	0,4989	0,9510	0,1213
b- Variété moyennement sensible F161						
Labour	0 UN	82,3	3,2	61,9	82,4	27,9
	76 UN	89,3	3,3	67,2	78,5	25,3
	152 UN	89,2	3,3	74,2	74,5	24,7
SCV	0 UN	91,2	3,0	66,1	68,8	24,8
	76 UN	86,5	2,9	62,2	65,3	25,4
	152 UN	81,5	3,2	83,2	58,1	24,0
<u>Analyse de variance</u>						
	Effet Système de culture	0,8625	0,3060	0,2456	0,0004	0,0424
	Effet Fertilisations	0,8975	0,7648	0,0007	0,0548	0,0405
	Interaction SC x F	0,4372	0,8359	0,1023	0,6524	0,1132
c- Variété résistante F172						
Labour	0 UN	104,8	3,7	46,7	93,7	25,8
	76 UN	99,5	4,1	48,9	92,1	26,1
	152 UN	101,3	4,0	43,3	84,5	25,8
SCV	0 UN	109,1	3,6	52,5	90,4	25,2
	76 UN	108,3	3,9	45,2	88,3	28,7
	152 UN	89,3	3,4	73,7	86,3	24,7
<u>Analyse de variance</u>						
	Effet Système de culture	0,9493	0,2156	0,2404	0,5478	0,7882
	Effet Fertilisations	0,2078	0,4804	0,5540	0,1802	0,2633
	Interaction SC x F	0,2700	0,7770	0,2969	0,6825	0,3613

Pour la variété sensible à la maladie (Figure 11a), le rendement est très faible, cela s'explique par le faible pourcentage de grains pleins (Tableau 3a).

Pour la variété moyennement sensible à la maladie (Figure 11b), le rendement est meilleur en labour qu'en SCV pour tous les niveaux de fertilisations. En effet, le taux de grains pleins et le poids de milles grains sont plus élevés dans le système labour que dans le système SCV et la fertilisation azotée influence le nombre d'épillets par panicules pour cette variété (Tableau 3b).

Pour la variété résistante à la maladie (Figure 11c), on obtient un rendement plus élevé dans les parcelles labourées que dans les parcelles en SCV pour tous les traitements. Cependant, aucune composante ne montre des différences significatives entre les systèmes de culture et les fertilisations (Tableau 3c).

Pour la variété moyennement sensible et résistante à la maladie, le rendement en système labour augmente quand la fertilisation passe de 0UN à 76UN, puis il diminue quand la fertilisation passe de 76UN à 152UN. Par contre, le rendement en système SCV augmente avec la fertilisation.

3.1.5. Relations entre rendement, notations de pyriculariose, indicateurs du statut azoté et paramètres de croissance

Tableau 4 : Tableau des corrélations entre les différents paramètres mesurés pour les variétés sensible F154 (a) et moyennement sensible F161 (b) à Andranomanelatra.

Indicateurs de statut azoté et paramètres de croissance	a- Variété sensible F154			b- Variété moyennement sensible F161		
	Rendement	Pyriculariose foliaire (94 JAS)	Pyriculariose paniculaire (128 JAS)	Rendement	Pyriculariose foliaire (94 JAS)	Pyriculariose paniculaire (128 JAS)
SPAD (70 JAS)	-0,17	0,59	0,58	0,34	0,05	0,21
Dualex NBI (70 JAS)	-0,20	0,51	0,57	0,60	0,09	0,26
SPAD (84 JAS)	-0,26	0,41	0,43	0,25	0,19	0,09
Dualex NBI (84 JAS)	-0,33	0,46	0,25	0,41	0,55	0,08
SPAD (97 JAS)	-0,25	0,25	0,04	-0,24	0,05	-0,12
Dualex NBI (97 JAS)	-0,13	0,34	-0,01	-0,48	-0,01	-0,18
Biomasse aérienne (30 JAS)	-0,25	0,53	0,54	0,52	0,15	0,42
Biomasse aérienne (70 JAS)	-0,33	0,64	0,76	0,63	0,14	0,29
Biomasse aérienne (84 JAS)	-0,15	0,68	0,80	0,74	0,09	0,40
Biomasse aérienne (97 JAS)	-0,04	0,35	0,46	0,47	0,47	0,33
Densité du couvert (84 JAS)	-0,12	0,62	0,77	0,82	0,30	0,36
Densité du couvert (97 JAS)	-0,09	0,59	0,72	0,69	0,31	0,22

Pour la variété sensible à la pyriculariose (Tableau 4a), aucun paramètre n'est corrélé avec le rendement, en lien avec une forte sévérité de la pyriculariose occasionnant un faible rendement. La pyriculariose foliaire est faiblement corrélée avec la biomasse aérienne au stade mi-tallage et montaison, et avec la densité du couvert végétal au stade montaison. Par contre, la pyriculariose paniculaire est fortement corrélée avec la biomasse aérienne au stade montaison. En effet, nous avons noté de fortes différences de biomasse entre traitements à ce

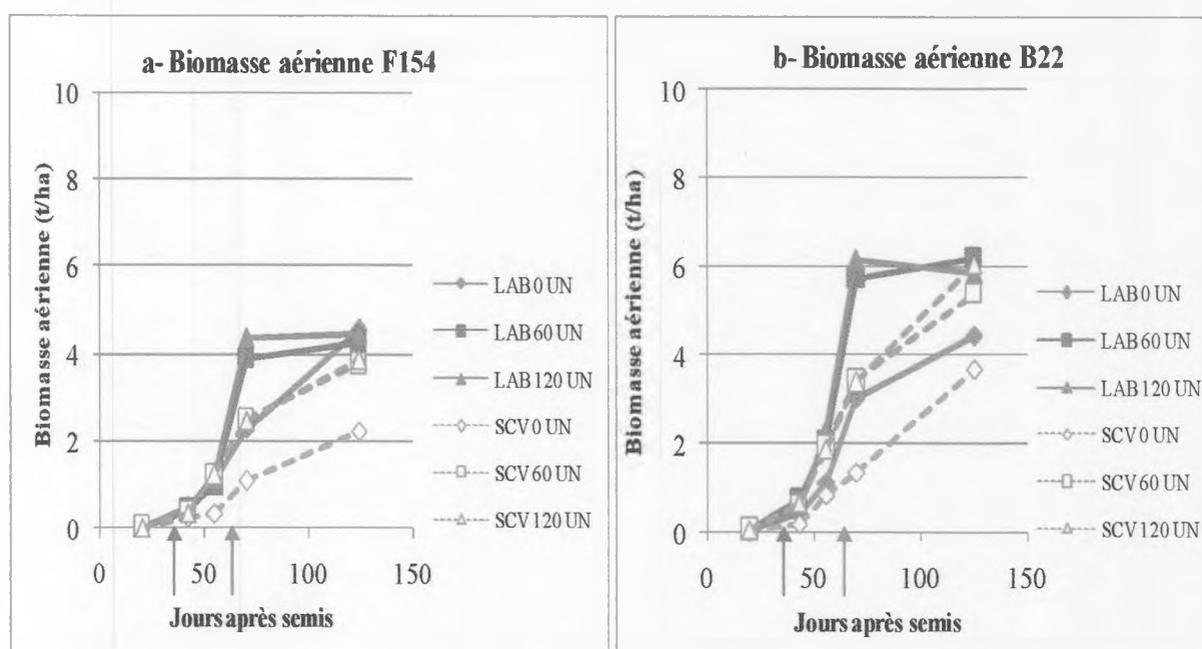
stade de développement du riz. Un couvert végétal plus dense favorise le développement de la pyriculariose, particulièrement au niveau des feuilles.

Pour la variété moyennement sensible à la pyriculariose (Tableau 4b), le rendement est fortement corrélé avec la densité du couvert au stade montaison. La pyriculariose foliaire est faiblement corrélée avec l'indicateur Dualex au stade montaison, et aucun paramètre n'est corrélé avec les notations de pyriculariose paniculaire, sûrement en lien avec des incidences de maladie très faibles.

3.2. Effets du système de culture et de fertilisation azotée sur le dispositif d'Ivory

3.2.1. Paramètres de croissance du riz

- *Evolution de la biomasse aérienne*



→ : 1^{er} apport d'urée (42 JAS), → : 2^{ème} apport d'urée (67 JAS).

Figure 12 : Evolution de la biomasse aérienne pour les variétés sensible F154 (a) et moyennement sensible B22 (b) à Ivory.

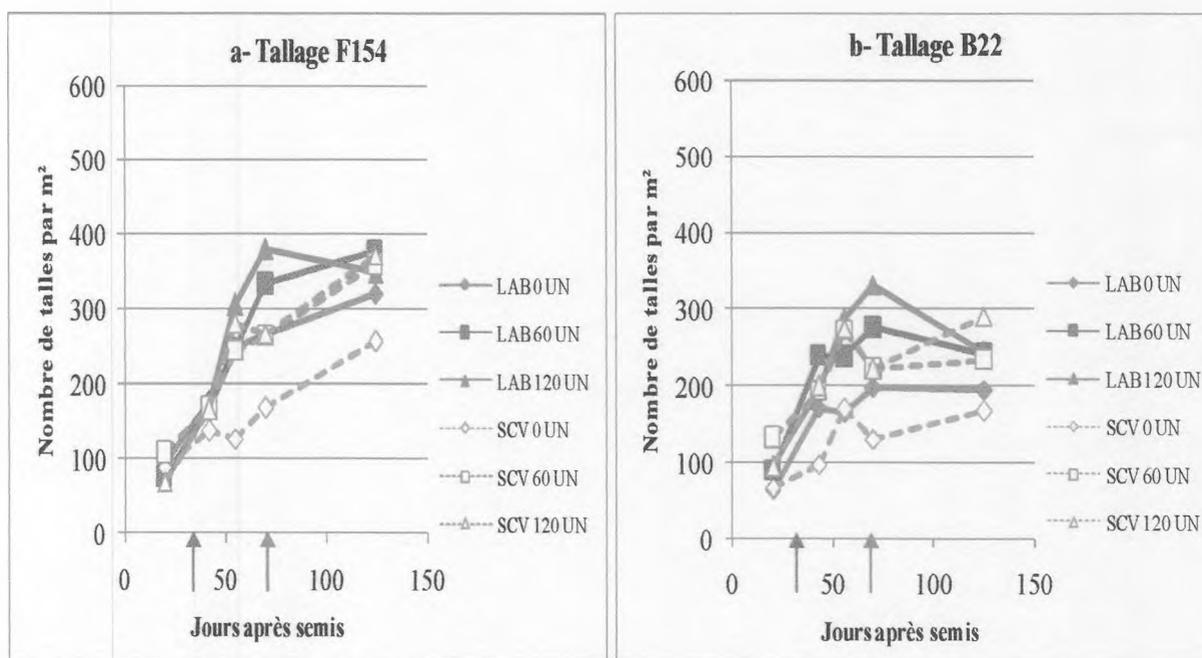
L'évolution de la biomasse aérienne des deux variétés est similaire mais à des niveaux différents.

Pour la variété sensible à la pyriculariose (Figure 12a), la biomasse aérienne est meilleure dans les parcelles en labour que dans les parcelles en SCV. En labour, on observe

une forte croissance durant le cycle pour tous les traitements. La quantité maximale de biomasse est atteinte à la récolte (125 JAS) mais elle est peu différente entre fertilisation (varie autour de 4,5 t/ha). En SCV, la croissance végétative se fait de manière plus lente, particulièrement en absence d'apport d'urée avec une quantité de biomasse faible à la récolte.

Pour la variété moyennement sensible à la pyriculariose (Figure 12b), les traitements avec apport d'urée produisent plus de biomasse aérienne que les traitements sans apport d'urée dans les deux systèmes de culture. En labour, le maximum de biomasse est atteint à l'épiaison (55 JAS) en cas d'apport d'urée (6 t/ha), mais le pic est atteint à la récolte en absence d'apport (4, 44 t/ha). En SCV, la production de biomasse reste faible au cours du cycle pour les traitements mais on observe un rattrapage de cette production pour les traitements avec apport d'urée.

- *Evolution du tallage*



→ : 1^{er} apport d'urée (42 JAS), → : 2^{ème} apport d'urée (67 JAS).

Figure 13 : Evolution du nombre de talles par m² pour les variétés sensible F154 (a) et moyennement sensible B22 (b) à Ivory.

Le comportement des deux variétés à produire des talles est différent en fonction du niveau de sensibilité du riz à la pyriculariose.

Pour la variété sensible (Figure 13a), le tallage est meilleur en labour qu'en SCV. En labour, on observe une forte production de talle au stade épiaison (72 JAS) pour le traitement à haut niveau de fertilisation. Par contre, la plante poursuit son tallage jusqu'à la récolte pour les traitements à 0 UN et 60 UN. En SCV, on note un tallage similaire au labour en début de cycle et la production continue jusqu'à la récolte pour tous les traitements.

Pour la variété moyennement sensible (Figure 13b), l'effet du système de culture est significatif sur le nombre de talles par m². En labour, le pic de production est atteint à l'épiaison pour tous les niveaux de fertilisation mais le nombre de talles par m² diminue à la récolte. En SCV, on observe une diminution du nombre de talles par m² au stade épiaison et la plante continue encore à produire des talles jusqu'à la récolte pour tous les traitements.

3.2.2. Statut azoté du riz

Tableau 5 : Valeurs SPAD et Dualex NBI en fonction du stade de développement du riz pour les variétés sensible F154 et moyennement sensible B22 à Ivory.

Traitements		Stade mi-tallage (41 JAS)		Stade début montaison (55 JAS)		Stade début épiaison (72 JAS)	
		SPAD	Dualex NBI	SPAD	Dualex NBI	SPAD	Dualex NBI
a-Variété sensible F154							
Labour	0 UN	40,2	28,9	38,0	23,0	36,7	17,1
	60 UN	41,7	31,7	41,0	26,8	41,3	20,4
	120 UN	41,8	32,7	42,7	30,1	44,4	22,7
SCV	0 UN	34,3	22,1	30,0	17,0	35,8	16,2
	60 UN	37,6	24,9	36,2	22,5	36,3	15,6
	120 UN	39,2	24,8	38,8	24,8	38,6	16,7
Analyse de variance							
Effet Système de culture		<0,0001	<0,0001	0,0001	<0,0001	0,0025	<0,0001
Effet Fertilisations		0,0025	0,0200	0,0003	<0,0001	0,0027	0,0058
Interaction SC x F		0,1464	0,9493	0,2445	0,4970	0,1668	0,0236
b- Variété moyennement sensible B22							
Labour	0 UN	35,0	21,8	34,6	19,0	38,3	20,5
	60 UN	36,7	25,1	36,5	22,6	37,8	20,5
	120 UN	38,0	26,5	39,1	24,5	40,4	23,5
SCV	0 UN	30,1	17,3	28,6	14,3	34,0	17,0
	60 UN	33,2	19,6	33,6	18,7	33,7	16,1
	120 UN	34,6	20,5	34,6	20,0	37,1	18,7
Analyse de variance							
Effet Système de culture		0,0006	<0,0001	0,0002	0,0001	0,0016	<0,0001
Effet Fertilisations		0,0222	0,0078	0,0008	0,0002	0,0629	0,0125
Interaction SC x F		0,9479	0,7797	0,3978	0,9226	0,9208	0,7528

Pour la variété sensible à la maladie (Tableau 5a), les valeurs SPAD et Dualex indiquent que les parcelles en labour assimilent plus d'azote que les parcelles en SCV durant le cycle du riz. En outre, l'apport d'urée améliore l'assimilation azotée. L'interaction entre système de culture et fertilisation n'existe que sur les valeurs Dualex au stade épiaison.

Pour la variété moyennement sensible à la maladie (Tableau 5b), on observe une meilleure assimilation de l'azote en labour qu'en SCV durant le cycle avec les deux indicateurs de statut azoté. Concernant l'effet de la fertilisation, on note une bonne réponse de l'indicateur Dualex à l'assimilation azotée durant le cycle. Par contre, le SPAD ne permet pas d'observer l'effet de la fertilisation au stade épiaison. Il n'y a pas d'interaction entre système de culture et fertilisation pour cette variété.

3.2.3. Pyriculariose foliaire et pyriculariose paniculaire

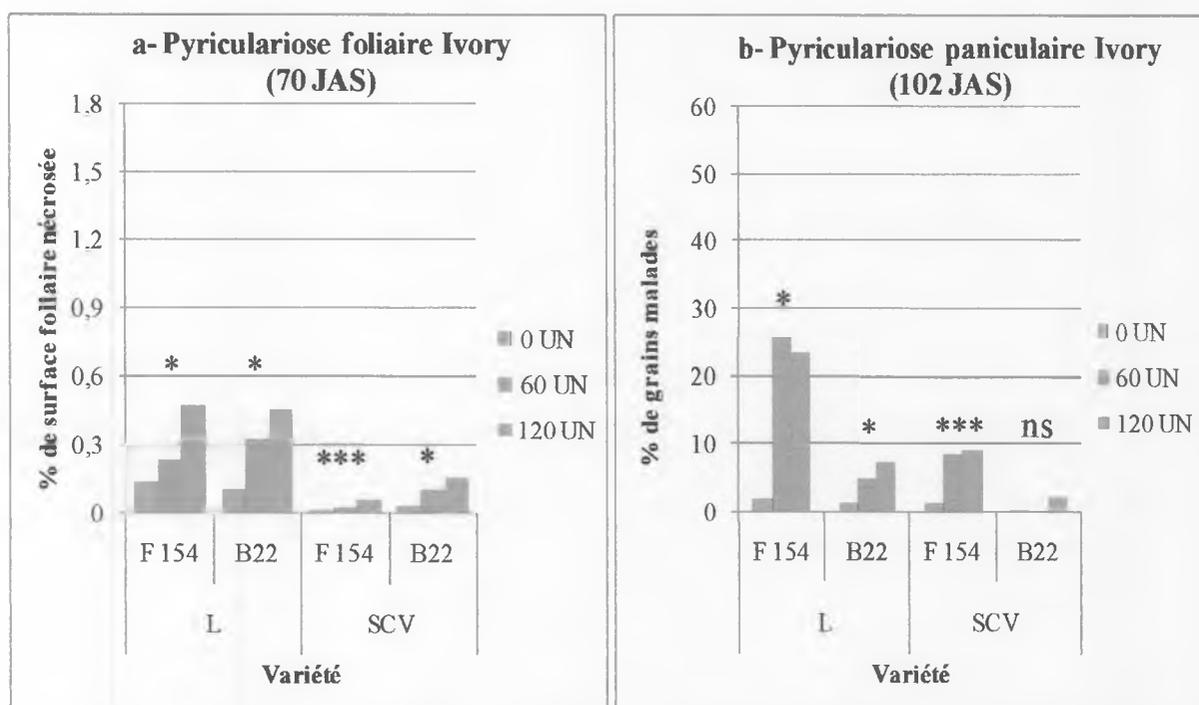


Figure 14 : (a) Pyriculariose foliaire (70 JAS) et (b) Pyriculariose paniculaire (102 JAS) pour les variétés sensible F154 et moyennement sensible B22 à Ivory.

(ns : $p > 0,05$; * : $0,05 < p < 0,01$; *** : $p < 0,001$).

Les attaques de pyriculariose foliaire sont plus modérées en SCV qu'en labour pour les variétés sensible et moyennement sensible à la pyriculariose (Figure 14a). La sévérité de la pyriculariose foliaire augmente avec la fertilisation dans les deux systèmes de culture. Les

deux variétés ont un comportement très proche au stade foliaire dans les deux systèmes de culture.

Les niveaux de maladie sont très différents entre les deux variétés au stade paniculaire (Figure 14b). Dans les deux systèmes de culture, l'effet de la fertilisation est très significatif pour ces deux variétés, c'est-à-dire, plus on apporte de l'azote, plus la maladie s'exprime. Cet effet significatif de la fertilisation n'est pas visible sur la variété moyennement sensible en SCV qui a une attaque très faible dans tous les niveaux de fertilisations.

3.2.4. Rendement et composantes du rendement

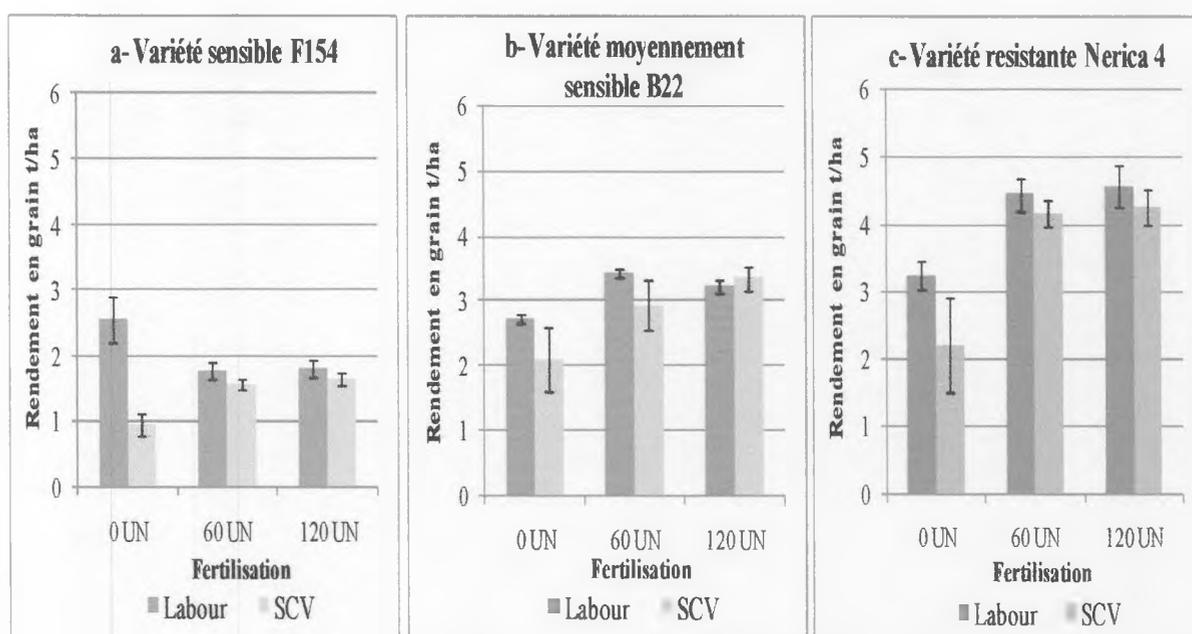


Figure 15 : Rendement en grain de paddy des trois variétés à Ivory.

Pour la variété sensible à la maladie (Figure 15a), le rendement est meilleur en labour qu'en SCV sans apport d'urée. Avec apport d'urée, il n'y a pas de différence entre systèmes de culture. En labour, il diminue en cas d'apport d'azote suite à la plus forte attaque de pyriculariose qui joue sur le pourcentage de grains pleins (Tableau 6a).

Pour la variété moyennement sensible à la maladie (Figure 15a), le rendement est faible pour le traitement sans apport d'urée dans les deux systèmes de culture. Mais, le rendement augmente avec la fertilisation, ceci s'explique par l'augmentation du nombre de panicule par plant (Tableau 6b).

Pour la variété résistante à la maladie (Figure 15c), le système labour produit plus de grain de paddy que le système SCV et cette différence s'explique par le nombre d'épillets par

panicule (Tableau 6c). Le rendement augmente avec la fertilisation dans les deux systèmes de culture.

Tableau 6 : Composantes du rendement des trois variétés à Ivory.

Traitements		Nombre de plants par m ²	Nombre de panicules par plant	Nombre d'épillets par panicule	% de grains pleins	PMG (en g)
a- Variété sensible F154						
Labour	0 UN	70,4	3,8	58,5	66,4	31,2
	60 UN	67,4	4,2	56,3	48,5	29,1
	120 UN	54,4	5,1	62,4	55,3	29,4
SCV	0 UN	52,0	3,3	39,8	57,1	31,9
	60 UN	78,1	3,3	65,8	70,0	32,2
	120 UN	58,3	4,3	53,6	56,8	30,1
<u>Analyse de variance</u>						
Effet Système de culture		0,4969	0,0285	0,2016	0,2219	0,0072
Effet Fertilisations		0,0138	0,0015	0,0855	0,3874	0,0618
Interaction SC x F		0,0546	0,7206	0,0457	0,0063	0,1473
b- Variété moyennement sensible B22						
Labour	0 UN	59,4	2,9	70,4	90,1	32,2
	60 UN	55,5	3,8	65,2	87,2	33,6
	120 UN	55,5	3,7	64,6	86,6	32,4
SCV	0 UN	55,8	2,6	63,4	88,1	33,3
	60 UN	56,9	3,3	59,5	79,8	34,4
	120 UN	58,6	3,9	63,6	79,9	33,3
<u>Analyse de variance</u>						
Effet Système de culture		0,9380	0,2334	0,4312	0,0830	0,0625
Effet Fertilisations		0,9596	0,0007	0,8064	0,2129	0,0788
Interaction SC x F		0,7682	0,2355	0,9026	0,7173	0,9655
c- Variété résistante Nerica 4						
Labour	0 UN	58,1	3,8	93,2	93,0	24,2
	60 UN	66,1	4,0	104,2	89,4	25,1
	120 UN	59,5	4,2	120,6	83,4	24,4
SCV	0 UN	61,5	3,0	75,9	89,9	26,0
	60 UN	72,8	4,1	81,2	90,2	25,6
	120 UN	66,4	3,9	86,2	76,7	25,3
<u>Analyse de variance</u>						
Effet Système de culture		0,4688	0,4351	0,0182	0,4255	0,0047
Effet Fertilisations		0,5852	0,3876	0,2881	0,0480	0,5337
Interaction SC x F		0,9788	0,6678	0,7534	0,7095	0,3052

3.2.5. Relations entre rendement, notations de pyriculariose, indicateurs du statut azoté et paramètres de croissance

Tableau 7 : Tableau des corrélations entre les différents paramètres mesurés pour les variétés sensible F154 (a) et moyennement sensible B22 (b) à Ivory.

Indicateurs de statut azoté et paramètres de croissance	a- Variété sensible (F154)			b- Variété moyennement sensible (B22)		
	Rendement	Pyriculariose foliaire (70 JAS)	Pyriculariose paniculaire (102 JAS)	Rendement	Pyriculariose foliaire (70 JAS)	Pyriculariose paniculaire (102 JAS)
SPAD (41 JAS)	0,47	0,61	0,63	0,58	0,61	0,70
Dualex NBI (41 JAS)	0,40	0,41	0,72	0,56	0,69	0,76
SPAD (55 JAS)	0,48	0,61	0,46	0,76	0,66	0,71
Dualex NBI (55 JAS)	0,41	0,71	0,61	0,75	0,75	0,78
SPAD (72 JAS)	0,18	0,60	0,47	0,61	0,42	0,46
Dualex NBI (72 JAS)	0,21	0,64	0,54	0,52	0,36	0,55
Biomasse aérienne (20 JAS)	-0,12	-0,45	0,01	0,27	-0,07	0,12
Biomasse aérienne (41 JAS)	0,20	0,09	0,57	0,51	0,46	0,41
Biomasse aérienne (55 JAS)	0,33	0,32	0,27	0,58	0,51	0,56
Biomasse aérienne (72 JAS)	0,18	0,64	0,73	0,61	0,65	0,80
Densité du couvert (55 JAS)	0,16	0,64	0,68	0,55	0,80	0,80
Densité du couvert (72 JAS)	0,49	0,35	0,55	0,62	0,73	0,82

Pour la variété sensible à la pyriculariose (Tableau 7a), aucun paramètre n'est corrélé avec le rendement. La pyriculariose foliaire est faiblement corrélée avec les indicateurs de statut azoté durant le cycle et les paramètres de croissance (densité du couvert végétal au stade montaison et biomasse au stade épiaison). La pyriculariose paniculaire est bien corrélée avec ces indicateurs et ces paramètres. Plus on apporte de l'azote, plus le couvert végétal est dense et plus la sévérité de la maladie est forte.

Pour la variété moyennement sensible à la pyriculariose (Tableau 7b), le rendement est fortement corrélé avec les indicateurs de teneur en azote au stade montaison. On note une forte corrélation entre la pyriculariose foliaire et la densité du couvert végétal. Ces notations de pyriculariose foliaire sont aussi corrélées avec les indicateurs de statut azoté au stade mi-tallage et montaison. La pyriculariose paniculaire est fortement corrélée avec les paramètres de croissance (densité du couvert végétal au stade montaison et épiaison, et biomasse au stade épiaison). En effet, plus la biomasse est importante, plus l'épidémie de pyriculariose se développe très vite. Elle est également bien corrélée avec les indicateurs de teneur en azote au stade mi-tallage et montaison.

Quatrième partie:

***D*iscussions**

QUATRIEME PARTIE : DISCUSSIONS

4.1. Bilan sur les effets du système de culture et de la fertilisation azotée sur les dispositifs d'Andranomanelatra et d'Ivory

4.1.1. Sur le dispositif d'Andranomanelatra

L'analyse des paramètres de croissance nous indique que la quantité de biomasse aérienne produite est meilleure en labour qu'en SCV pour les variétés sensible et moyennement sensible à la pyriculariose. Pour la production de talles, les parcelles labourées produisent plus de talles que les parcelles en SCV pour la variété sensible à la maladie. Cependant, le tallage recevant 76UN est meilleur en SCV qu'en labour à la récolte, ce qui constitue une exception. Pour la variété moyennement sensible à la maladie, on n'observe pas cette différence de production de talles entre le système labour et le système SCV.

Concernant l'importance de l'assimilation azotée, le SPAD indique que les parcelles en labour présentent plus d'azote que les parcelles en SCV au stade mi-tallage et montaison pour la variété sensible à la pyriculariose. Mais, l'amélioration de l'assimilation azotée est détectée avec le SPAD au stade montaison et épiaison, et avec le Dualex durant le cycle du riz. Pour la variété moyennement sensible à la pyriculariose, l'effet du système de culture est significatif sur l'indicateur Dualex durant le cycle du riz. L'effet de la fertilisation sur l'assimilation de l'azote est observé avec l'indicateur SPAD au stade montaison et avec l'indicateur Dualex au stade montaison et épiaison.

La pyriculariose foliaire et paniculaire causent des dégâts plus importants dans les parcelles en labour que dans les parcelles en SCV pour la variété sensible à la maladie. En labour, plus on apporte de l'azote, plus la sévérité de l'attaque de la pyriculariose est forte. Cependant, on observe des attaques moindres en système SCV même si la dose d'azote augmente. Par contre, la variété moyennement sensible à la maladie est moins attaquée dans les deux systèmes de culture. Les analyses de corrélations ont montré que la pyriculariose est bien reliée à la croissance au stade mi-tallage et montaison pour la variété sensible. Mais, elle peu corrélée avec les indicateurs de teneur en azote. Pour la variété moyennement sensible, aucun effet n'a pu être mis en évidence car les attaques de pyriculariose ont été très faibles.

Le rendement est très faible dans tous les traitements pour la variété sensible à la pyriculariose. Pour la variété moyennement sensible et résistante à la pyriculariose, le rendement est meilleur en labour qu'en SCV avec un effet non significatif de la fertilisation pour la variété moyennement sensible et un effet significatif de la fertilisation en SCV.

4.1.2. Sur le dispositif d'Ivory

Pour les paramètres de croissance, l'effet de la fertilisation est significatif sur la quantité de biomasse aérienne et la production de talles. La croissance est faible dans les parcelles en SCV en absence d'apport d'azote. Cependant, en présence d'apport, on note un retard de croissance dans ce système SCV en cours de cycle mais ce retard est compensé en fin de cycle. Pour les variétés sensible et moyennement sensible à la maladie, l'apport de 60UN est équivalent de l'apport de 120UN pour la production de biomasse aérienne, mais ces traitements avec apport d'urée diffèrent pour la production de talles.

En ce qui concerne la nutrition azotée du riz, les valeurs SPAD et Dualex montrent que le système labour assimile plus d'azote que le système SCV durant le cycle du riz pour la variété sensible et moyennement sensible à la pyriculariose.

Les parcelles en labour sont plus attaquées par la pyriculariose foliaire et paniculaire que les parcelles en SCV pour les variétés sensible et moyennement sensible à la pyriculariose. On observe un effet significatif de la fertilisation dans les deux systèmes de culture et sur les deux variétés. Le comportement des variétés face à la pyriculariose est très différent. En effet, la variété sensible est très touchée au niveau des feuilles et des panicules, alors que la variété moyennement sensible est fortement attaquée sur les feuilles mais peu sur les panicules. Par ailleurs, la sévérité de la pyriculariose est corrélée avec les paramètres de croissance (biomasse aérienne et densité du couvert végétal au stade montaison et épiaison) et les indicateurs de teneur en azote au stade mi-tallage et montaison.

Pour la variété sensible à la pyriculariose, le rendement est meilleur en labour qu'en SCV, mais il diminue en labour en présence d'apport d'azote car l'attaque de pyriculariose est plus sévère avec apport d'azote. Pour la variété moyennement sensible et résistante à la pyriculariose, on observe un effet significatif de la fertilisation mais il n'y a pas de différence significative entre le rendement en système labour et le rendement en système SCV.

4.2. Discussions sur les effets du système de culture et de la fertilisation azotée dans les deux sites d'expérimentation

4.2.1. Effet du système de culture sur la pyriculariose et le rendement

Dans le système labour, plus la biomasse aérienne est importante, plus le couvert végétal est dense et plus l'attaque de pyriculariose est forte. Cela est lié à l'humidité régnant dans le couvert végétal favorisant le développement de cette maladie (Kürschner et *al.*, 1992).

Par contre, dans le système de culture sous couverture végétale, le riz a un démarrage plus lent et cela modifie la structure du couvert végétal. D'après les études effectuées au Brésil, les chercheurs ont montré que le système de culture sous couverture végétale ou SCV diminuait la maladie (Séguy, 1997). A Madagascar, ce système de culture a été testé depuis plusieurs années et une réduction de la pyriculariose a été observée (Rakotoarisoa, 2006).

4.2.2. Effet du niveau de sensibilité de la variété sur la pyriculariose et le rendement

Dans les deux sites d'expérimentation, le rendement est faible pour la variété sensible à la maladie. Cela s'explique par une forte sévérité de la pyriculariose. Par contre, le rendement est acceptable pour la variété moyennement sensible à la maladie. Ces deux variétés se différencient par le niveau de sensibilité à la pyriculariose. En effet, l'attaque de pyriculariose est moins importante pour la variété moyennement sensible à la maladie.

4.2.3. Effet de la fertilisation azotée sur la pyriculariose et le rendement

- *Dans le site d'Andranomanelatra*

A Andranomanelatra, le Dualex semble plus sensible à détecter des différences de teneur en azote entre traitements que le SPAD. L'explication est que les faibles teneurs en azote ne sont détectés qu'avec le Dualex. Les valeurs SPAD et Dualex sont supérieures en labour par rapport celles en SCV. En effet, il y a probablement moins d'azote disponible pour la culture en début de cycle en SCV car une partie peut être immobilisée par les micro-

organismes du sol dans les résidus de récolte. Après minéralisation, l'azote devient disponible pour la plante.

Les symptômes de pyriculariose augmentent avec apport d'azote dans les parcelles labourées pour la variété sensible à la maladie. En effet, plus on apporte de l'azote, plus la plante est un substrat favorable au développement de la maladie (Chaboussou, 1985). Mais aussi, les réactions de défense naturelle dans la plante diminuent, la quantité de sucres simples et de glucoses augmentent et la plante devient de plus en plus attractive aux ennemis (Meurillon, 1986). Pour la variété moyennement sensible à la maladie, l'accroissement des symptômes de pyriculariose peut être faible à nul dans les deux systèmes de culture car elle est peu touchée par la maladie.

Le rendement diminue avec apport d'urée dans le système labour pour la variété sensible à la pyriculariose. En effet, les grains sont très attaqués par la pyriculariose. Pour la variété moyennement sensible à la pyriculariose, le rendement est meilleur car la sévérité de la pyriculariose est moindre pour cette variété

- *Dans le site d'Ivory*

A Ivory, l'apport d'azote influence la croissance du riz. En absence d'apport d'azote, on observe une faible production de biomasse aérienne et de talle pour les variétés sensible et moyennement sensible à la pyriculariose. En outre, les valeurs SPAD et Dualex augmentent en fonction de la quantité d'azote apportée pour ces deux variétés et les symptômes de pyriculariose s'aggravent avec apport d'azote dans ce site d'expérimentation.

La variété sensible est très touchée par la pyriculariose foliaire et paniculaire, alors que la variété moyennement sensible est peu attaquée au stade paniculaire. Ce dernier fait peut s'expliquer par la capacité d'attaque du champignon en fonction du stade de développement du riz (cuticule dur à cause de l'âge) et aussi par la morphologie particulière de la variété moyennement sensible (feuilles et tiges dressées) (Meurillon, 1986). Ce qui fait que cette variété est plus résistante aux attaques de pyriculariose paniculaire.

Le rendement est meilleur en absence d'apport d'azote, particulièrement en système labour pour les trois variétés utilisées. En cas d'apport d'azote, on note peu d'effet de la

fertilisation sur le rendement dans les deux systèmes de culture et sur les trois variétés. En effet, la pyriculariose est moins sévère et cela entraîne peu de répercussion sur le pourcentage de grains pleins.

4.2.4. Analyse comparative des deux sites d'expérimentation

En ce qui concerne les paramètres de croissance, la variété sensible à la pyriculariose produit moins de talle à Ivory qu'à Andranomanelatra. L'explication est que la faible température d'Andranomanelatra allonge la phase végétative du riz et favorise un fort développement végétatif. Cependant, on note une température assez élevée et forte quantité de lumière émise à Ivory. Cela favorise une forte production de grains lié à l'allongement de la phase reproductive (Rabezandrina, 2004).

Le rendement est meilleur dans le dispositif d'Ivory par rapport au dispositif d'Andranomanelatra. En tenant compte des conditions climatiques d'Ivory, sa température élevée induit un raccourcissement de son cycle végétatif. Ce rendement élevé est également lié à l'importance de l'attaque de la pyriculariose dans ce site d'expérimentation.

L'effet de la fertilisation sur l'assimilation de l'azote est observé sur l'indicateur Dualex durant le cycle du riz sur la variété sensible et moyennement sensible à la pyriculariose à Andranomanelatra. Par contre, cet effet est noté sur les deux indicateurs de statut azoté durant le cycle et sur ces deux variétés à Ivory. En effet, plus la température est basse, moins la plante assimile l'élément nutritif. Pour détecter une valeur faible de teneur en azote, le Dualex donne plus d'information que le SPAD. De ce fait, seul le Dualex permet la mise en évidence d'un effet de la fertilisation sur l'assimilation de l'azote durant le cycle à Andranomanelatra.

Dans les deux sites d'expérimentation, les attaques de pyriculariose sont plus modérées en SCV par rapport au labour. L'épidémie de la pyriculariose est plus importante à Andranomanelatra qu'à Ivory. Cela témoigne de la variabilité de l'épidémie en fonction des conditions climatiques. En effet, une température élevée lié à une faible pluviométrie freine le développement de l'épidémie dans le site d'Ivory. Mais d'autres facteurs peuvent entrer en jeu comme les caractéristiques du sol et la pression de la maladie en fonction de la présence de sources d'inoculum adapté à proximité des parcelles.

4.3. Analyse de la méthodologie

- *Avantages des méthodes d'étude*

La riziculture pluviale se développe sur des versants des collines sujettes à l'érosion. De ce fait, elle doit être intégrée dans un système qui améliore à la fois la fertilité du sol et limite l'érosion. Ce qui fait que le système sous couverture végétale est adopté dans cette étude car il semble être bien adapté pour remédier à ces problèmes de pauvreté des sols et d'érosion.

L'utilisation de deux appareils de mesures de statut azoté du riz (SPAD et Dualex) est très intéressante dans cette étude car il existe une cohérence des valeurs obtenues entre ces deux appareils de mesure. Les données de mesures obtenues se complètent dans les interprétations des résultats. En outre, l'avantage du Dualex repose sur la détection d'une valeur faible de teneur en azote. Le SPAD a l'avantage d'être plus maniable et facile à utiliser.

Quant au niveau de pression de l'attaque de pyriculariose (variable en fonction de la saison), la considération de plusieurs variétés de différents niveaux de sensibilité trouve son importance afin d'atteindre l'objectif. En cas de forte pression, la variété moyennement sensible serait alors la plus propice aux analyses alors qu'en cas de faible pression, la variété très sensible est mieux adaptée

- *Limites de l'étude*

Dans les deux sites d'expérimentation, nous n'avons pas effectué des mesures de statut azoté et des suivis épidémiologiques sur la variété résistante à la pyriculariose. Or, elle peut nous servir de témoin par rapport aux deux variétés utilisées.

Ensuite, les variétés utilisées pour tester l'effet de l'azote sur la pyriculariose sont différentes dans les deux dispositifs, sauf la variété sensible à la maladie. Également, les niveaux de fertilisation azotée diffèrent en fonction du site d'expérimentation. De ce fait, il est relativement difficile de faire des analyses comparatives entre les deux sites. Il est donc

nécessaire d'uniformiser les variétés et les niveaux de fertilisation dans les deux dispositifs afin d'améliorer la compréhension des résultats.

D'autres facteurs potentiels de la production de riz pluvial ne sont pas maîtrisés comme les attaques sévères des vers blancs particulièrement dans les parcelles en SCV. Ce facteur peut entraver les résultats obtenus malgré les mesures prises : traitement excessif du sol, traitement des semences (Cf. Annexe 8).

Enfin, dans les deux sites d'expérimentation, nous avons effectué quatre prélèvements de feuille au cours du cycle du riz pour diverses analyses : analyse ARN, analyse de la teneur en azote total et diagnostic foliaire. Nous avons aussi fait des marquages de feuille et des notations de pyriculariose sur ces feuilles afin de mettre en évidence le lien entre la sévérité de la pyriculariose et la teneur en azote des feuilles. Cependant, les résultats de ces analyses et de ces notations ne sont pas exploités dans cette étude. Ils sont surtout utilisés dans la suite des études du Projet GARP.

Conclusion et perspectives

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La riziculture pluviale est une solution alternative pour augmenter la production rizicole malgache. Dans ce travail, nous avons mis en évidence que les pratiques agronomiques permettaient de diminuer l'effet de cette maladie.

Dans les deux sites d'expérimentation, nous avons constaté que l'apport d'azote minéral favorise généralement l'épidémie de pyriculariose. Ce phénomène est lié au statut azoté du riz et à une forte densité de couvert végétal surtout sur les parcelles labourées. Il se peut aussi que le retard de croissance sur les parcelles sans apport d'azote minéral entraîne aussi un retard de l'épidémie. Nous avons également pu observer que l'effet de la fertilisation azotée sur la pyriculariose peut être moindre en système SCV.

De ce fait, la première hypothèse qui stipule que *la fertilisation azotée augmente la sensibilité du riz pluvial à la pyriculariose* est vérifiée. Cependant, elle varie selon le système de culture et la résistance de la variété. Le système SCV produit moins de grain de paddy que le système labour. Pourtant, les attaques de pyriculariose sont moins sévères et l'azote est bien assimilé par la plante dans ce système. Alors, la deuxième hypothèse selon laquelle *le système SCV régule l'offre en azote dans la plante et ses conséquences sur la maladie* est aussi vérifiée.

On peut donc dire que la régulation de la nutrition azotée est un moyen de lutte intéressante contre la pyriculariose car on peut jouer sur le fractionnement de l'apport d'azote et la période d'application dans la riziculture pluviale. Ce qui diminue la sévérité de la maladie et augmente le rendement en grain.

En outre, nous notons une cohérence d'information obtenue avec le SPAD et le Dualex. Cependant, le Dualex est plus sensible que le SPAD et cela permet de mettre en évidence un effet significatif du système de culture ou de la fertilisation. De ce fait, nous proposons l'utilisation du Dualex pour la mesure du statut azoté du riz dans l'avenir. De plus, cet appareil apporte beaucoup de renseignements sur les diverses composantes de la plante (chlorophylle, Flavonoïdes et NBI).

Comme le riz occupe une place primordiale dans l'alimentation malgache, la lutte contre la pyriculariose et l'amélioration de la productivité rizicole sont importantes. Cependant, nous avons constaté au cours de ce travail que la lutte contre la pyriculariose est une tâche difficile. Malgré les divers travaux de recherches effectués sur ce thème, les méthodes de lutte contre cette maladie ne sont pas totalement efficaces. Cependant, nous encourageons tous les chercheurs à poursuivre leurs efforts pour assurer la sécurité alimentaire à Madagascar et dans le monde.

Références

REFERENCES

- ✿ Agarwal P.C., Vnieves M.C. et Mathur S.B., 1994 - Maladies du riz transmises par les semences et les tests phytosanitaires, CTA, 95 pages.
- ✿ Agrios N.A., 1997 - Plant pathology, 4ème Edition, 635 pages.
- ✿ Andriantsimialona R.D., 2004 - Les maladies du riz sur les hautes terres, 4 pages.
- ✿ Arraudeau M., 1998 - Le riz irrigué, Collection Le technicien d'agriculture tropicale, Edition Maisonneuve et Larousse, 322 pages.
- ✿ Balasubramanian V., Morales A.C., Cruz R.T., Thiyagarajan T.M., Nagarajan R., Babu M., Abdurachman S., Hai L.H., 2000 - Adaptation of the chlorophyll meter (SPAD) technology for real-time nitrogen management in rice, a review, IRRI, 25 : 4 - 8 pages.
- ✿ Bourett T.M., Howard R.J., 1990 - In vitro development of penetration structures in the rice blast fungus *Magnaporthe grisea*, In : on the trail of a cereal killer: exploring the biology of *Magnaporthe grisea*, Annuaire, Revue, Microbiologie, 57 : 177 - 202 pages.
- ✿ Chaboussou F., 1985 - Une révolution agronomique, Santé des cultures, 270 pages.
- ✿ CIRAD et FOFIFA, 1993 - Riziculture pluviale d'altitude à Madagascar, 6 pages
- ✿ CIRAD-GRET-CTA, 2002 - Mémento de l'agronome, 1691pages.
- ✿ Couch B.C., Kohn L.M., 2002 - A multilocus gene genealogy concordant with host preference indicates segregation of a new species, *Magnaporthe oryzae*, Mycologia, 94 : 683 - 693pages.
- ✿ Datnoff L.E., Elmer W.H., Huber Don M., 2007 - Mineral nutrition and plant disease, American Phytopathological Society Press, 278 pages.

- ✿ David-Benz H., mars 2011 - A Madagascar : les prix du riz flambent sans rapport avec le marché international, Cirad
- ✿ Demotes-Mainard S., Boumaza R., Meyer S., Cerovic Z.G., 2008 - Indicators of nitrogen status for ornamental woody plants based on optical measurements of leaf polyphenolics and chlorophyll contents, 377 - 385 pages.
- ✿ Dordas C., 2008 - Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture, a review, *Agronomy for Sustainable Development*, 28 : 33 - 46 pages.
- ✿ FAO, 2004-2006 - Distribution of rice crop area, by environment, Table disponible en ligne: <http://www.irri.org/science/ricestat/data/may2008/WRS2008- Table30.pdf>.
- ✿ FAO, 2008 - En ligne : <http://faostat.fao.org>.
- ✿ FOFIFA et DPV, 1990 - Fiche technique de la protection des cultures : Pyriculariose du riz / Menalavitra / *Pyricularia oryzae cav.*, Fiche n° 02, 6 pages.
- ✿ Hamer L., Adachi K., Montenegro-Chamorro M.V., Tanzer M.M., Mahanty S.K, 2001 - Gene discovery and gene function assignment in filamentous fungi, in on the trail of a cereal killer: exploring the biology of *Magnaporthe grisea*, *Annuaire, Revue. Microbiologie*, 57: 177 - 202 pages.
- ✿ Huber D.M., 1980 - The role of mineral nutrition in defense, *Plant disease*, 381- 406 pages.
- ✿ Huber D.M., Graham R.D, 1999 - The role of nutrition in crop resistance and tolerance to diseases, in *Mineral nutrition of crops: Fundamental mechanisms and implications*, Edition Food Product Press, New York, 169 - 204 pages.
- ✿ IRRI, 1985 - Problèmes en riziculture, 2^{ème} Edition, 172 pages.
- ✿ Jacquot M. et Courtois B., 1983 - Le riz pluvial, *Technicien d'Agriculture tropicale*, Edition GP Maisonneuve et Larose, 134 pages.

- ✿ Kato H., 1974 - Epidemiological aspect of sporulation by blast fungus on rice plants, Japan agricultural research quarterly, Tropical Agriculture Research Center, 8 : 19 - 22 pages.
- ✿ Kim Y.S., OH J.Y., Hwang B.K., Kim K.D., 2008 - Variation in sensitivity of *Magnaporthe oryzae* isolates from Korea to edifenphos and iprobenfos, 1464 - 1470 pages.
- ✿ Krupinsky J.M., Bailey K.L., McMullen M.P., Gossen B.D., Turkington T.K., 2002 - Managing plant disease risk in diversified cropping systems, 94: 198 - 209pages.
- ✿ Kürschner E., Bonman J.M., Garrity D.P., Tamisin M.M., Pabale D., Estrada B.A., 1992 - Effects of nitrogen timing and split application on blast disease in upland rice, Plant Disease, 76 : 384 - 389 pages.
- ✿ Larousse, 1998 - Dictionnaire Encyclopédique, 1288 pages.
- ✿ MAEP, 2005 - Enquête annuelle sur la production agricole, service statistique agricole, campagne 2004-2005, 9-12 pages.
- ✿ Maltas A., Scopel E., Corbeels M., 2007 - Dynamique et valorisation de l'azote dans les systèmes de culture des Cerrados Brésiliens, Terres malgaches, n° 26, 57 - 60 pages.
- ✿ Meurillon A., 1986 - Principes de phytopathologie générale, 253 pages.
- ✿ Meynard J.M, David G., 1992 - Diagnostic de l'élaboration du rendement des cultures, INAPG, 9 - 19 pages.
- ✿ Moreau D., 1987 - L'analyse de l'élaboration du rendement du riz, GRET, 126pages.
- ✿ Notteghem J.L., 1977 - Field evaluation of horizontal resistance to rice blast disease, Agronomy Tropical, 180 - 192pages.
- ✿ Ou S.H., 1985 - Rice diseases, Commonwealth Mycological Institute, 2nd Edition, 380pages.

- ✿ Pande H.K., 1997 - Systèmes améliorées de riziculture pluviale, DPV, 121 pages.
- ✿ Papisolomontos A., 2002 - Système amélioré de riziculture pluviale, FAO, 30 pages.
- ✿ Pinflaurira M.Z., 2005 - Les vers blancs, les scarabées noirs ravageurs de la riziculture pluviale, Rapport de stage, Département d'Entomologie, 37 pages.
- ✿ Rabezandrina, 2004 - Manuel d'Agriculture générale, ESSA, Agriculture, 119 pages.
- ✿ Rakotoarisoa A.P., 2006 - Effet du système de culture, de la date de semis et du mode d'apport en azote sur la pyriculariose du riz pluvial, ESSA, Agriculture, 59 pages.
- ✿ Rakotonantoandro A., 1996 - Evaluation de la résistance à la pyriculariose de variétés malgaches de riz, Rapport de stage, ASJA, 7 pages.
- ✿ Ratsimba R.N.N., 2005- La pyriculariose du riz dans la région du Vakinankaratra : incidence et contrôle, ASJA, 63pages.
- ✿ Ribot C., Hirsch J., Balzergue S., Tharreau D., Notteghem J.L., Leburn M.H., Morel J.B., 2007 - Susceptibility of rice to the blast fungus, *Magnaporthe grisea*, Journal of plant physiology, 165 : 114 - 124 pages.
- ✿ Richard J., Barbara V., 1996 - Breaking and entering: Host penetration by the fungal rice blast pathogen *Magnaporthe grisea*, Annuaire, Revue, Microbiologie, 50 : 491 - 512 pages.
- ✿ Rossman A.Y., Howard R.J., Valent B., 1990 - *Pyricularia grisea*, the correct name for the rice blast disease fungus, 20 pages.
- ✿ Seebold K.W., Datnoff L.E., Correa-Victoria F.J., Kucharek T.A., Snyder G.H., 2004 - Effects of Silicon and Fungicides on the Control of Leaf and Neck Blast in Upland Rice, Plant Disease, 88 : 253 - 258 pages.

- Seebold K.W., Datnoff L.E., Correa-Victoria F.J., Kucharek T.A., Snyder G.H., 2000 - Effect of Silicon Rate and Host Resistance on Blast, Scald, and Yield of Upland Rice, *Plant Disease*, 84 : 871 - 876pages.
- Séguy L., 1980 - Quelques réflexions sur la résistance du riz à la pyriculariose, 33 pages.
- Séguy L., 2006 - Techniques de SCV à Madagascar, Régions des hauts plateaux, 54 pages.
- Séguy L., Bouzinac S., Pacheco A, 1989 - Les principaux facteurs qui conditionnent la productivité du riz pluvial et sa sensibilité à la pyriculariose sur sols rouges ferrallitiques d'altitude, Brésil.
- Sester M., Raboin L.M., Ramanantsoanirina A., Tharreau D., 2008 - Toward an integrated strategy to limit blast disease in upland rice, *Endure International conference on diversifying crop protection*, France.
- Sester M., Raveloson H., Michellon R., Dusserre J. and Tharreau D., 2010 - Cropping system to limit blast disease in upland rice (oral presentation), 5th International Rice Blast Conference, Arkansas USA.
- Talbot, N., 2003 - On the trail of a cereal killer: Exploring the Biology of *Magnaporthe grisea*, *Annual Review of Microbiology*, 57 : 177 - 202 pages.
- Tremblay N., Wang Z. and C. Bélec, 2010- Performance of Dualex in spring wheat for crop nitrogen status assessment, yield prediction and estimation of soil nitrate content, *Plant Nutrition*, 33 : 57 - 70 pages.
- User manual for the Sun scan canopy analysis system type SS1, 2008.
- Velly J., 1975- La fertilisation en silice du riz à Madagascar, *Agronomie tropicale*, n° 4, 1975pages.
- Ziegler R., Leong S.A., Teng P.S., 1994 - Rice blast disease, IRRI, 626 pages.

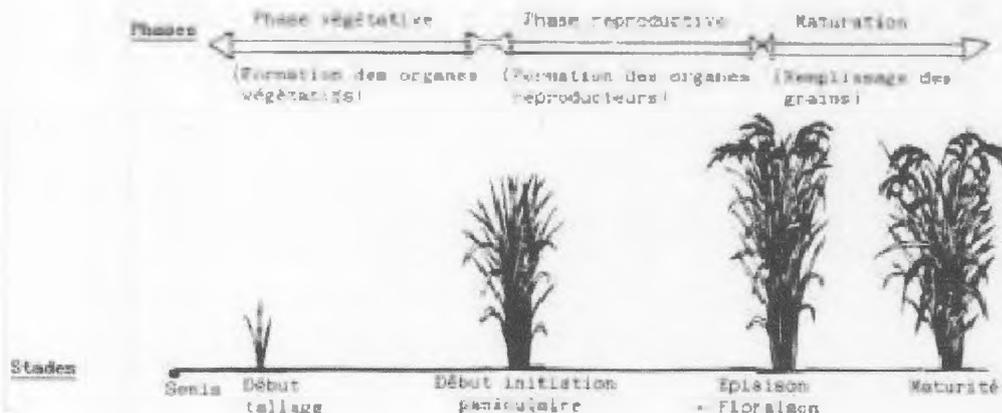
Annexes

ANNEXES

Annexe 1 : Classification du riz (Arraudeau, 1998)

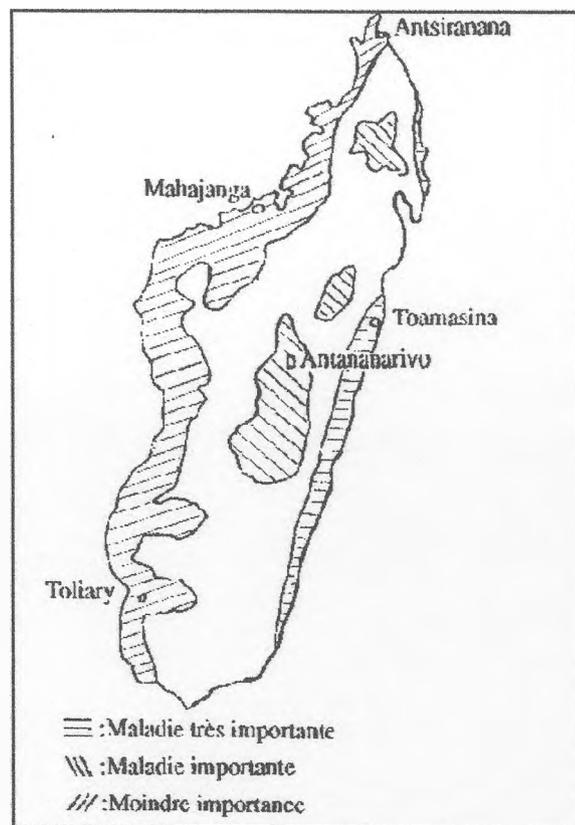
- Règne : Végétal
- Division : Spermaphytes
- Embranchement : Phanérogames
- Sous-embranchement : Angiospermes
- Classe : Monocotylédones
- Ordre : Gluniflores
- Famille : Poacées ou Graminées
- Genre : *Oryza*
- Espèces cultivées : *Oryza glaberrima* et *Oryza sativa*

Annexe 2 : Cycle du riz, composantes des rendements élaborées et période de formation de ces composantes au cours du cycle du riz (Moreau, 1987 ; Meynard et David, 1992).

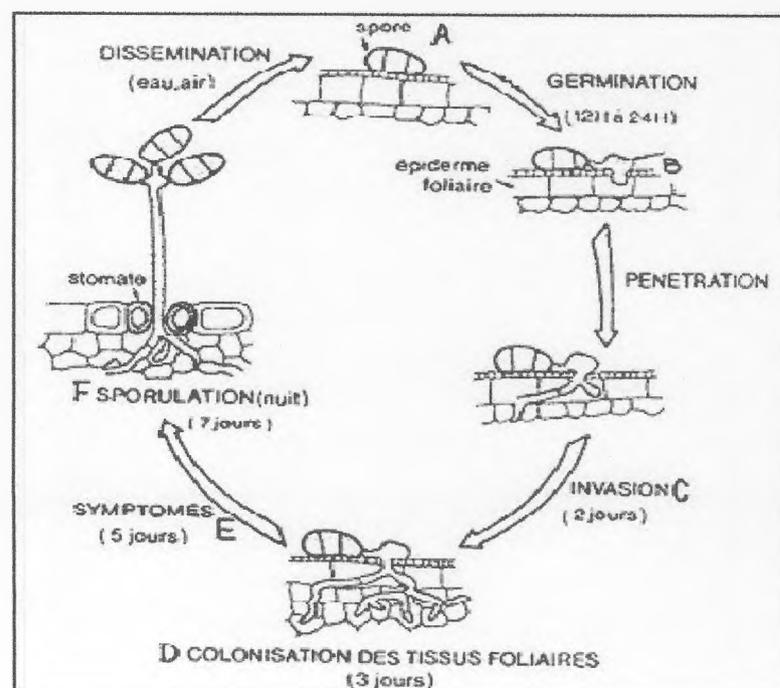


Stade	Début tallage	Début initiation paniculaire	Epiaison Floraison		maturaison
Composantes des rendements élaborées	NP/m ²	NPa/P NPa/m ²	Nep/Pa	% GP	PG
Période de formation des composantes	Nbre de grain/m ²			Poids d'un grain	
	Nbre de plants/m ²				
	Nbre d'épis par plants				
	Nbre d'épillets par épi				
	Nbre de grains par épillet				

Annexe 3 : Répartition de la pyriculariose du riz à Madagascar (FOFIFA et DPV, 1990).



Annexe 4 : Cycle d'infection foliaire de la pyriculariose du riz (Dobinson et Hamer, 1991 cité par Ratsimba, 2005).



Annexe 5 : Caractéristiques des plantes de couverture

- *Avoine (Avena sativa)*

C'est une céréale annuelle qui s'adapte à un climat tempéré ou tropical à saison fraîche. Il est utilisé comme plante fourragère et pour la production de biomasse en saison froide sur les Hautes-terres. Il se cultive seule ou avec la vesce. Il assure le contrôle des adventices par effet allélopathique et apporte de l'urée au semis de la culture suivante.

- *Eleusine (Eleusine corracana)*

C'est une graminée qui a la propriété de fixer des quantités d'azote substantielles (entre 50 à plus de 100 kg/ha) dans sa rhizosphère grâce à des bactéries libres (Genre Azotobacter, Bejerinckia et Azospirillum). Cette plante peut être associée avec des cultures ou utilisé comme couverture morte.

- *Pois d'angole (Cajanus cajan)*

C'est une légumineuse alimentaire volubile, peu exigeante, favorisant la décompaction du sol et la fixation d'azote. Il poursuit son développement au cours de la saison sèche associée à la culture principale.

- *Vesce (Vicia villosa)*

C'est une légumineuse alimentaire volubile utilisé comme plante fourragère et pour la production de biomasse en saison froide. Elle maîtrise les adventices permettant ainsi de produire sans herbicides l'année suivante (riz pluvial). Le mulch produit par la vesce contrôle moins bien les adventices que celui de l'avoine quand il n'est pas très épais. La fauche avant la floraison est nécessaire pour qu'il ne continue pas son développement dans la culture suivante. La vesce se resème naturellement permettant une pérennisation du système. Avec la fixation d'azote, elle permet de réduire la dose à apporter pour la culture suivante.

Annexe 6 : Sun Scan (Sun scan user manual, 2008).

Le Sun scan est un appareil muni d'un trépied, d'un capteur hémisphérique au-dessus, d'un fil reliant le capteur à une barre de 1 m et à un appareil enregistrant les valeurs de LAI. Le trépied est placé en plein champ et il faut vérifier la verticalité du capteur hémisphérique à

chaque installation. Ce capteur mesure le rayonnement direct et le rayonnement diffus. Cet appareil mesure l'interception du rayonnement au-dessous du couvert végétal et l'intensité du rayonnement au-dessus. Cela permet de mesurer la lumière qui passe au-dessus du couvert et la lumière passant sur le sol. Il permet également une mesure destructive du rayonnement en haut et en bas du couvert.

Avant l'utilisation de cet appareil, les valeurs de LAI ont été estimées à l'aide d'un planimètre feuille par feuille. Mais actuellement, on peut se référer avec cette estimation en utilisant le Sun Scan. Les mesures se font sur une densité de plante élevée sinon les rayonnements ne font que passer à travers le couvert. La barre passe dans le couvert en faisant un cercle de 1 m de rayon et enregistre les mesures à chaque passage. Les mesures passent sur toute la longueur de la barre.



Figure 16 : Sun Scan (DUSSERE Julie).

Annexe 7 : Méthode d'estimation de l'importance de l'épidémie de pyriculariose.

- *Pyriculariose foliaire*

Incidence foliaire (%) = nombre de talle infectées / nombre de talle total x 100

Sévérité foliaire (%) = moyenne du % de surface foliaire nécrosée sur les 4 premières feuilles d'une talle infectée

Sévérité de la parcelle (%) = incidence foliaire (%) x sévérité foliaire (%) / 100

- *Pyriculariose paniculaire*

Incidence paniculaire (%) = nombre de panicules infectées / nombre de panicules total × 100

Sévérité paniculaire (%) = nombre de grain malade sur les panicules infectées

% de grains malades = incidence paniculaire (%) x sévérité paniculaire (%) / 100

Annexe 8 : Vers blancs (Pinflaurira, 2005).

Les vers blancs sont des larves à vie endogée, de couleur blanche, de forme typique arquée en C et une tête fortement chitineuse. Ce sont des coléoptères de la superfamille de Scarabeoidea et de la famille des Scarabeoidea. Les scarabées noirs « *Heteronychus sp* », communément appelés « Antsana » ou « Fano » ou « Voana » selon les régions de Madagascar, constituent l'ennemi principal de toutes cultures pluviales, entre autre, le riz pluvial. Ce sont surtout les adultes qui font des dégâts en dilacérant les collets des jeunes plantes. Dès la levée, ils envahissent les semis, se fixent au collet juste sous la surface du sol et dilacèrent avec leurs mandibules les jeunes plants pour se nourrir. Les pieds attaqués se flétrissent, jaunissent et se dessèchent. C'est pourquoi on observe des tâches éparses de jeunes plantes desséchées sur les champs.

La préparation du sol, les modes de semis et sa densité sont les méthodes les plus utilisées par les paysans. Le coût des produits phytosanitaires est relativement élevé et ne sont pas à leur portée, toutefois, la lutte chimique est beaucoup plus appréciable pour lutter contre les vers blancs. Les produits utilisés sont le Gaucho T 45WS (Imidaclopride + Thirame) en traitement de semences et le Carbofuran 5G en traitement du sol.