



Rapport de stage CEI 2^{ème} période

ETUDE DE L'IMPACT DE LA FERTILISATION AZOTEE ET DU SYSTEME DE CULTURE SUR LA PYRICULARIOSE DU RIZ PLUVIAL

Cas des Hauts Plateaux de Madagascar

Par **Héloïse Héraud**

Maitre de stage : Mme **Mathilde Sester**, Cirad

Tuteur référent : M. **Lilian Gout**

Tuteur associé : M. **Jean-Denis Faure**

Du 12/01/2013 au 12/07/2013



TABLE DES MATIERES

ORGANISME D'ACCUEIL.....	2
I. INTRODUCTION.....	3
II. CONTEXTE DE L'ETUDE	4
1. LE RIZ A MADAGASCAR	4
2. CAS DU RIZ PLUVIAL.....	4
3. LA PYRICULARIOSE.....	7
4. INTERACTION ENTRE SYSTEME DE CULTURE ET PYRICULARIOSE	10
5. HYPOTHESES DE TRAVAIL ET PROBLEMATIQUE	12
III. MATERIELS ET METHODES.....	13
1. ZONE D'ETUDE	13
2. DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX.....	14
3. COLLECTE DES DONNEES.....	16
4. TRAITEMENT DES DONNEES ET ANALYSES STATISTIQUES	19
IV. RESULTATS ET INTERPRETATION.....	23
1. IMPACT DU SYSTEME DE CULTURE ET DE LA FERTILISATION AZOTEE SUR LA PYRICULARIOSE	23
2. EFFET DU DEVELOPPEMENT VEGETATIF SUR LES ATTAQUES DE PYRICULARIOSE	28
3. IMPACT DE L'EQUILIBRE MINERAL SUR LA RESISTANCE A LA PYRICULARIOSE	30
4. EVOLUTION DE LA MALADIE : LIEN ENTRE PYRICULARIOSE FOLIAIRE ET PYRICULARIOSE PANICULAIRE	31
5. EFFET DE LA PYRICULARIOSE SUR LE RENDEMENT	32
V. DISCUSSION GENERALE	35
1. REPONSES AUX HYPOTHESES DE GARP.....	35
2. VARIABILITE DES RESULTATS AU COURS DU PROJET	36
3. TRAITEMENT DES DONNEES.....	37
VI. CONCLUSION.....	38
VII. REMERCIEMENTS.....	39
VIII. BIBLIOGRAPHIE.....	40

ORGANISME D'ACCUEIL

Mon stage s'est déroulé au Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement), sur le site d'Antsirabe à Madagascar du 12 janvier au 28 juin, puis sur le site de Montpellier du 1^{er} au 12 juillet.

Le Cirad est un centre de recherche français placé sous la double tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère des Affaires étrangères et européennes. Sa mission est d'une part la production et la transmission de nouvelles connaissances, pour accompagner le développement agricole des pays du Sud en partenariat avec les centres de recherche locaux, et d'autre part la contribution au débat sur les grands enjeux mondiaux de l'agronomie. En tant qu'organisme de recherche finalisée, sa programmation s'établit à partir des besoins du développement sur le terrain. Ses activités relèvent à la fois des sciences du vivant, des sciences sociales et des sciences de l'ingénieur appliquées à l'agriculture, à l'alimentation et aux territoires ruraux.

Le Cirad concentre ses recherches autour de 6 axes scientifiques prioritaires, menés par 3 départements scientifiques : Systèmes biologiques (Bios), Performance des systèmes de production et de transformation tropicaux (Persyst) et Environnement et sociétés (ES) regroupant 36 unités de recherche en tout.

Le département scientifique Persyst, en particulier, s'intéresse aux processus biologiques en interaction avec les conditions environnementales et les interventions techniques.

Au sein de ce département, l'unité propre de recherche (UPR) Systèmes de cultures annuelles (SCA) s'adresse aux agricultures familiales du Sud. Son objectif est de répondre au défi de « l'intensification écologique », c'est-à-dire de permettre aux agriculteurs de produire plus et de façon plus régulière, en améliorant le recours aux services écosystémiques.

L'UPR SCA est organisée en cinq équipes : CARABE (CARactérisation et gestion intégrée des Risques d'origine Biotique pour les Écosystèmes cultivés), QUALITE, ADEMES (Aide à la DÉcision Multi-Échelle et Spatialisation), CESCO (Conception et Évaluation des Systèmes de Culture Annuels) et SCRiD (Systèmes de Culture et Rizicultures Durables).

Cette dernière équipe est basée à Madagascar, où elle travaille à la caractérisation et à l'amélioration de systèmes de culture durables à base de riz pluvial d'altitude, en collaboration avec le centre de recherche agronomique national (FOFIFA) et l'université d'Antananarivo.

L'un des projets phares de l'équipe SCRiD est le projet GARP (Gestion Agronomique de la Résistance du riz à la Pyriculariose), dont l'objectif est d'approfondir les connaissances sur les interactions entre mécanismes de résistance à la pyriculariose et métabolisme de l'azote, dans des systèmes de culture en agriculture de conservation. Ce projet est financé par le programme Ecosystèmes, territoires, ressources vivantes et agricultures (SYSTERRA) de l'ANR (Agence Nationale de la Recherche).

I. INTRODUCTION

La pyriculariose, maladie fongique du riz (*Oryza sativa*) causée par *Magnaporthe oryzae* pouvant entraîner des pertes allant jusqu'à 100% des récoltes, est un problème majeur dans tous les pays qui cultivent cette céréale. A Madagascar, la lutte contre la pyriculariose fait l'objet de nombreux projets de recherche, notamment dans la région des Hautes Terres, la plus anthropisée du pays.

Dans une optique de mise en place de nouveaux modèles d'agriculture durable dits agroécologiques, permettant de stabiliser les rendements agricoles tout en prenant en compte les dégâts des bio-agresseurs, le projet GARP (Gestion Agronomique de la Résistance du riz à la Pyriculariose) a été initié par le CIRAD en 2009 en France, au Brésil, en Bolivie et à Madagascar. Le but de ce projet est d'identifier les mécanismes mis en jeu dans l'interaction entre la résistance de la plante à la pyriculariose et les pratiques agronomiques. La démarche consiste à mesurer l'effet de systèmes d'intensification écologique, les Semis directs sur Couvert Végétal (SCV ; Capillon et Séguy, 2002), sur la dynamique du métabolisme de l'azote et sur la résistance de la plante à ses bio-agresseurs, par comparaison avec les systèmes de culture traditionnels avec labour. Le projet se compose de trois axes :

- Mesurer l'effet des systèmes de culture sur la pyriculariose (expérimentation agronomique comparant des SCV avec des systèmes traditionnels)
- Etudier les relations entre nutrition azotée et sensibilité à la pyriculariose
- Etudier les mécanismes d'interactions entre métabolisme de l'azote et mécanismes de défense de la plante

Afin de mener à bien ces trois tâches, le projet GARP a été mis en place pour une durée de cinq campagnes successives (2009 à 2014), au cours desquelles des suivis épidémiologiques ainsi que des mesures du statut azoté des plantes, du développement du couvert végétal et de rendement ont été réalisées. Du fait de la variété de ces mesures, ce projet se caractérise par une approche transversale, du champ au laboratoire.

Mon travail a consisté d'une part à participer à la campagne 2012-2013 sur les essais, en effectuant des notations au champ, et d'autre part à rendre opérationnelle la base de données initiée dans le projet afin de faire une synthèse des données collectées au cours des quatre premières années. Afin de pouvoir analyser l'ensemble des données, j'ai également travaillé en collaboration avec les statisticiens impliqués dans GARP pour tester nos hypothèses de travail.

L'objectif de ce rapport est de présenter une analyse synthétique des résultats des essais menés à Madagascar dans le cadre du projet GARP. Dans un premier temps, j'exposerai les connaissances actuelles sur les interactions entre les pratiques agronomiques de culture du riz pluvial et l'épidémiologie de la pyriculariose. Cette partie aboutira à l'établissement des hypothèses de travail et à la problématique de l'étude. Je détaillerai alors la démarche expérimentale suivie lors des différents essais au champ. La troisième partie présentera les résultats statistiques des suivis, qui seront discutés.

II. CONTEXTE DE L'ETUDE

1. Le riz à Madagascar

Avec plus d'un million neuf cent mille hectares de surface cultivée en riz et une production de plus de cinq millions de tonnes (FAO, 2011), Madagascar se classe seizième plus gros producteur mondial de riz, et deuxième pays rizicole africain. Et pour cause : non seulement le riz est l'aliment de base de l'alimentation malgache (un individu en consomme en moyenne 130kg/an), mais il occupe également une place culturelle très importante, et reste la principale source de revenus des agriculteurs, à raison de 48% du total des revenus agricoles générés. Dans la région du Vakinankaratra, où les essais du projet GARP ont été menés, 86,5% des ménages cultivent du riz, contribuant de 36% à la production totale malgache (Penot *et al.*, 2009 ; Instat, 2010).

Traditionnellement, c'est le riz irrigué qui est la principale culture de Madagascar, deuxième pays d'Afrique subsaharienne en termes de superficie irriguée. En 2006, l'agriculture irriguée représentait 15% du PIB, 70% de la production agricole et 88% de la production de riz. Cependant, l'accroissement de la pression démographique a peu à peu entraîné la saturation des zones de bas-fond destinées à cette riziculture irriguée. Afin de continuer à répondre aux besoins alimentaires croissants, la culture du riz pluvial (*vary an-tanety*) s'est développée, permettant d'étendre la surface rizicole aux versants des collines jusque là peu exploités, les *tanety*. La région des Hautes Terres est particulièrement concernée par le phénomène : en 2007, 6500 ha étaient plantés en riz pluvial, alors que 15000 ha étaient prévus pour 2012 (PRDR). En effet, la culture du riz pluvial a longtemps été cantonnée à des altitudes inférieures à 1200 m, mais cette frontière a été repoussée grâce au travail des généticiens qui ont su développer des variétés adaptées à l'altitude à partir de la population locale « Latsika », particulièrement tolérante au froid (Dzido *et al.*, 2004).

2. Cas du riz pluvial

Alors qu'elle ne représente que 4% de la production mondiale de riz (IRRI), la riziculture pluviale représente presque un sixième des surfaces rizicoles de Madagascar. Cette culture est surtout utilisée pour pallier à l'insuffisance de la production en riz irrigué et est principalement destinée à l'autoconsommation (Dabat, 2005 ; Instat 2010).

2.1. Cycle du riz pluvial

La culture du riz pluvial a lieu pendant la saison des pluies qui dure à Madagascar d'octobre à avril. Son cycle de développement dure entre 100 et 130 jours, selon la variété cultivée et les conditions climatiques (température, pluviométrie, ensoleillement), et se compose de trois phases (Moreau, 1987), illustrées par la Figure II-1 :

- **La phase végétative** est caractérisée par la formation des talles et des feuilles et par l'augmentation de la surface foliaire. C'est pendant cette phase que le nombre de plantes par m² est déterminé, ainsi que le nombre de panicules par plante, bien que l'élaboration de cette dernière composante se poursuive lors de la phase reproductive.
- **La phase de reproduction** débute à l'initiation paniculaire et se termine à l'épiaison-floraison. Elle dure environ 35 jours pendant lesquels le nombre d'épillets par panicule est déterminé. Durant cette phase, la plante est très sensible au stress hydrique et aux basses

températures, qui peuvent la prolonger.

- **La phase de maturation** dure au moins 25 jours, et correspond à la période de remplissage des grains. C'est pendant cette phase que se fait l'élaboration du poids d'un grain et qu'est déterminé le pourcentage de grains remplis. La pluie ou les basses températures peuvent allonger cette phase tandis que le soleil et la chaleur la raccourcissent.

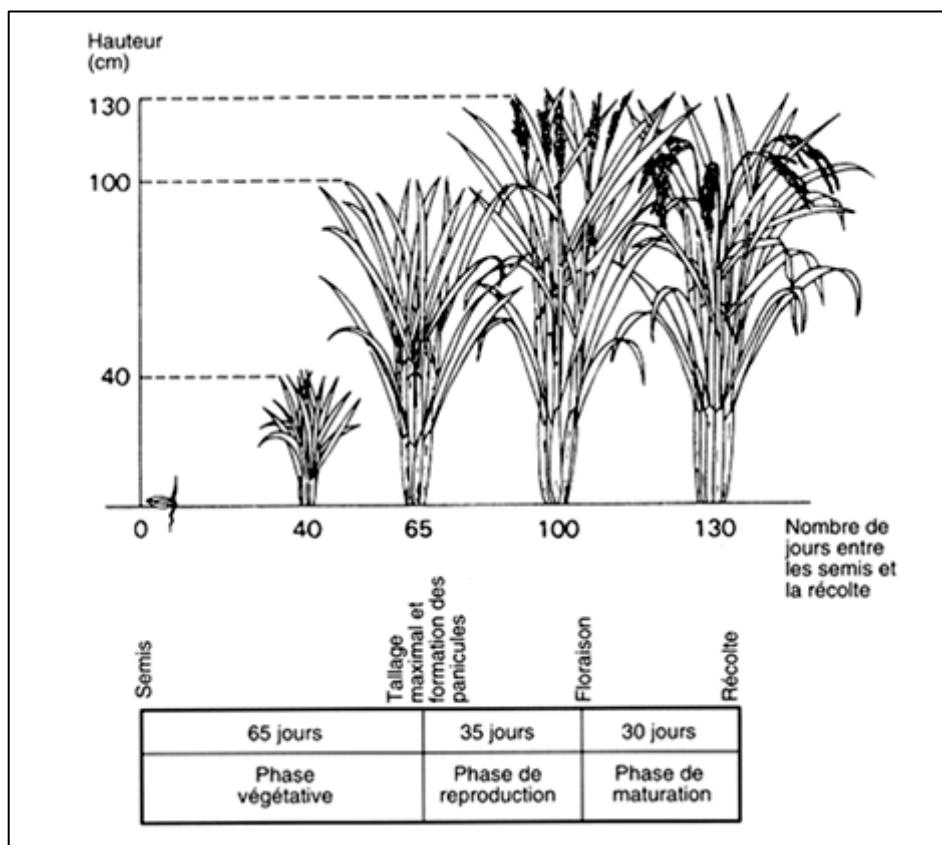


Figure II-1. Phases de croissance d'un plant de riz pluvial. - Source : IRR

C'est l'intervalle de temps qui sépare le semis de la phase d'épiaison-maturité qui fait le plus varier la durée du cycle :

- S'il est inférieur à 80 jours, on parle de variétés précoces
- S'il est supérieur à 105 jours, on parle de variétés tardives
- S'il est intermédiaire, on parle de variétés de cycle moyen.

2.2. Contraintes de la culture pluviale

Si le riz pluvial semble être une solution intéressante pour endiguer le problème de saturation des bas-fonds, de nombreuses contraintes sont associées à sa culture, ne permettant pas d'atteindre des rendements très élevés (2,5 t/ha de paddy en moyenne dans la région du Vakinankaratra selon Penot *et al.*, 2009). Les facteurs limitant sont de nature technique, financière, logistique ou économique (FAO ; Rakotofiringa et Tokarski, 2007), mais aussi agronomique.

2.2.1. Contraintes pédologiques

Le bon développement du riz pluvial dépend fortement de la capacité du sol à retenir

l'humidité (Olofintoye et Ajayi, 1996), ce qui proscrit *de facto* sa culture sur les sols grossiers ou peu profonds. Les sols ferrallitiques typiques des *tanety* sont par ailleurs très acides et pauvres en azote, en phosphore, et en soufre. Ils ont également une teneur élevée en fer et en aluminium qui sont des éléments susceptibles d'être toxiques pour la plante.

Sur les parcelles en pente, les fortes pluies accélèrent considérablement l'érosion des couches arables riches en éléments nutritifs, conduisant à une forte perte de fertilité des sols des cultures pluviales en général.

Toutes ces conditions pédologiques fragilisent le riz, le rendant plus sensible aux maladies telles que la pyriculariose.

2.2.2. Contraintes climatiques

Les facteurs climatiques tels que la température, le rayonnement et le vent influencent le rendement du riz par leurs effets sur la croissance du plant et sur les processus physiologiques impliqués dans la formation du grain. Le rendement peut également être affecté par ces facteurs de manière indirecte, via une augmentation des dégâts causés par les maladies et les ravageurs.

La quantité et la variabilité des pluies ont des conséquences importantes sur le rendement. En effet, le stress hydrique intervenant pendant les stades de floraison ou de remplissage des grains entraîne une stérilité accrue. S'il intervient plus précocement dans le cycle de la plante, il peut même entraîner la mort de la plante.

Les températures basses ont également des effets négatifs sur le développement du plant de riz : inhibition de la germination, retard de l'initiation florale, forte stérilité... (Chaudhary *et al.*, 2003). Ainsi, dans les zones de haute altitude telles que les Hautes Terres malgaches, il est impératif que les variétés cultivées soient particulièrement tolérantes au froid.

2.2.3. Contraintes biologiques

Le riz pluvial, contrairement au riz irrigué que l'eau contribue à protéger, est très sensible aux ravageurs tels que les vers blancs (Randriamanantsoa *et al.*, 2012) ou les rongeurs.

Par ailleurs, la pluie continue et les terrains en pente constituent un écosystème qui favorise la croissance et la multiplication rapide des adventices, souvent difficiles à maîtrisées manuellement, et aux plantes parasites telles que le striga (Husson *et al.*, 2008), qui constituent une contrainte sérieuse pour le riz en cela qu'elles le concurrencent pour l'accès aux éléments nutritifs, à l'eau et à la lumière. Une lutte constante contre ces plantes est donc nécessaire, incluant un important travail de désherbage et de sarclage, voire l'utilisation d'herbicides.

Les premières phases du programme de sélection de riz pluvial d'altitude ont été réalisées dans un contexte indemne de pyriculariose adaptée au riz pluvial. Les premières variétés qui ont été diffusées se sont avérées sensibles et ont été rapidement attaquées par la maladie. Des travaux récents ont montré que la culture mixte de deux cultivars, l'un sensible et l'autre résistant, pouvait contribuer à faire baisser cette sensibilité (Raboin *et al.*, 2012).

3. La pyriculariose

Considérée comme la principale maladie du riz parce qu'elle est mondialement répandue, la pyriculariose peut provoquer des dégâts allant jusqu'à la perte totale de la récolte dans les conditions les plus favorables au développement du pathogène (Ou, 1985 ; Pande, 1997). L'une de ses caractéristiques est sa propension à toucher différents organes du riz : feuilles, ligules, cous, panicules, racines ou encore tissus conducteurs, selon le stade de développement de la plante (Ribot *et al.*, 2008). L'agent responsable de cette maladie est le champignon ascomycète *Magnaporthe oryzae*.

3.1. Cycle infectieux de *Magnaporthe oryzae*

Magnaporthe oryzae (également appelé *Magnaporthe grisea* ou encore *Pyricularia oryzae* pour sa forme asexuée) est un champignon filamenteux ascomycète hétérothallique (dont les principales caractéristiques sont une phase trophique avec paroi, l'absence de phase mobile, des hyphes cloisonnés et une paroi chitineuse) et haploïde de la famille des *Magnaporthaceae*. Son cycle infectieux (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) dure de 7 à 10 jours, ce qui coïncide à peu près avec la durée d'apparition des feuilles de riz.

Contamination primaire

La contamination primaire est caractérisée par l'arrivée du champignon sur une parcelle non contaminée jusqu'alors. C'est l'étape la plus difficile à maîtriser, car elle dépend souvent d'une contamination extérieure : des conidies (spores asexuées) provenant d'autres parcelles déjà infectées ou de résidus des cultures précédentes, sont transportées par le vent ou par splashing jusqu'à la plante hôte (Baastians, 1993). Leur fixation (1), permise par la présence d'un mucilage permettant d'adhérer à la surface cireuse de la feuille de manière non spécifique et irréversible, constitue la première étape du cycle infectieux.

Cycle infectieux (sources : Hashioka, 1965 ; Howard et Valent, 1996 ; Talbot, 2003 ; Lee *et al.*, 2006 ; Ebbola, 2007 ; Ribot *et al.*, 2008).

Lorsque les conditions de température et d'humidité sont optimales ($HR \geq 90\%$, $18^\circ\text{C} \leq T^\circ\text{C} \leq 20^\circ\text{C}$), la germination (2) se produit : la conidie produit un tube germinatif qui s'allonge jusqu'à former une nouvelle cellule, l'appressorium (3), qui forme à son tour un tube capable de percer la cuticule et la paroi de la cellule hôte épidermique (4).

Lors de l'incubation, le tube germinatif bourgeonne, aboutissant à la création d'un réseau d'hyphes (5). Ces hyphes vont se nourrir des éléments nutritifs présents dans la cellule et affecter la photosynthèse, avant d'infecter les cellules voisines en passant par les plasmodesmes. La croissance des hyphes est corrélée positivement à l'intensité lumineuse.

La sporulation (6) se fait de nuit par la formation d'hyphes aériens qui constituent le mycélium principalement localisé au centre de la lésion. Ces hyphes sont porteurs des conidiophores, auxquels sont fixées 3 à 5 conidies. Celles-ci ne peuvent se détacher que si l'hygrométrie est suffisamment importante (au moins 89%). Dans le cas contraire, les lésions ne font qu'augmenter en surface, sans qu'il y ait sporulation. L'étendue de la dispersion dépendra de la vitesse et de la direction du vent.

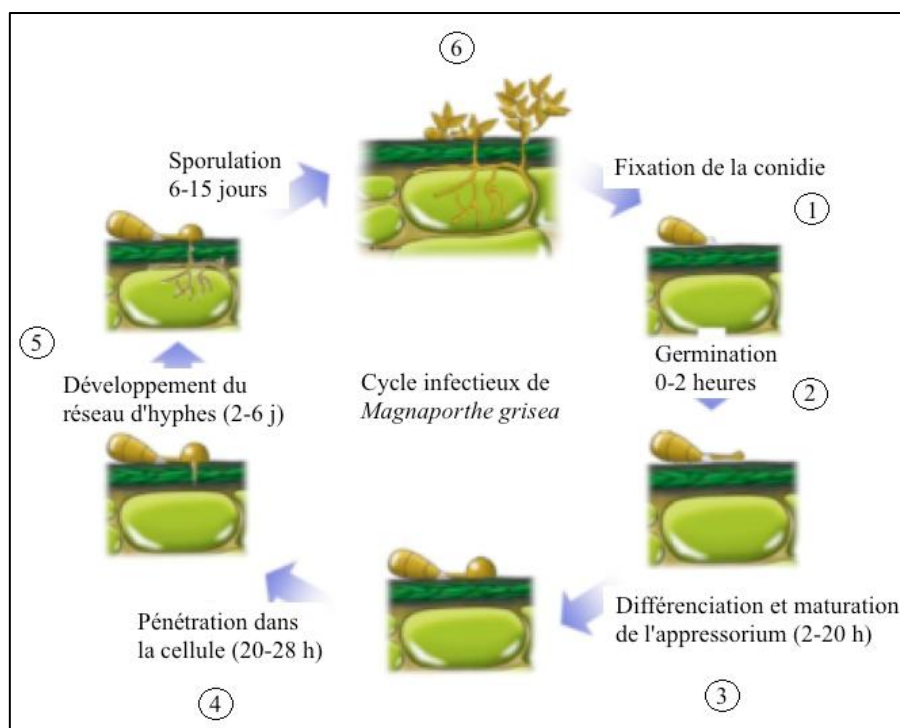


Figure II-2. Cycle infectieux de *Magnaporthe oryzae*. - Source : Ribot et al., 2008.

3.2. Symptômes de la maladie

La pyriculariose foliaire

Les premiers symptômes visibles à l'œil nu apparaissent 4 à 5 jours après le dépôt des spores sur la feuille. On observe alors de petites taches brunes, qui évoluent ensuite pour former des lésions de forme elliptique plus ou moins effilée, orientées dans le sens de la longueur de la feuille. Le centre des lésions est généralement gris ou blanchâtre et le pourtour brun ou brun-rouge (Figure II-3a). Dans les cas graves, les lésions s'élargissent jusqu'à provoquer le dessèchement des feuilles infectées. La pyriculariose foliaire provoque entre autres une diminution de la surface photosynthétique, qui a d'autant plus d'impact que les lésions sont localisées sur les feuilles hautes. Cela a pour conséquence de perturber le développement général de la plante, ainsi que certaines étapes de l'élaboration du rendement, puisque les attaques ont lieu au moment de l'initiation paniculaire et de la détermination du nombre de grains par panicule, très tôt après le tallage (Bastiaans, 1993). Il a été également montré que la pyriculariose foliaire constituait un foyer d'infection pour la pyriculariose paniculaire (Kato, 1974).

La pyriculariose paniculaire

La pyriculariose paniculaire intervient dès la floraison. Les lésions peuvent se développer au niveau des rachis de l'inflorescence, à la base de la feuille paniculaire (on parle alors de pyriculariose du cou) ou au niveau des nœuds inférieurs de la tige paniculaire (pyriculariose nodale). Ce stade de la maladie entrave le remplissage des grains, les flux de sève étant interrompus par la nécrose des tissus conducteurs.

- Si la contamination se produit juste après la floraison, le grain ne se remplit pas du tout : la panicule se dessèche et reste érigée (*maty fotsy* en malgache, la « mort

blanche »). Le pourcentage de grains pleins est alors affecté (Figure II-4).

- En cas de contamination plus tardive, après le début du remplissage, les grains seront mal remplis : la panicule peut même s'affaisser du fait de la nécrose des tissus du cou, et l'épillet se courber et tomber (Figure II-3b). Le poids des grains pleins est alors modifié (Figure II-4).



Figure II-3. Symptômes de pyriculariose foliaire (a) et paniculaire (b).

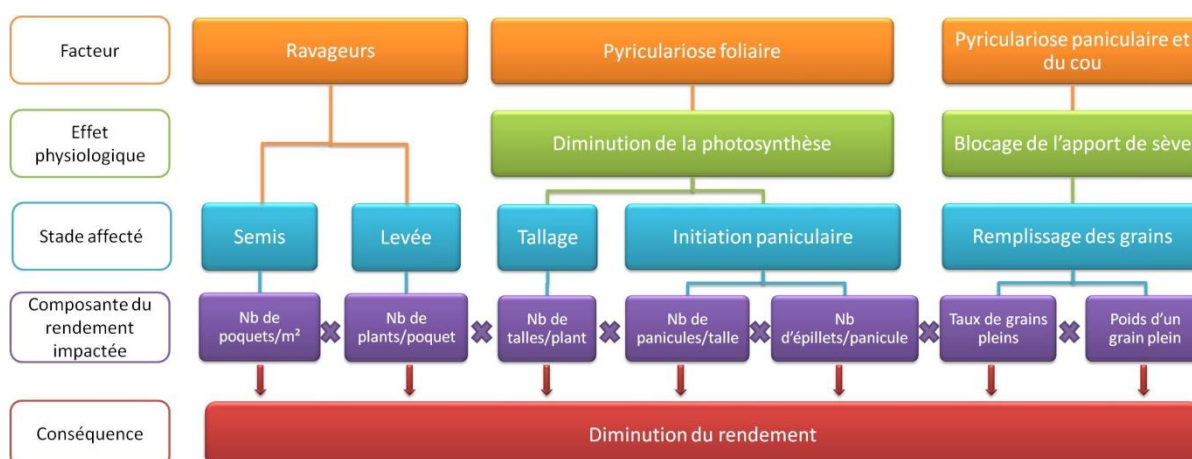


Figure II-4. Etapes de l'élaboration du rendement et interaction avec les différentes formes de la pyriculariose.

3.3. Moyens de lutte

L'utilisation de variétés résistantes à la maladie est la principale méthode permettant de lutter contre la pyriculariose. Cependant, cette démarche est difficile en particulier dans des contextes où d'autres contraintes existent déjà (riz pluvial d'altitude tolérant au froid). En outre, le champignon responsable de la maladie, *Magnaporthe oryzae*, parvient fréquemment à contourner les résistances de la plante (Seebold *et al.*, 2000).

Lors de l'intensification des cultures, le recours à des fongicides est souvent inévitable pour prévenir ou enrayer les épidémies. Diverses molécules agissent sur le métabolisme de *M. oryzae*, comme le probenazole, l'edifenphos ou l'iprobénfos qui modifient la germination des conidies et la croissance mycélienne, ou encore le pyrazophos qui empêche la croissance

mycélienne et la sporulation (Serghat *et al.*, 2003 ; Kim *et al.*, 2004 ; Sekizawa *et al.*, 1981). D'autres, comme le tricyclazole, n'agissent pas directement sur le champignon mais sur la relation hôte-pathogène (Froyd *et al.*, 1976). Cependant, les fongicides présentent des inconvénients non négligeables : ils sont polluants, potentiellement nocifs pour la santé et particulièrement coûteux pour les agriculteurs (Seebold *et al.*, 2000 et 2004). En outre, ces produits ne s'avèrent pas toujours efficaces, puisque le champignon pathogène peut développer des résistances à l'un ou l'autre des fongicides, voire plusieurs en même temps (Kim *et al.*, 2008). Cette solution n'est financièrement pas envisageable pour les agriculteurs malgaches.

La recherche agronomique se tourne vers d'autres solutions, plus durables pour l'environnement et économiquement abordables pour accompagner l'intensification agricole. Ces méthodes de lutte intégrée sont basées sur la compréhension de la physiologie de la plante et du pathogène, et leur interaction avec l'environnement. L'équilibre nutritionnel de la plante, par exemple, aura un impact sur l'activation de ses mécanismes de défense naturels, et donc sur sa sensibilité aux maladies. D'autre part, certains facteurs microclimatiques liés à la structure du couvert végétal sont favorables au développement et à l'expansion du champignon. Or, le système de culture influence justement les paramètres physiques (Balbino *et al.*, 2002) et chimiques (Rabeharisoa *et al.*, 2005) du milieu ainsi que la physiologie de la culture (Rakotoarisoa, 2006). Le choix d'un système de culture approprié permettra de modifier ces facteurs, et ainsi de lutter contre la pyriculariose.

4. Interaction entre système de culture et pyriculariose

4.1. Pyriculariose et azote

Bien que la situation économique à Madagascar ne permette pas aux agriculteurs locaux d'utiliser beaucoup de fertilisants chimiques au champ, l'apport d'azote sous forme minérale ou sous forme de fumier est parfois pratiqué en riziculture pluviale pour obtenir un rendement raisonnablement élevé (Rakotoarisoa *et al.*, 2010). Cependant, l'azote est également un facteur aggravant de la pyriculariose (Long *et al.*, 2000). Si l'impact de la fertilisation minérale sur l'intensité de la pyriculariose est référencé depuis de nombreuses années (Ou, 1985), les mécanismes en jeu restent cependant peu étudiés au champ. Il a été observé que l'apport d'azote minéral en une seule fois en début de cycle entraînait des attaques de pyriculariose foliaire plus sévères que dans le cas d'un apport fractionné et réparti dans le temps (Kürschner *et al.*, 1992, Long *et al.*, 2000). Ces observations suggèrent une interaction entre la dynamique de l'azote dans la plante et l'expression de la résistance à la maladie, qui pourrait également être due à l'équilibre nutritionnel de la plante.

En outre, la forme sous laquelle l'azote est absorbé par la plante semble également avoir une influence sur la sévérité de la maladie. Lorsque l'azote est disponible sous sa forme nitrique (NO_3^-), le riz est significativement plus attaqué que lorsqu'il est disponible sous la forme ammoniacale (NH_4^+). Cela peut être l'une des raisons pour lesquelles le riz pluvial (cultivé en milieu aérobie et absorbant du NO_3^-) est plus fortement attaqué par la pyriculariose que le riz inondé (Osuna-Canizalez *et al.*, 1991).

4.2. Pyriculariose et équilibre minéral

Rappelons également que l'azote peut interagir avec les autres minéraux absorbés par la plante. Pour cette raison, l'équilibre minéral est primordial. Différentes études ont par ailleurs montré l'utilité d'apports de certains minéraux dans la lutte contre la pyriculariose du riz. Sur des variétés partiellement résistantes à la pyriculariose, l'application de silice (SiO_2) réduit la sévérité de la maladie jusqu'à un niveau observé sur des variétés totalement résistantes (Seebold *et al.*, 2000). Il a également été montré que le nombre de lésions de pyriculariose sur les feuilles de riz diminuait linéairement avec l'augmentation de la teneur en silice des feuilles (Volk *et al.*, 1958 cité dans Datnoff *et al.*, 2007). Une première explication à cela serait le rôle de barrière physique joué par la silice : une couche de silice présente sur la cuticule des feuilles, renforce la feuille et empêche la pénétration du champignon. Toutefois, il semblerait que le rôle de la silice dans la résistance du riz à la pyriculariose soit plus complexe : la formation de complexes entre cet élément et les composants de la paroi cellulaire pourrait également empêcher sa dégradation par les enzymes du pathogène et donc augmenter sa résistance. La silice serait également à l'origine de sécrétions importantes de métabolites secondaires intervenant dans les réactions de défense de la plante (Maekawa *et al.*, 2002, cité dans Datnoff *et al.*, 2007).

4.3. Pyriculariose et agriculture de conservation (FAO, 2010)

Les SCV (Semis direct sous Couvert Végétal) ont été diffusés à Madagascar pour leur capacité à limiter l'érosion et à améliorer la fertilité du sol. Ces systèmes sont caractérisés par l'arrêt du labour, par la couverture permanente du sol avec les résidus des précédents culturaux ou avec des cultures et par la diversification des espèces cultivées, en association et/ou dans la rotation. Le mulch permet une réduction de l'évapotranspiration et du ruissellement et une augmentation de l'infiltration et du stockage de l'eau qui permettent de diminuer les stress hydriques. D'autre part, la fertilité du sol est améliorée grâce au ralentissement de la dégradation de la matière organique, ce qui permet de tamponner le pH, d'augmenter la quantité de minéraux disponibles pour la plante et d'entretenir l'activité biologique du sol, également favorisée par l'absence de labour (Séguy *et al.*, 2009). Les résidus de culture présents sur le sol en SCV auraient par ailleurs l'avantage de constituer une réserve constante d'azote, garantissant un apport régulier de matière organique et limitant les pics d'absorption d'azote qui risqueraient d'entraîner un déséquilibre métabolique ayant éventuellement un impact sur les mécanismes de défense à la pyriculariose (Scopel *et al.*, 2013). Ces systèmes SCV sont fondés sur les principes de l'agriculture de conservation : limitation du travail du sol, utilisation de rotations de cultures et de successions avec des légumineuses ou des plantes de service qui permettent d'améliorer la texture et la fertilité du sol et couverture permanente du sol par un mulch (FAO, 2010)

Au cours d'essais sur la riziculture pluviale en agriculture de conservation, il a été observé que la sévérité de la pyriculariose était moins forte sur les parcelles conduites en SCV que sur celles conduites en labour particulièrement en cas de fertilisation minérale (Sester *et al.*, 2008, 2013). Plusieurs hypothèses non-exclusives ont été avancées pour expliquer cela, qui ont en partie conduit aux hypothèses de travail du projet GARP.

5. Hypothèses de travail et problématique

La différence de niveau de maladie constatée entre les systèmes labour et SCV pourrait s'expliquer par :

- Une **différence de régularité dans la distribution d'azote** au cours du cycle : en SCV, l'azote serait disponible de manière régulière pour la plante, grâce aux processus constants d'immobilisation et de minéralisation de l'azote apporté par les résidus de récolte. En système labouré, les apports ponctuels d'azote engendreraient des pics d'absorption d'azote particulièrement favorables au développement de *M.oryzae*. En outre, ce déséquilibre nutritionnel empêcherait l'expression de la résistance par la plante.
- Une **différence d'équilibre minéral** dans la plante : l'ensemble des caractéristiques inhérentes au système SCV favoriserait l'équilibre minéral de la plante par rapport au labour.

Ces deux premières hypothèses sont à la base du projet GARP. Néanmoins, lors des premières campagnes, elles n'ont pas permis d'expliquer statistiquement toutes les différences épidémiologiques. Des hypothèses de travail supplémentaires basées sur les observations faites au champ ont donc été ajoutées. Ainsi, de nouveaux facteurs pourraient intervenir, tels que :

- Une **différence de développement végétatif** de la plante :
 - Le retard de croissance plus ou moins important pris par le riz cultivé en SCV diminuerait la sévérité de la maladie en permettant un décalage du cycle de la plante par rapport aux pics de pression de maladie.
 - La moindre croissance du riz cultivé en SCV entraînerait également une diminution de la densité de couvert, ayant pour conséquence une propagation limitée du pathogène.
- Une **différence de conditions microclimatiques** à l'échelle de la parcelle : la présence d'une couverture végétale composée des résidus de culture (mulch) en SCV permet de réduire l'évapotranspiration par rapport à un système labouré. Cela aurait pour conséquence de limiter le stress hydrique, problème récurrent en riziculture pluviale, et donc de permettre à la plante de mieux se défendre contre le pathogène.

Comment ces différentes hypothèses sont-elles liées entre elles ? Quels facteurs influencent-ils le plus le système plante-champignon ? Quels sont les leviers les plus importants dans la lutte contre la pyriculariose ? Afin de répondre à ces questions, nous avons procédé à une analyse des résultats portant sur les essais de quatre campagnes successives menées dans le cadre du projet GARP.

III. MATERIELS ET METHODES

1. Zone d'étude

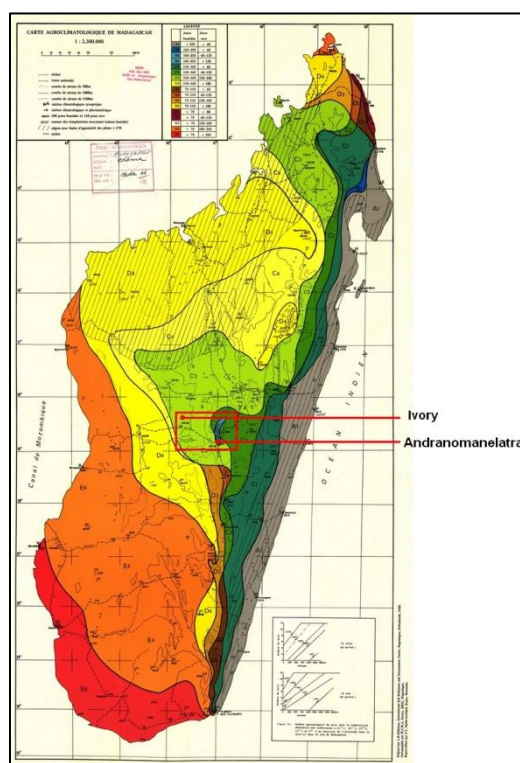
1.1. Relief et localisation

La zone d'étude se situe sur les Hautes Terres centrales de Madagascar, dans la région du Vakinankaratra dont la superficie (17496 km²) représente 27% de celle de la province d'Antananarivo. Les parcelles expérimentales du projet GARP sont localisées sur deux sites contrastés :

- le premier se situe à 1645 m d'altitude, sur la commune d'Andranomanelatra, à 17 kilomètres au nord d'Antsirabe
- le second se situe à plus faible altitude (914 m), à Ivory, à 90 kilomètres à l'ouest d'Antsirabe dans la région du Moyen Ouest.

1.2. Météorologie

Le climat de la région d'étude est de type tropical d'altitude, caractérisé par une saison chaude et pluvieuse d'octobre à avril correspondant à la période de culture du riz pluvial, et une saison fraîche et sèche de mai à septembre (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et REF). Durant la campagne 2012-2013, des vents violents ont provoqué des dégâts sur les parcelles d'Ivory.



Site	Altitude	Précipitations (mm)	Températures moyennes	Sols
Andranomanelatra	haute (1645 m)	500-700	13-20°C	Ferralitiques sur alluvions volcano-lacustres
Ivory	moyenne (914 m)	>1400	20-25°C	Ferralitiques sur colluvions

Tableau III-1. Résumé des conditions pédo-climatiques des sites d'étude.

Figure III-1. Carte agroclimatique de Madagascar (Source : Eusoils) et localisation des deux sites d'étude.

2. Dispositifs expérimentaux

Sur les deux sites, le dispositif expérimental est un dispositif factoriel en blocs.

2.1. Organisation des essais

Chaque site est subdivisé en deux ensembles parcelaires cultivés selon une succession culturale biennale faisant alterner une association de maïs et de soja (avec de la crotalaire ou du cajanus en dérobée) de la saison n avec le riz pluvial de la saison $n+1$. Deux parcelles sont mises en place pour chaque site, l'une avec la culture en rotation, l'autre avec le riz. Chacune est constituée de quatre répétitions (blocs A, B, C et D) de 18 parcelles élémentaires de 42 m² (6 x 7 m) chacune. Les traitements appliqués à ces parcelles sont des combinaisons randomisées des trois facteurs étudiés :

- le type de **système de culture** : semis direct sans travail du sol (SCV) sur couverture morte de résidus correspondant au système agroécologique diffusé dans la région, ou labour (LAB) manuel à l'angady avec exportation des résidus, correspondant davantage à la pratique paysanne locale (Tableau III-3).
- la **fertilisation azotée** : une fumure de base est apportée sur toutes les parcelles, afin d'apporter les éléments minéraux nécessaires pour éviter toute carence en P, K ou en microéléments ainsi qu'une dose standard de fumier (5t/ha). C'est la quantité d'azote minéral qui varie entre les traitements : F1 = sans azote minéral, F2 = avec une fertilisation proche des recommandations agronomiques du Fofifa. Ces deux fertilisations sont fixées au cours du projet. La troisième, Fv est une fertilisation variable en fonction des besoins ou questions de recherche. En 2012-2013, Fv correspondait à la même quantité d'azote minéral que F2 mais avec des apports répartis différemment (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).
- la **variété** : trois variétés de riz sont semées dans chacun des sites : une variété sensible (v1), une tolérante à la pyriculariose (v3) et une intermédiaire (v2). La variété tolérante est utilisée comme témoin et permet d'évaluer l'impact du système de culture en l'absence de pression de maladie. Les variétés de riz semées ont été choisies pour leur adaptation aux conditions climatiques du site où elles sont utilisées. Leurs cycles de développement sont assez proches sur chaque site (Tableau III-3).

Dans la suite de ce rapport, on appellera « mode de culture » chaque combinaison système de culture*fertilisation*variété.

			2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013
Andranomanelatra	A1-A72	F1	sans azote	Rotation	sans azote	Rotation
		F2	30N + 23N + 23N		30N + 23N + 23N	
		Fv	30N + 23N		60N + 46N + 46N	
	A73-A144	F1	Rotation	Rotation	Rotation	
		F2				
		Fv				
Ivory	I1-I72	F1	sans azote	Rotation	sans azote	Rotation
		F2	20N + 60N + 40N		30N + 15N + 15N	
		Fv	20N + 40N		60N + 30N + 30N	
	I73-I144	F1	sans azote	sans azote		
		F2	Rotation	Rotation	30N + 15N + 15N	
		Fv	Rotation	Rotation	30N + 30N	
Bilan			f1<fv<f2	f1<f2<fv	f1<f2<fv	f1<(f2 = fv)

Tableau III-2. Récapitulatif des apports d'azote. Les premières doses d'azote sont apportées au semis, les secondes à 30 JAS et les dernières à 60 JAS.

			2008-2009		2009-2010		2010-2011		2011-2012		2012-2013			
			Labour	SCV	Labour	SCV	Labour	SCV	Labour	SCV	Labour	SCV		
Andranomanelatra	A1-A72	v1	soja + avoine en dérobée sur résidus de riz/maïs	FOFIFA 154	sur résidus de soja et avoine	maïs + soja	maïs + soja + vesce velue et avoine en dérobée sur résidus de riz	FOFIFA 154	sur résidus de maïs + soja + vesce velue + éléusine	maïs + soja	maïs + soja + crotalaire en dérobée sur résidus de riz			
		v2		FOFIFA 161				FOFIFA 161						
		v3		FOFIFA 172				FOFIFA 172						
	A73-A144	v1		légumineuse (haricot ou soja) sur couverture vive de <i>C. dactylon</i>		maïs + soja + radis fourrager et avoine en dérobée			maïs + soja	maïs + soja + vesce en dérobée sur résidus de riz				
		v2			maïs + soja									
		v3												
Ivory	I1-I72	v1	maïs/pois de terre/arachide	FOFIFA 154		maïs + soja	maïs + soja + éléusine et cajanus en dérobée sur résidus de riz	FOFIFA 154	sur résidus de maïs + soja + éléusine + cajanus	maïs + soja	maïs + soja + cajanus en dérobée sur résidus de riz			
		v2		B22				B22						
		v3		WAB 878				Nerica 4						
	I73-I144	v1			soja				maïs + soja	maïs + soja + cajanus en dérobée sur résidus de riz				
		v2												
		v3												

Tableau III-3. Historique de culture des différentes parcelles.

Ce dispositif permet d'obtenir une gamme de conditions de culture allant d'un système « intensif » caractérisé par un labour accompagné d'une fertilisation minérale importante, à un système « agro-écologique » cultivé en SCV et sans fertilisation minérale.

2.2. Historique des itinéraires culturaux

Les essais GARP ont été mis en place sur chaque site il y a quatre ans, lors de la campagne 2009-2010, et ont été suivis chaque année depuis. Néanmoins, des problèmes d'attaques de vers blancs ainsi que la présence importante d'adventices durant les campagnes 2010-2011 et 2012-2013 ont rendu les parcelles d'Andranomanelatra inexploitable, c'est pourquoi seul le dispositif d'Ivory a été suivi pour ces années-là

Site d'Andranomanelatra

A Andranomanelatra, afin de disposer de traitements différenciés dès la première année, le dispositif a été installé sur des terrains déjà cultivés en SCV depuis une dizaine d'années. Ce sont les parcelles de la station de l'ONG Tafa (ONG appuyant la formation, la conception et la diffusion de SCV) qui ont été choisies.

L'installation du dispositif en 2009-2010 sur le site d'Andranomanelatra a donc consisté :

- à labourer (manuellement, à l'*angady*) les parcelles à conduire en labour, tout en continuant à cultiver en SCV les parcelles devant rester en SCV
- à installer des plantes de couverture en SCV compatibles avec la rotation choisie, à savoir vesce et avoine.

Site d'Ivory

A Ivory, le dispositif a été installé sur des parcelles en friche qui ont été totalement labourées la première année afin d'homogénéiser le dispositif. Ainsi, seul le système labour a pu être étudié la première année.

Pour les deux sites, les semences sont traitées avec un composé d'imidachlopride et de thirame (Gaucho, 2,5g/kg de semences), et un traitement préventif contre les vers blancs sur les parcelles devant être semées en riz est fait environ un mois avant le semis. Le semis se déroule généralement en 4 jours (un bloc par jour), début novembre. Des désherbages manuels réguliers sont réalisés, en particulier en décembre et en janvier.

3. Collecte des données

3.1. Suivis épidémiologiques

Afin de mieux comprendre l'évolution de la maladie au cours du cycle et de repérer ses interactions avec les interventions culturales, des notations de sévérité de la pyriculariose ont été réalisées au champ, à différents stades de développement de la plante : deux à trois notes de pyriculariose foliaire et paniculaire réparties sur deux ou trois semaines à partir de l'apparition des premiers symptômes de la maladie. Sur chaque parcelle expérimentale, 10 poquets sont notés, répartis autant que possible le long de la diagonale de la parcelle dont le sens change d'une semaine sur l'autre. Les notations sont réalisées en termes de pourcentages, selon l'échelle de notation présentée par la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. La méthode a été constante au cours des quatre années de projet.

Les notations se font par groupes de deux ou trois personnes :

- Une première personne est chargée de compter le nombre de talles (ou de panicules) malades ainsi que le nombre total de talles (panicules) du poquet : cela permet d'estimer l'incidence de la maladie.
- Une deuxième personne est responsable de la notation à proprement parler, qui permettra d'évaluer la sévérité.
 - Jusqu'à la floraison, les suivis portent sur les symptômes foliaires : on évalue le pourcentage de surface atteinte par la pyriculariose sur trois à quatre feuilles de trois talles malades pris au hasard dans un poquet, en partant de la feuille ligulée la plus jeune. Au fur et à mesure du cycle cultural, les feuilles du bas, souvent nécrosées, ne sont plus prises en compte dans les notations (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).
 - A partir de la floraison, les suivis concernent les symptômes paniculaires : le pourcentage de grains touchés par la maladie est estimé sur 5 panicules malades prises au hasard parmi les panicules malades du poquet.
- Enfin, un notateur est éventuellement présent pour noter les données annoncées, qui seront plus tard entrées dans la base de données.

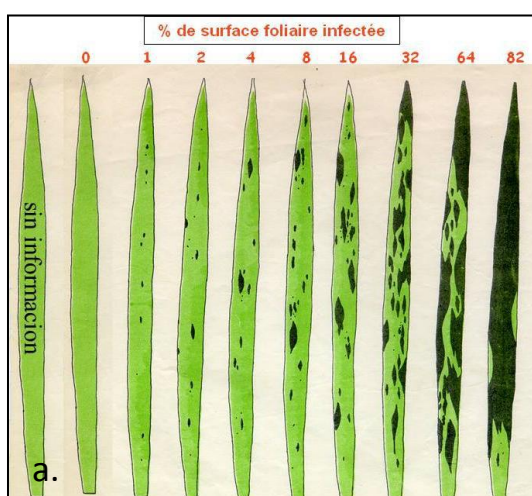


Figure III-2. a. Echelle de sévérité en pourcentages de la pyriculariose foliaire - *Source : Vales, 1996, d'après Notteghem, 1977.* b. Notation de pyriculariose foliaire à Ivory.

3.2. Suivi de la croissance des plantes

SunScan et LAI (Leaf Area Index)

Des mesures au SunScan ont été réalisées afin d'évaluer la surface foliaire (LAI) à l'échelle d'une parcelle, à partir de la campagne 2011-2012. Le SunScan est un appareil qui mesure le rayonnement intercepté par le couvert et donne une estimation du LAI. Pour chaque parcelle, une mesure moyenne est obtenue à partir de 6 mesures effectuées sous différents angles dans le couvert avec le SunScan, toujours réalisées sur la même placette par parcelle.

Prélèvements de biomasse

Des prélèvements de biomasse ont été réalisés à différents stades clé du développement (2 à 4 stades selon les années) : début tallage, mi-tallage, début montaison, épisaison (Tableau III-4). Lors de chaque prélèvement, six poquets sont prélevés. Le nombre de plants et de talles est compté pour chacun des poquets, qui sont ensuite mis à sécher à l'étuve puis pesés afin de déterminer la biomasse aérienne des poquets prélevés pour chacune des parcelles.

3.3. Suivi du statut azoté des plantes

Le statut azoté des variétés a été mesuré à plusieurs reprises durant les différentes campagnes. Selon l'année, deux appareils différents ont pu être utilisés pour effectuer ce suivi : le SPAD (Soil-Plant Analysis Development) et le Dualex. Ces deux appareils permettent d'estimer la teneur en azote de la plante via la mesure de la teneur en chlorophylle des feuilles, et ce de manière non destructive. Les mesures sont effectuées sur la dernière feuille ligulée (c'est à dire la dernière feuille entièrement développée) de 20 talles appartenant à 20 poquets différents.

3.4. Dosage chimique

Des feuilles paniculaires ont été analysées au laboratoire afin de réaliser un diagnostic des différents minéraux. La teneur en azote total et minéral sous forme ammonium ou nitrate dans les plantes a également été mesurée.

3.5. Rendement

Le rendement final en grain de chaque parcelle, ainsi que le détail de ses composantes pour 9 poquets, ont été mesurés.

Rendement final

La récolte se déroule au cours du mois d'avril. Au centre de chaque parcelle, neuf poquets sont prélevés : ils serviront à mesurer le détail des composantes du rendement. Cinq lignes de bordures sont laissées intactes, la récolte se fait donc sur une surface de 16,8m² (14 lignes de 20 poquets). Dans ce carré, on commence par compter le nombre de poquets présents et absents, puis les plants sont coupés à la base, avant d'être battus. Grains et pailles sont ainsi séparés et pesés. Un échantillon de grains et un échantillon de paille sont également prélevés et pesés (poids frais et poids sec après séchage à l'étuve). Le reste des pailles et remis sur la parcelle.

Composantes du rendement

Le rendement du riz s'élabore en plusieurs phases que l'on peut décomposer selon l'équation suivante :

$$\text{Rendement} = (\text{nbre de plants}/\text{m}^2) \times (\text{nbre de panicules}/\text{plant}) \times (\text{nbre d'épillets}/\text{panicule}) \times (\% \text{ de grains pleins}) \times (\text{poids moyen d'un grain plein})$$

Équation III-1. Décomposition du rendement en ses différentes composantes.

Chacune de ces composantes étant déterminée à une période bien définie du cycle, elle constitue un témoin des conditions et facteurs de croissance durant cette période, qu'il est intéressant de comprendre (Moreau, 1987) (Figure II-4. Etapes de l'élaboration du rendement et interaction avec les différentes formes de la pyriculariose.). Afin d'estimer ces composantes, les nombres de plants, de tiges et de panicules sont comptés sur les neuf poquets prélevés au moment de la récolte. Les panicules sont ensuite égrenées, et les grains vides séparés des grains pleins. Après séchage à l'étuve et pesée, deux sous-échantillons de 200 grains pleins et 200 grains vides sont isolés et pesés, afin d'obtenir le poids d'un grain et de calculer le taux de stérilité.

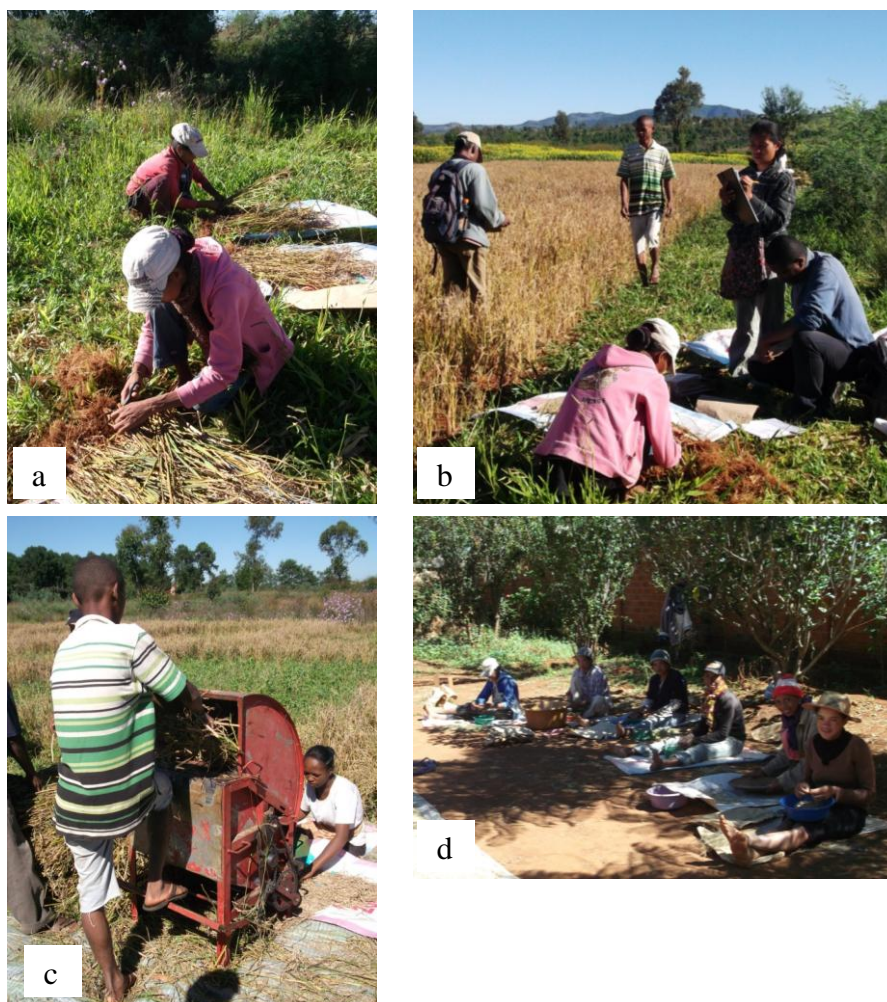


Figure III-3. a) et b) Les tiges des neuf poquets sont comptées et rangées dans des sacs pour égrenage. c) Le reste de la parcelle est récolté à l'aide d'une batteuse. d) Les grains des neuf poquets prélevés sont vannés afin de séparer les grains vides des grains pleins.

Selon les conditions climatiques, l'état des parcelles et les contraintes matérielles, tous les types de données cités précédemment n'ont pu être relevés de la même façon tous les ans. Le Tableau III-4 résume les données dont on dispose pour l'analyse.

		2009-2010		2010-2011		2011-2012				2012-2013		
Andrano	A1-A72	Pyri foliaire	2 notations v1 et v2		ROTATION	1 notation v1 et v2				ROTATION		
		Pyri paniculaire	1 notation v1 et v2			2 notations v1 et v2						
		Diagnostic foliaire	v1, v2 et v3			v1, v2 et v3						
		Prélèvements	privé 1 : 79 JAS	privé 2 : 111 JAS		privé 1 : 29/30 JAS	privé 2 : 70/71 JAS	privé 3 : 84/85 JAS	privé 4 : 97/100/104 JAS			
			début montaison	feuille paniculaire		début tallage	mi-tallage	début montaison	feuille paniculaire			
	Sunscan	Non		Non								
	SPAD	Non		Non								
	Dualex	Non		Non								
	Biomasse + N	Plantes v1, v2 et v3		v1, v2 et v3		Biomasse v1 et v2		v1 et v2		Non		
	Récolte	Feuilles v1, v2 et v3		Non		v1 et v2		v1, v2 et v3		Non		
A73-A144	Pyri foliaire	ROTATION		Vers blancs / adventices		ROTATION				Vers blancs / adventices		
	Pyri paniculaire	ROTATION		Vers blancs / adventices		ROTATION				Vers blancs / adventices		
	Diagnostic foliaire	ROTATION		Vers blancs / adventices		ROTATION				Vers blancs / adventices		
	Prélèvements	ROTATION		Vers blancs / adventices		ROTATION				Vers blancs / adventices		
	Sunscan	Non		Vers blancs / adventices		Non				Vers blancs / adventices		
Ivory	I1-I72	Pyri foliaire	2 notations v1, v2 et v3 seulement labour		ROTATION	1 notation v1 et v2				ROTATION		
		Pyri paniculaire	2 notations v1, v2 et v3 seulement labour			2 notations v1 et v2						
		Diagnostic foliaire	v1, v2 et v3 seulement labour			v1, v2 et v3						
		Prélèvements	privé 1 : 50 JAS	privé 2 : 71 JAS		privé 1 : 20 JAS	privé 2 : 42/43 JAS	privé 3 : 55/56 JAS	privé 4 : 69/71 JAS			
			début montaison	feuille paniculaire		début tallage	mi-tallage	début montaison	feuille paniculaire			
	Sunscan	Non		Non								
	SPAD	Non		Non								
	Dualex	Non		Non								
	Biomasse + N	Plantes v1, v2 et v3 seulement labour		v1, v2 et v3		Biomasse v1 et v2		Biomasse v1 et v2		Non		
	Récolte	Feuilles v1, v2 et v3 seulement labour		Non		v1 et v2		v1, v2 et v3		Non		
I73-I144	Pyri foliaire	ROTATION		3 notations sauf v3 bloc D		ROTATION				2 notations v1 et v2		
	Pyri paniculaire	ROTATION		1 notation v1 et v2		ROTATION				1 notation v1, v2 et v3		
	Diagnostic foliaire	ROTATION		v2 et v3		ROTATION				v1 et v2		
	Prélèvements	ROTATION		privé 1 : 54/55 JAS	privé 2 : 70/73/77/83/87 JAS	ROTATION				privé 1 : 46 JAS	privé 2 : 55/56 JAS	privé 3 : 69/70/74 JAS
		ROTATION		mi-tallage	début épiaison	ROTATION				mi-tallage	début montaison	feuille paniculaire
Sunscan	Non		Non				Non				Non	
SPAD	Non		Non				Non				Non	
Dualex	Non		Non				Non				Non	
Biomasse + N	Plantes v2 et v3		v2 et v3		Non		Non		Biomasse v1 et v2		Non	
Récolte	Feuilles v2 et v3		Non		v1 et v2		Non		v1 et v2		Non	

Tableau III-4. Données collectées durant les quatre années de projet GARP.

4. Traitement des données et analyses statistiques

4.1. Base de données

Afin de centraliser et de structurer l'énorme jeu de données généré par le projet GARP, une base de données a été construite sous Microsoft Access, en partenariat avec le service d'informatique du Cirad Montpellier. Le but était également de développer un outil permettant de mettre en relation les différentes données et de produire des bilans comparatifs, ainsi que de faciliter les analyses statistiques.

Cette base de données a été conçue en 2011, dans le cadre du CDD d'un technicien en informatique. Néanmoins, à l'issue de cette période, la base de données n'était pas encore fonctionnelle : de nombreux blocages subsistaient, et les données stockées n'étaient pas homogènes, il était par conséquent impossible d'exploiter cet outil à sa juste valeur. Lors de mon stage, j'ai modifié la structure de la base afin de l'adapter au mieux aux besoins des analyses dans le cadre du projet. Certaines tables ont été supprimées, d'autres créées, d'autres enfin fusionnées afin d'optimiser le fonctionnement de la base. La clé de voûte de la structure de la base est la table "Parcelle", qui centralise toutes les informations élémentaires relatives à chacune des parcelles suivies tout au long du projet : nom de la parcelle (A1 à A144 ou I1 à I144), système de culture (Labour ou SCV), type de fertilisation (F1, F2 ou Fv), variété (v1, v2 ou v3), site (1 pour Andranomanelatra ou 2 pour Ivory), bloc (A,B,C ou D). Ces informations sont fixes pour chaque parcelle. Ainsi, par exemple, la parcelle A1 appartiendra toujours au bloc A, sera toujours cultivée en SCV, sera toujours fertilisée selon les modalités F1, et c'est la variété v3 qui y sera toujours cultivée. Cependant, comme on l'a vu précédemment, les variétés et les modalités de fertilisation varient selon les sites et les années. Il est donc nécessaire d'associer un identifiant unique par parcelle et par année : c'est la clé primaire "IDParc", qui permet de faire le lien avec toutes les autres tables de la base de données.

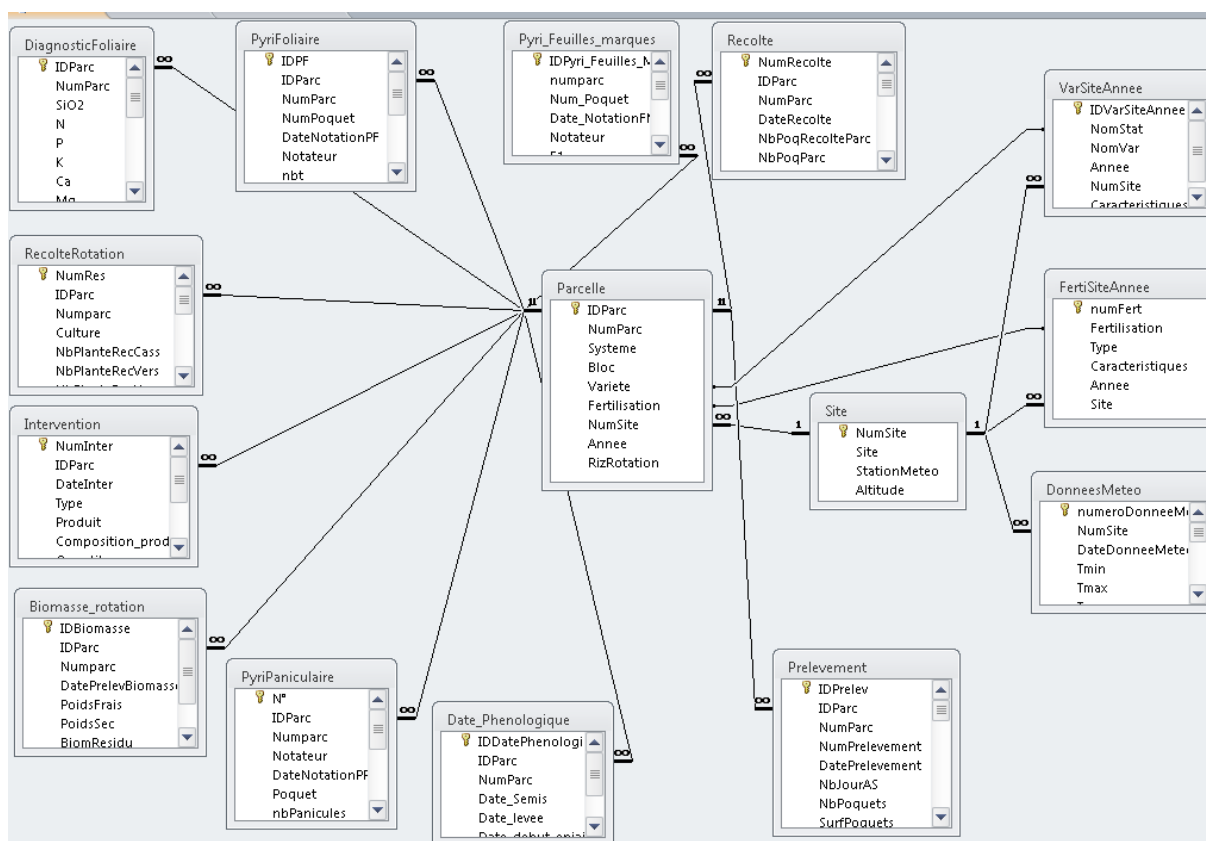


Figure III-4. Modèle conceptuel de la base de données.

Comme on le voit sur la Figure III-4, de très nombreuses tables sont reliées entre elles et à la table "Parcelle". Chacune d'entre elles contient un type d'informations spécifique : données épidémiologiques sur la pyriculariose foliaire ou paniculaire, données météorologiques, données phénologiques, données relatives à la récolte, etc. Une fois cette nouvelle structure validée, j'ai pu mettre à jour, corriger et compléter les informations contenues dans la base.

La dernière étape de la réhabilitation de la base de données GARP a été la finalisation d'un outil permettant l'exploitation des données. MS Access (ref) offre la possibilité de coder des modules en langage VBA (Visual Basic for Applications) que l'on peut intégrer dans une interface personnalisée.

L'outil créé pour GARP répond à trois principales fonctions :

- l'importation ou la saisie de nouvelles informations
- la consultation et la modification des données contenues dans la base
- la mise en relation des différents types de données, et leur exportation sous forme de document Excel.

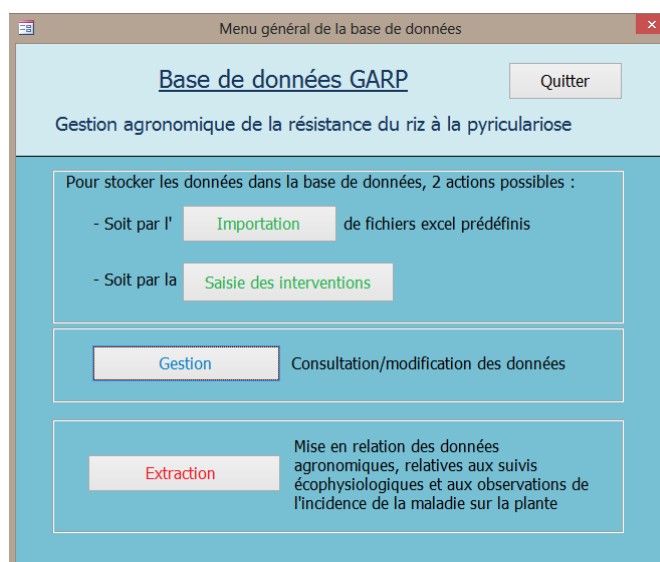


Figure III-5. Menu d'accueil de la base de données GARP.

L'enregistrement de nouvelles données se fait essentiellement par l'importation de fichiers Excel préalablement formatés. Seules les données concernant les interventions (étapes de l'itinéraire cultural) sont entrées à l'aide d'un formulaire, afin d'autoriser plus de souplesse et de liberté à la saisie.

La consultation permet à l'utilisateur d'une part de vérifier si toutes ses données ont été importées correctement, et d'autre part de visualiser toutes les autres données stockées dans la base, et de les exporter sous forme de fichier Excel s'il le souhaite. Il peut également modifier des données spécifiques au cas par cas.

Grâce au formulaire d'exportation (Figure III-6), les données des différentes tables peuvent être mises en relation et exportées dans des fichiers au format Excel. Un filtre multicritères (année, site, système, fertilisation...) permet de sélectionner les parcelles spécifiques que l'on souhaite étudier. Des calculs simples de moyennes et d'écart types sont aussi réalisés.

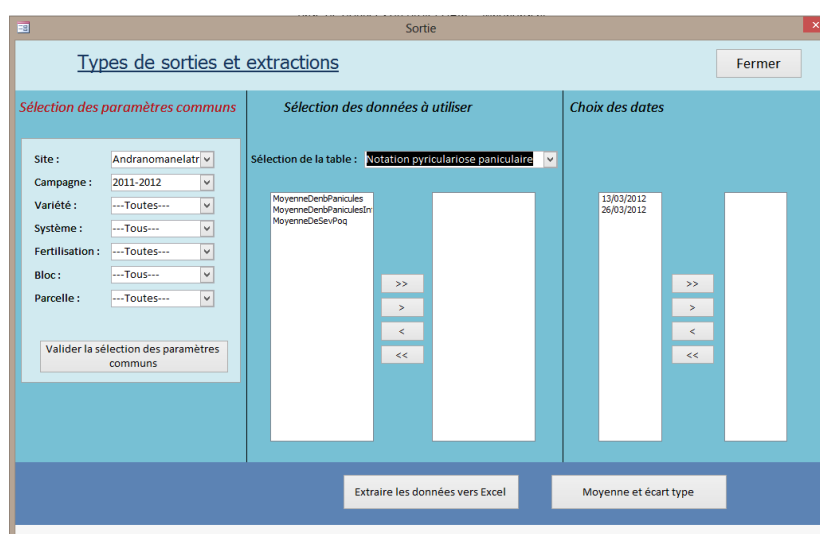


Figure III-6. Formulaire d'exportation des données.

4.2. Analyse descriptive des données

Afin de visualiser les résultats, des graphes ont été réalisés sous MS Excel à partir des données extraites de la base. Pour ne pas masquer les effets de certains paramètres propres à chaque site et chaque année, les analyses ont été réalisées séparément. Pour chaque traitement, les moyennes ont été faites sur les quatre répétitions, on ne tient donc pas compte de l'effet bloc. De plus, seules les variétés v1 et v2 ont été étudiées, la variété v3 étant résistante, elle n'est utilisée que pour vérifier l'effet du système en l'absence de maladie.

4.3. Analyse statistique des données

Corrélations

Des corrélations entre différentes variables ont pu être calculées grâce au logiciel R. Le package utilisé est « Hmisc », la fonction utilisée « rcorr » dont j'ai légèrement modifié le code. Les valeurs de p-value sont données au seuil de 5% : *** = $p < 10^{-3}$; ** = $p < 10^{-2}$; * = $p < 0,05$.

Modèle linéaire généralisé

Ces analyses ont été réalisées par Emilie Doge, dont le stage en statistiques (encadré par Eric Gozé) s'est déroulé sur le site de Montpellier parallèlement au mien (Doge, 2013).

Les données extraites de la base de données ont été traitées statistiquement avec le logiciel SAS. Une analyse de variance (ANOVA) multifactorielle classique n'étant pas appropriée à notre type de données, une procédure GLIMMIX a permis d'adapter le modèle en linéarisant la relation. Comme la variable à expliquer est une proportion (pourcentage de surface foliaire ou de grains attaqués), une transformation logistique a dû être appliquée au modèle : la combinaison linéaire des variables explicatives ne prédit donc pas directement la proportion p de surface foliaire ou de grains malades, mais son logit : $\ln\left(\frac{p}{1-p}\right)$. Cette transformation facilite l'interprétation des interactions à l'aide de graphiques.

Le modèle final (Équation III-2) permet de tester l'effet des 3 facteurs (système de culture, fertilisation azotée et variété), les interactions entre ces facteurs, ainsi qu'un effet bloc.

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right)_{ijkl} = \text{système}_i + \text{fertilisation}_j + \text{variété}_k + (\text{système} \times \text{fertilisation})_{ij} \\ + (\text{système} \times \text{variété})_{ik} + (\text{fertilisation} \times \text{variété})_{jk} \\ + (\text{système} \times \text{fertilisation} \times \text{variété})_{ijk} + \text{bloc}_l + \text{erreur}_{ijkl}$$

Équation III-2. Modèle statistique. p est la proportion de surface foliaire ou de grains touchés par la maladie.

Afin de tester des éléments explicatifs du mode d'action des facteurs étudiés (système de culture, fertilisation), on ajoute successivement des variables intermédiaires dans le modèle graphique, appelées covariables (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Si l'effet de la covariable ajoutée supprime l'effet du facteur de départ, cela signifie qu'on peut expliquer l'effet du facteur par cet intermédiaire, et on peut alors simplifier la relation. Dans le cas contraire, cela signifie que le facteur agit directement sur la variable testée, sans passer par l'intermédiaire des covariables, qui ne peuvent donc pas expliquer cet effet.

IV. RESULTATS ET INTERPRETATION

1. Impact du système de culture et de la fertilisation azotée sur la pyriculariose

Les graphiques des figures **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustrent la sévérité des attaques de pyriculariose selon le mode de culture, par site et par année. Dans chaque cas, une seule date de notation épidémiologique a été retenue : généralement la deuxième, car c'est celle pour laquelle les notes étaient le mieux corrélées aux autres paramètres. Lors de l'interprétation des résultats, on gardera à l'esprit que ceux-ci peuvent être en partie conditionnés par le choix de cette date. En effet, sur un même plant de riz, la résistance n'est pas homogène pour toutes les feuilles : la résistance d'une feuille augmente avec le temps, et une nouvelle feuille produite par une plante déjà « vieille » acquiert la résistance plus rapidement que les feuilles l'ayant précédée (Baastians, 1993). Comme ces dates ne sont pas fixes sur le calendrier, cela peut représenter un biais dont il faut tenir compte.

On observe une grande similitude dans la tendance des résultats d'une année à l'autre, bien que dans l'absolu, les valeurs varient beaucoup. On notera notamment les valeurs très faibles de pyriculariose foliaire obtenues pour la variété intermédiaire à Andranomanelatra en 2009-2010 et en 2011-2012, qui pourraient refléter davantage un « bruit de fond » dû à des contaminations extérieures qui ne se propagent pas. On peut supposer que le niveau de contamination est homogène à l'échelle de la parcelle, et qu'il n'y a pas eu de véritable épidémie cette année-là. A l'exception de ces cas particuliers, on observe une corrélation positive entre la quantité de fertilisant et la sévérité de la maladie. Comme attendu, la variété sensible v1 est toujours plus attaquée que la variété intermédiaire v2, excepté en 2012-2013.

On constate que des deux sites, c'est celui d'Ivory qui semble le moins attaqué. Or le site d'Andranomanelatra étant situé en altitude, on se serait attendu à des attaques plus importantes sur ces parcelles-là. En effet, le froid augmente la sensibilité du riz à la pyriculariose (Hashioka, 1965 ; Seebold *et al.*, 2000), en jouant sur l'assimilation d'azote par la plante. Des températures entre 18 et 20°C et une humidité relative de plus de 90% pendant une semaine ou plus, prédisposent davantage les cultivars peu résistants à la pyriculariose (Pande *et al.*, 1997). Cependant, à Ivory, le SCV est bien plus facile à installer qu'à Andranomanelatra, donc il est logique que les effets du SCV à Ivory soient plus forts qu'à Andranomanelatra. En outre, la variété sensible F154 (v1) est moins cultivée par les agriculteurs dans la région d'Ivory qu'autour d'Andranomanelatra, ce qui entraîne probablement une plus faible pression de maladie pour cette variété sur le deuxième site et une moindre adaptabilité des souches de *M. oryzae*. Un génotypage des souches est en cours, et nous en apprendra plus sur la question. Aucun clivage net ne peut donc être dégagé entre les deux sites : les variations sont bien plus marquées d'une année à l'autre, ce qui est finalement logique car le climat, la croissance de la culture ou encore la quantité d'inoculum sont autant de paramètres qui évoluent au cours du temps.

Pyriculariose foliaire

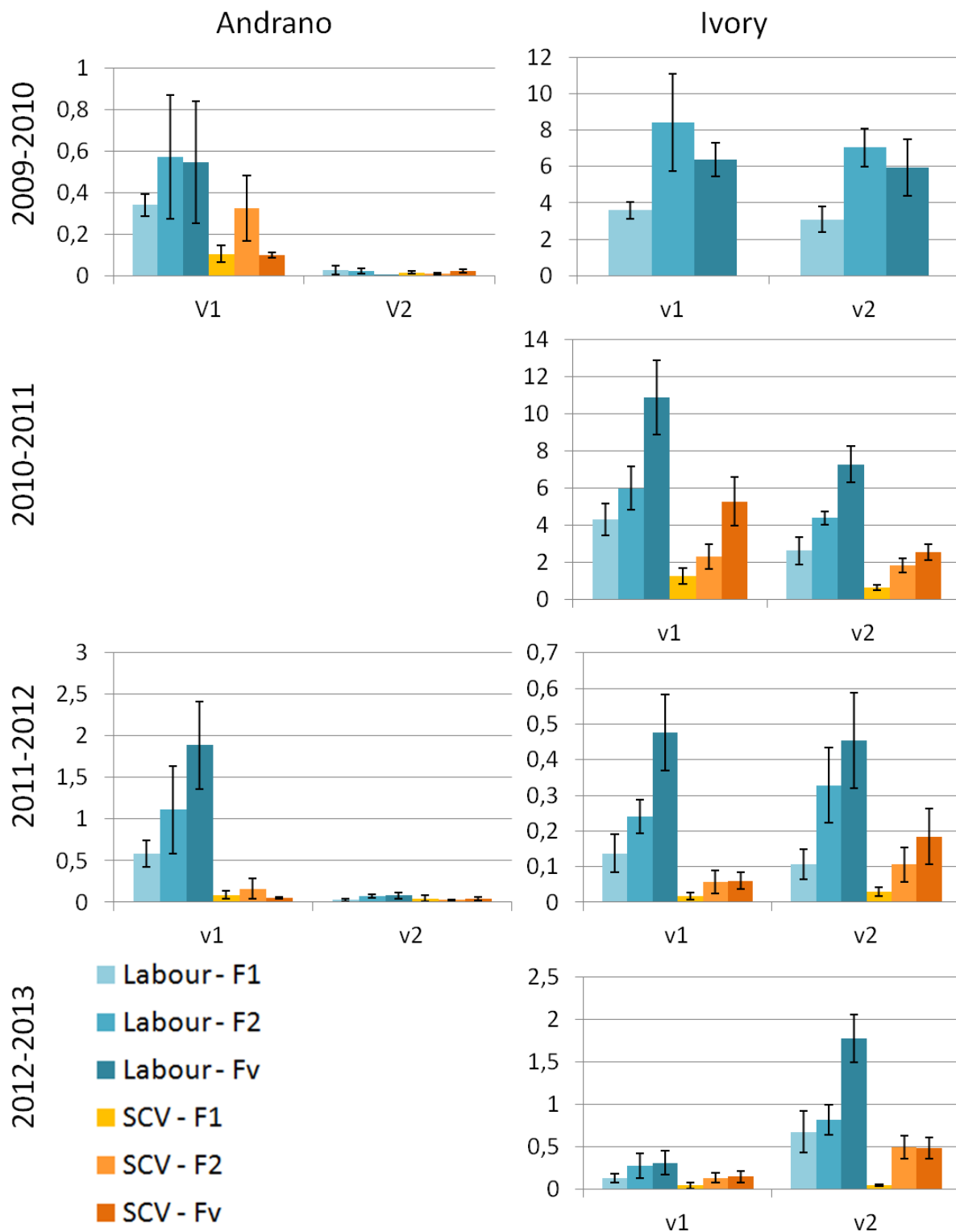


Figure IV-1. Evolution de l'incidence de pyriculariose foliaire. En ordonnée : pourcentage de surface foliaire attaquée.

Pyriculariose paniculaire

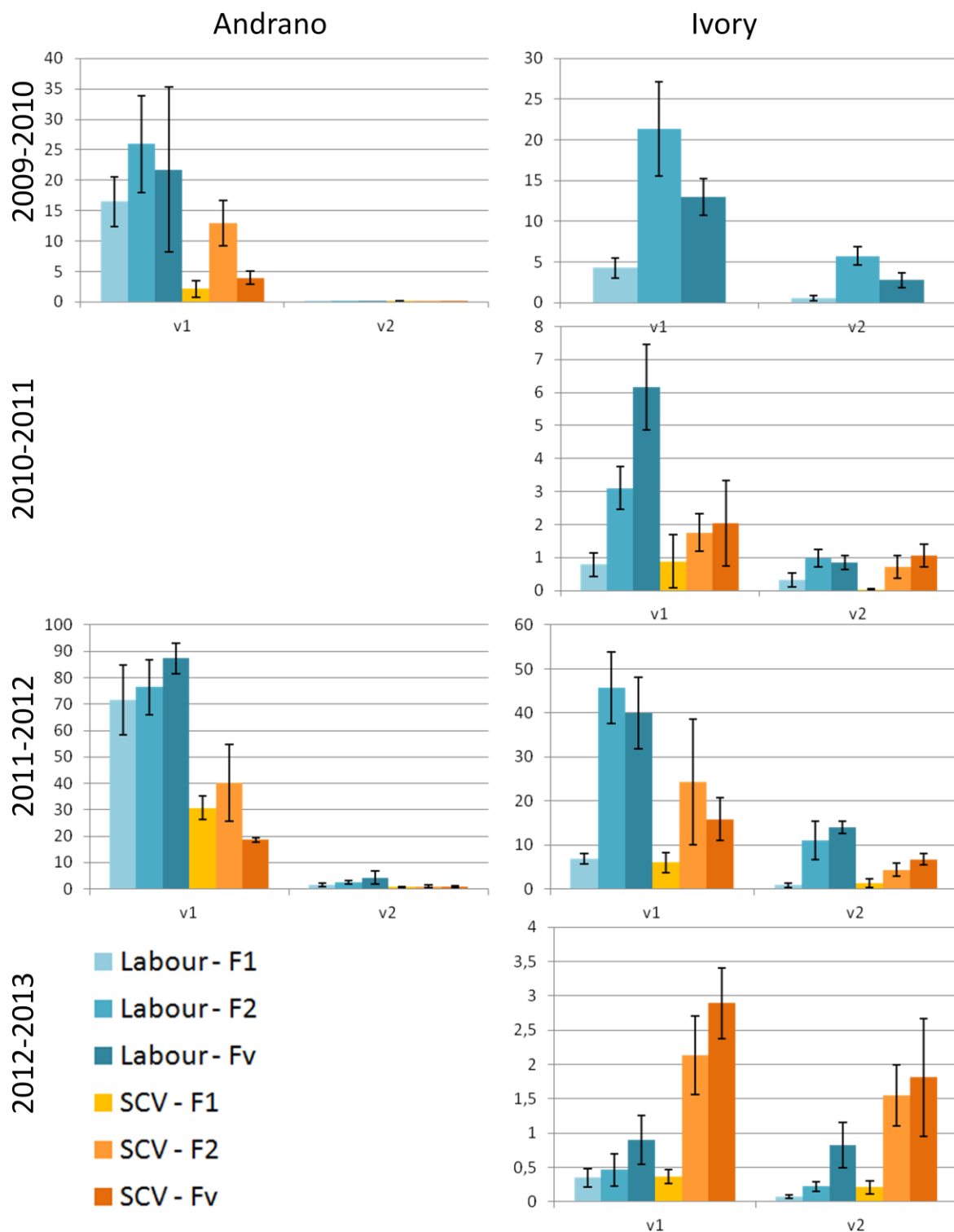


Figure IV-2. Evolution de l'incidence de pyriculariose paniculaire. En ordonnée : pourcentage de grains attequés.

Afin de comprendre un peu mieux ces résultats, nous avons regardé quels effets étaient statistiquement significatifs sur les attaques de pyriculariose (Tableau IV-1).

Site		Andranomanelatra				Ivory					
Année		2009 - 2010		2011 - 2012		2010 - 2011		2011 - 2012		2012 - 2013	
Pyriculariose		Foliaire	Paniculaire	Foliaire	Paniculaire	Foliaire	Paniculaire	Foliaire	Paniculaire	Foliaire	Paniculaire
Facteurs	Système		**	***	***	***		***			***
	Fertilisation					**	**	***		**	**
	Variété	***		***	***	**		*		***	
	Bloc	*			***	***		**	**	***	
	Syst*Ferti										
	Syst*Var			***							
	Ferti*Var									**	
	Syst*Var*Ferti	*									

Tableau IV-1. Tableau récapitulatif des effets significatifs de différents facteurs sur le taux de sévérité de pyriculariose. Les cases grises correspondent à un effet non significatif ; *** = $p < 10^{-3}$; ** = $p < 10^{-2}$; * = $p < 0,05$ (seuil 5%).

On constate que les résultats sont très hétérogènes. A Andranomanelatra, l'effet fertilisation n'est jamais significatif, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que les sols de ce site sont déjà très riches en N, en général dans cette région. Ainsi, même quand la fertilisation Fv était maximisée, la croissance n'a pas été particulièrement améliorée. L'effet système en revanche est bien significatif. A Ivory, la tendance n'est pas aussi claire : parfois l'un ou l'autre des effets est significatif, parfois les deux. Quels que soient le site ou l'année, on remarquera surtout que l'interaction entre système de culture et fertilisation n'est jamais significative.

Pour illustrer le cas général, prenons l'exemple de la pyriculariose foliaire en 2011-2012 à Ivory (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

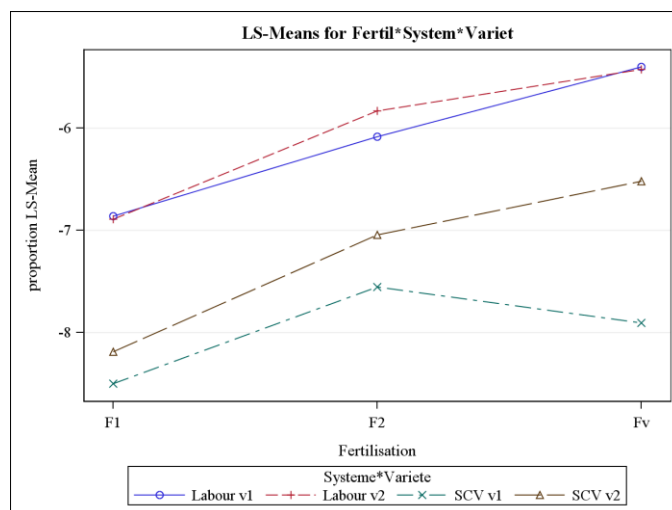


Figure IV-3. Incidence de la pyriculariose foliaire à Ivory en 2011-2012. Les valeurs représentent le logit du pourcentage de surface foliaire atteinte.

L'effet système ressort bien ici : comme on le constatait déjà graphiquement, le riz en labour est plus atteint par la maladie que le riz en SCV. On a aussi un effet fertilisation : plus la quantité d'azote apportée augmente, plus l'incidence de la maladie est forte.

En 2012-2013 en revanche, on obtient un résultat assez surprenant pour la pyriculariose paniculaire : les parcelles en SCV sont plus attaquées que les parcelles en labour (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

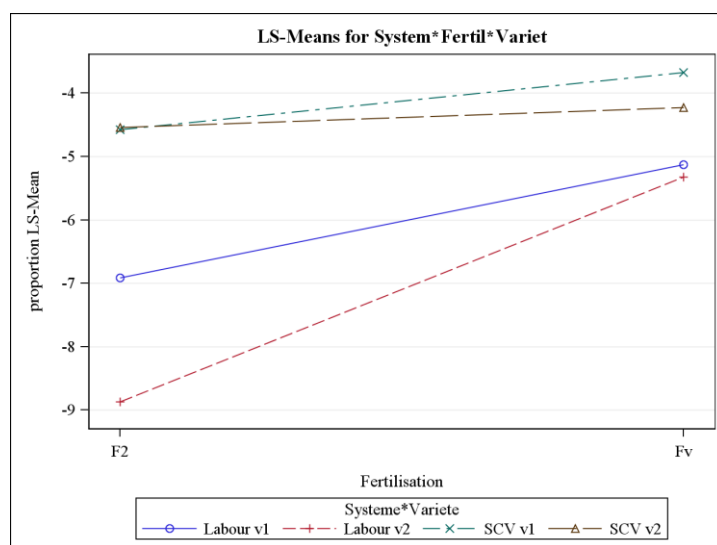


Figure IV-4. Incidence de la pyriculariose paniculaire à Ivory en 2012-2013. Les valeurs représentent le logit de la proportion de grains attaqués. Rq : La fertilisation F1, pour laquelle une grande partie des données était nulle, a dû être supprimée afin que le modèle puisse converger.

Ce dernier résultat semble contradictoire avec ceux des années précédentes. Cependant on remarquera que les valeurs qui ont permis de l'obtenir sont particulièrement faibles (incidence de l'ordre de 1%).

On pourrait par ailleurs expliquer cette "anomalie" par le fait qu'alors que le riz cultivé en SCV met généralement plus de temps à démarrer sa croissance que le riz en labour (Dusserre *et al.*, 2012), cela n'a pas été le cas à Ivory en 2012-2013. En effet, une période de sécheresse en début de cycle a pénalisé les cultures en labour, alors qu'en SCV le mulch a permis de conserver une certaine humidité au sol, limitant le stress hydrique subi par le riz. Cette différence a permis aux plantes en SCV d'arriver à un couvert équivalent à celui du labour.

On peut alors formuler l'hypothèse que la moindre attaque des plantes en SCV les années précédentes était due non pas à un tamponnement dans la dynamique d'apport d'azote, mais plutôt à un retard de développement de la plante. D'autres essais GARP portant sur l'effet de la densité du couvert ont d'ailleurs montré que celle-ci pouvait avoir un impact sur la vitesse de progression de la maladie (Sester, 2013 - résultats non publiés). Il faudrait maintenant vérifier si l'effet du système de culture passe par une modification de la dynamique de l'azote, par une modification de la densité ou par les deux cumulées.

Cela ne contredit pas l'hypothèse selon laquelle l'azote joue un rôle dans le développement de la maladie, puisque le développement de la plante est une conséquence de la quantité d'azote. On observe d'ailleurs une corrélation positive entre la quantité de fertilisant et l'incidence de la maladie (Figure IV-1 et Figure IV-2).

2. Effet du développement végétatif sur les attaques de pyriculariose

Afin d'étudier plus précisément le lien entre le développement du couvert et les attaques de pyriculariose, nous avons calculé des corrélations entre deux indicateurs de développement et les données épidémiologiques. Ces deux indicateurs sont le LAI (surface foliaire) qui reflète la densité du couvert, et la biomasse aérienne (en t/ha).

Site		Andranomanelatra				Ivory			
Année		2011 - 2012		2011 - 2012		2012 - 2013			
Pyriculariose foliaire		v1	v2	v1	v2	v1		v2	
						d1	d2	d1	d2
Facteurs	LAI 1	0.60**		0.64***	0.80***				
	LAI 2	0.62**			0.73***			0.46*	
	LAI 3	0.59**							

Tableau IV-2. Coefficients de corrélations obtenus entre LAI (plusieurs prélèvements) et pyriculariose foliaire. En vert les corrélations significativement positives, en gris les corrélations non significatives.

Site		Andranomanelatra						Ivory						
Année		2009 - 2010		2011 - 2012		2010-2011			2011 - 2012		2012 - 2013			
Pyriculariose foliaire		v1		v2		v1		v2		v1		v2		
		d1	d2	d1	d2	d1	d2	d3	d1	d2	d1	d2	d1	d2
Facteurs	Biomasse 1					0.50*			0.46*		-0.45*			0.43*
	Biomasse 2	0.44*	0.52**			0.64***			0.60**			0.46*		0.46*
	Biomasse 3					0.68***						0.51*		
	Biomasse 4						0.48*				0.64**	0.65***		

Tableau IV-3. Coefficients de corrélation entre biomasse (plusieurs prélèvements) et pyriculariose foliaire. En vert les corrélations significativement positives, en orange les significations significativement négatives, en gris les corrélations non significatives.

Site		Andranomanelatra						Ivory							
Année		2009 - 2010		2011 - 2012		2010-2011			2011 - 2012		2012 - 2013				
Pyriculariose paniculaire		v1		v2		v1		v2		v1		v2			
		d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2		
Facteurs	Biomasse 1			0.45*	0.42*			0.51*					0.52**		
	Biomasse 2	0.56**		0.76***	0.89***			0.43*		0.57**	0.56**	0.41*	0.55**	0.43*	0.77***
	Biomasse 3			0.80***	0.76***			0.47*				0.56**	0.65***	0.49*	
	Biomasse 4			0.46*	0.45*					0.73***	0.75***	0.80***	0.84***		0.25

Tableau IV-4. Corrélations entre biomasse (plusieurs prélèvements) et pyriculariose paniculaire. En vert les corrélations significativement positives, en gris les corrélations non significatives.

Selon les Tableau IV-2, Tableau IV-3 et Tableau IV-4, on constate que les corrélations entre biomasse et pyriculariose foliaire et paniculaire comme les corrélations entre LAI et pyriculariose foliaire sont significatives dans de nombreux cas. La biomasse, comme le LAI évolue dans le même sens que la pyriculariose. Ces résultats confortent l'hypothèse selon laquelle une plus forte biomasse est liée à de plus grosses attaques de pyriculariose, sans que pour autant la relation de cause à effet soit prouvée. Les résultats semblent également indiquer un lien plus fort entre biomasse et pyriculariose paniculaire qu'entre biomasse et pyriculariose foliaire.

Une autre façon d'estimer l'effet de ces paramètres sur les attaques de pyriculariose est de les intégrer au modèle statistique (Équation III-2) en tant que covariables explicatives des principaux effets testés (système et fertilisation). Cela nous permettra de savoir si on peut

tout expliquer par la densité ou s'il reste un effet passant par un mécanisme additionnel (voir paragraphe II.4.3). Les résultats des analyses de covariables pour la pyriculariose paniculaire n'ayant pas été très probants, nous nous limiterons à l'observation des résultats concernant les attaques foliaires.

Pyriculariose Foliaire												
	Andrano				Ivory							
	2009-2010		2011-2012		2010-2011		2011-2012		2012-2013			
	Système	Fertilisation	Système	Fertilisation	Système	Fertilisation	Système	Fertilisation	Système	Fertilisation		
INN	Pas d'effet système	Pas d'effet fertilisation		Pas d'effet fertilisation	P1 P2	P1 P2			Pas d'effet système			
LAI			P2 P3 P4					P3			P2 P3	
Azote Feuille			P1			P1	P1 P2			P3		
Biomasse						P1						P1
Dualex							P1 P2	P1 P2				
SPAD							P1				P3	
Azote Plante							P1 P2	P1 P2				

Tableau IV-5. Récapitulatif de l'effet des covariables sur la pyriculariose foliaire. P1, P2... correspondent au numéro du prélèvement pour lequel la covariable annule/explique l'effet système ou fertilisation (dans le cas où cet effet était significatif dans le modèle initial).

Le Tableau IV-5 synthétise les résultats des analyses statistiques avec les mesures de croissance ou d'assimilation de l'azote comme covariables (Doge, 2013). D'après ces résultats, on ne peut pas affirmer que le LAI ou la biomasse expliquent l'effet système intervenant dans l'attaque des feuilles par *M. oryzae*. Dans certains cas, comme à Ivory en 2011-2012, on obtient des résultats laissant penser que le LAI pourrait expliquer l'effet fertilisation. Cependant, si on élargit l'analyse à toutes les années et aux deux sites, cette tendance est loin d'être vérifiée.

Il est particulièrement surprenant qu'à Andranomanelatra en 2011-2012, le LAI explique l'effet système mais pas la biomasse. En effet, ces covariables sont normalement liées entre elles. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.6** confirme que la relation entre pyriculariose foliaire et biomasse n'est pas claire. Ce graphe permet également de se rendre compte de la faible sévérité de la maladie.

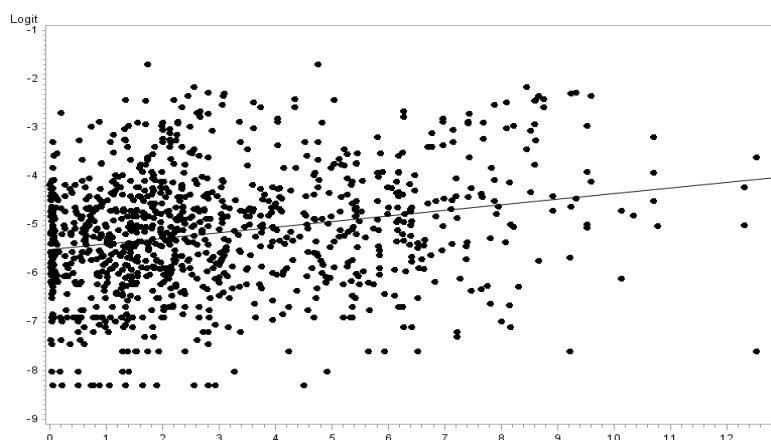


Figure IV-5. Figure IV-6. Evolution du logit de la proportion de surface foliaire atteinte par la pyriculariose en fonction de la biomasse aérienne (en kg/m²).

En 2010-2011 à Ivory, la teneur en azote foliaire semble aussi avoir un rôle sur l'incidence de pyriculariose foliaire : la covariable semble bien expliquer les effets système et fertilisation.

3. Impact de l'équilibre minéral sur la résistance à la pyriculariose

L'ajout de covariables relatives au diagnostic foliaire (teneur en différents minéraux) donne les résultats présentés dans le Tableau IV-6.

	Pyriculariose Foliaire									
	Andrano				Ivory					
	2009-2010		2011-2012		2010-2011		2011-2012		2012-2013	
	Système	Fertilisation	Système	Fertilisation	Système	Fertilisation	Système	Fertilisation	Système	Fertilisation
SiO2					*					
N					*					
D_P					*					
K					*					
Ca					*					
Mg					*					
Na					*					
Cu					*					
Mn					*					
Zn					*					
B					*					
S					*					*
NNH4					*					
NNO3					*					
NAlphaAmi					*					

Tableau IV-6. Récapitulatif de l'effet des covariables du diagnostic foliaire sur la pyriculariose foliaire.

Dans un tableau de ce type, on se serait plutôt attendu à voir une teneur en un élément minéral donné apparaître comme un élément explicatif plusieurs années de suite. Au lieu de cela, on trouve que les éléments minéraux ne sont jamais des éléments explicatifs de l'effet du système ou de la fertilisation dans la plupart des cas, sauf en 2010-2011 à Ivory, où cette fois tous les éléments minéraux interviennent pour expliquer l'un ou l'autre des effets testés. Il est possible que cette année-là, les parcelles aient été dans un état de déséquilibre minéral particulièrement important. Ces résultats, ainsi que l'absence de répétabilité, laissent penser que les effets des éléments minéraux, s'ils existent, sont trop complexes pour notre niveau de précision dans l'expérimentation en plein champ.

L'une des hypothèses du projet GARP est qu'en SCV, l'azote serait disponible de manière régulière pour la plante, grâce aux processus constants d'immobilisation et de minéralisation de l'azote apporté par les résidus de récolte (voir paragraphe I.0). En système labouré, les apports ponctuels d'azote engendreraient des pics d'absorption d'azote particulièrement favorables au développement de *M.oryzae*. En outre, ce déséquilibre nutritionnel empêcherait l'expression d'une résistance efficace par la plante. On émet l'hypothèse que si la quantité d'azote apporté joue un rôle important dans la sévérité de la maladie, le moment auquel est fait cet apport est tout aussi important, car l'azote peut également interagir avec le cycle du parasite. Il est d'ailleurs intéressant de noter qu'en 2012-2013, une même quantité d'azote apportée en une seule fois (Fv) a entraîné plus de maladie qu'un apport réalisé en deux fois (F2) (Figure IV-1 et Figure IV-2), ce qui tendrait à confirmer l'existence d'une interaction entre l'azote et le cycle de développement du champignon et de la plante. Cela pourrait également signifier que l'ampleur de l'épidémie est conditionnée par ce qui se passe au démarrage du cycle. Ces modalités d'apport azoté (même quantité apportée en une

ou deux fois) seront reconduites au cours de la dernière campagne, afin de confirmer les résultats obtenus cette année.

Par ailleurs, les parois cellulaires sont les premières barrières que *M. oryzae* traverse avant d'infecter les cellules épidermiques de la plante-hôte. Bien que la forme NH₄⁺ participe à la lignification des parois cellulaires, une quantité excessive d'azote par rapport au carbone dans la plante stimule la croissance par la création et par l'allongement de nouvelles feuilles qui ont alors des parois fines, ce qui les rend *a priori* sensibles aux agressions. Cependant, de récentes études ont montré que la teneur en azote des feuilles aurait plutôt une influence sur la vitesse de colonisation de cellule à cellule que sur le taux de pénétration du pathogène (Ballini, comm. pers.).

4. Evolution de la maladie : lien entre pyriculariose foliaire et pyriculariose paniculaire

Comme il l'a déjà été évoqué en Introduction, selon le stade de développement de la plante, la pyriculariose touche différents organes du riz. De plus, la pyriculariose foliaire est supposée constituer un foyer d'infection pour la pyriculariose paniculaire, l'inoculum passant des feuilles aux panicules d'un même plant. Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons étudié les corrélations entre les attaques de pyriculariose aux deux stades de développement de la plante : on s'attend à ce que les taux d'incidence de la maladie aux deux stades soient corrélés positivement. Cette étude nous permet également d'établir si les mêmes mécanismes de défense s'expriment aux deux stades, et si les deux étapes de la maladie sont favorisées par les mêmes conditions. On s'intéresse également à la corrélation entre les différentes notations réalisées à chacun des deux stades.

	Andranomanelatra												Ivory											
	2009-2010				2011-2012				2009-2010				2010-2011				2011-2012				2012-2013			
	v1		v2		v1		v2		v1		v2		v1		v2		v1		v2		v1		v2	
	PP1	PF1	PP1	PF1	PP1	PF1	PP1	PF1	PP1	PP2	PF1	PP1	PP2	PF1	PP1	PF1	PP1	PF1	PP1	PF1	PP1	PF1	PP1	PF1
PP1	X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X		X	
PP2					0.77***	0.73***			0.74**	X			X				0.84***		0.81***	0.76***				
PF1	0.41*	X			0.77***	X		X		0.73**	X		X		X		0.42*	X	0.76***	X		X	0.45*	X
PF2	0.81***								0.78**					0.71***		X								
PF3															0.65**		0.60**							

Tableau IV-7. Corrélations obtenues entre les notes de pyriculariose foliaire et de pyriculariose paniculaire.

Globalement, nous avons pu trouver des corrélations positives assez fortes (généralement comprises entre 0.70 et 0.85) et significatives entre la deuxième notation de pyriculariose foliaire (90-100 JAS à Andranomanelatra, 65-70 JAS à Ivory) et la première note de pyriculariose paniculaire (125-130 JAS à Andranomanelatra, 90-95 JAS à Ivory) pour la variété sensible v1. Ce n'est pas le cas pour la variété intermédiaire, sauf à Ivory les deux dernières années.

Les notations de pyriculariose paniculaire successives sont souvent corrélées positivement entre elles, ce qui n'est pas le cas pour les notations de pyriculariose foliaire. On remarquera que les notes sont comprises dans des gammes de valeurs très variables selon les années, les sites et les variétés, et qu'il existe très certainement un effet « notateur » qui n'est pas pris en compte ici, bien qu'on essaie de le minimiser au maximum.

Le fait de trouver des corrélations positives entre les notes de pyriculariose foliaire et paniculaire tend à confirmer l'hypothèse selon laquelle l'inoculum passe des feuilles aux panicules et semble indiquer que la tolérance à la maladie aux deux stades de

développement est régie par les mêmes interactions avec l'environnement. Cependant, ce phénomène est moins observé pour la variété intermédiaire, ce qui pourrait signifier que la pyriculariose observée pour cette variété est issue d'inoculum extérieur et non pas du développement de l'épidémie dans les parcelles, comme on l'avait déjà supposé plus tôt dans notre analyse concernant Andranomanelatra (paragraphe IV.1.). Le fait que les notes de pyriculariose foliaire ne soient pas corrélées entre elles peut s'expliquer par le fait que les premières feuilles attaquées se nécrosent et qu'un nouveau cycle du parasite commence sur les feuilles notées par la suite. Selon le moment où la notation est faite, le degré de sévérité n'est donc pas nécessairement lié à celui des feuilles précédemment notées.

5. Effet de la pyriculariose sur le rendement

Pour terminer cette analyse, nous allons nous intéresser aux conséquences de la maladie sur le rendement (voir paragraphe II.3.2). Dans cette optique, nous avons testé les corrélations entre les attaques de pyriculariose et différentes composantes du rendement.

5.1. Effet de la pyriculariose paniculaire sur le rendement et ses composantes

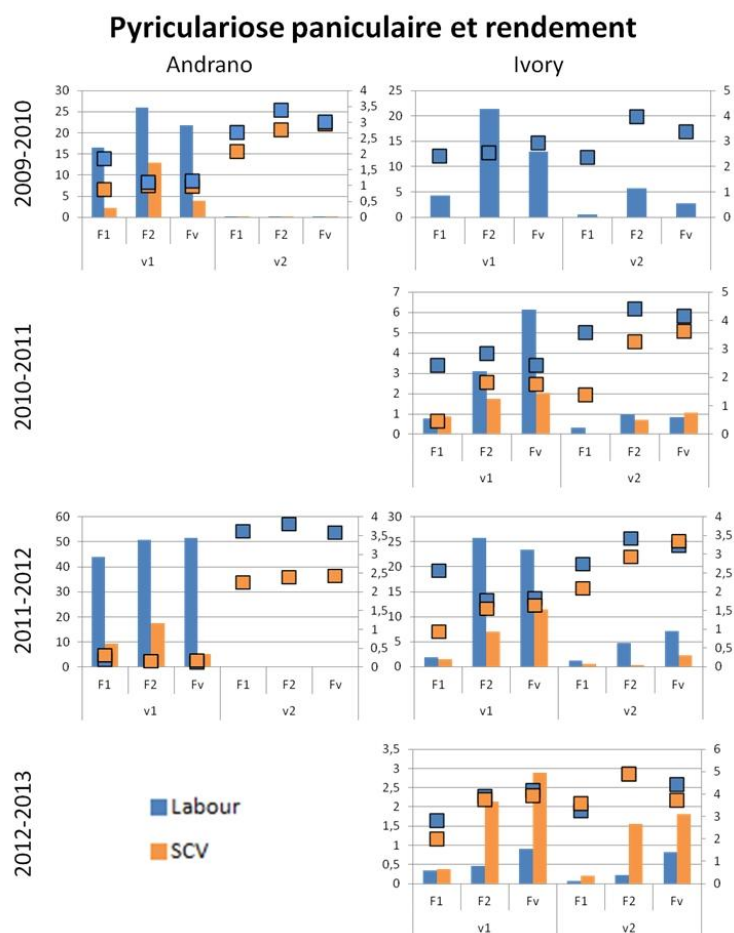


Figure IV-7. Rendement total (t/ha) et pyriculariose paniculaire (% de grains atteints). Pour chaque situation, les barres représentent les valeurs de pyriculariose paniculaire, les carrés représentent les valeurs de rendement (échelle de

D'après la figure IV-6, les résultats de la corrélation entre pyriculariose paniculaire et rendement final ne sont pas significatifs pour la variété sensible, sauf à Andranomanelatra en 2009-2010. Les résultats obtenus pour la variété intermédiaire sont un peu surprenants, puisqu'on a des corrélations positives : le rendement final serait plus élevé lorsque les plantes sont le plus touchées par la maladie. Il se peut que la plus forte attaque de pyriculariose soit due à un meilleur développement de la plante, qui a également permis un meilleur rendement. La pyriculariose n'étant pas une contrainte majeure sur cette variété, c'est l'effet de la croissance qui explique donc le rendement.

Dans la mesure où le rendement final est le produit de toutes ses composantes (voir Équation III-1), nous avons également regardé comment celles-ci étaient affectées par la pyriculariose.

5.2. Effet de la pyriculariose foliaire sur le nombre de talles

Dans nos analyses, aucune corrélation statistiquement significative n'a pu être établie entre la sévérité de la pyriculariose foliaire et le nombre de talles, sauf à Ivory en 2010-2011 (v1). Il faut noter que nos valeurs de pyriculariose foliaire sont très faibles et la proportion de surface foliaire attaquée reste très minime. Il n'est donc pas surprenant que la diminution de photosynthèse liée à la pyriculariose n'entrave pas le nombre de talles.

5.3. Effet de la pyriculariose foliaire sur le nombre d'épillets par panicule

Site	Andranomanelatra				Ivory															
	2009 - 2010		2011 - 2012		2009-2010				2010 - 2011						2011 - 2012		2012 - 2013			
Pyriculariose foliaire	v1	v2	v1	v2	v1		v2		v1			v2			v1	v2	v1		v2	
					d1	d2	d1	d2	d1	d2	d3	d1	d2	d3			d1	d2	d1	d2
Nb d'épillets/pani				0.42*							0.57*					-0.45*				

Tableau IV-8. Corrélations obtenues entre le nombre d'épillets par panicule et la pyriculariose foliaire.

La seule corrélation significativement négative est obtenue pour Ivory en 2011-2012, et on trouve en revanche des corrélations positives pour la variété sensible à Ivory en 2010-2011, et pour la variété intermédiaire à Andranomanelatra en 2011-2012. On se serait pourtant attendu à trouver davantage de corrélations négatives, car des attaques de pyriculariose à l'initiation paniculaire peuvent faire diminuer le nombre d'épillets de façon significative. De tels résultats pourraient être expliqués par un meilleur développement des plantes ayant conduit à la fois à plus d'attaque du champignon et à une plus grande production de grains.

5.4. Effet de la pyriculariose paniculaire sur le pourcentage de grains pleins

Site	Andranomanelatra				Ivory											
	2009 - 2010		2011 - 2012		2009-2010				2010 - 2011		2011 - 2012				2012 - 2013	
Pyriculariose paniculaire	v1	v2	v1		v2		v1		v2		v1		v2		v1	v2
			d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2		
PCGP	-0.45*		-0.52**	-0.44*			-0.90***	-0.81**					-0.61**	-0.46*		

Tableau IV-9. Corrélations entre le pourcentage de grains pleins (PCGP) et l'incidence de pyriculariose paniculaire.

D'après le Tableau IV-9. Corrélations entre le pourcentage de grains pleins (PCGP) et l'incidence de pyriculariose paniculaire., on trouve une corrélation négative presque toujours significative (sauf à Ivory en 2010-2011 et en 2012-2013) pour la variété sensible entre la sévérité de la pyriculariose paniculaire et le taux de remplissage des grains. En revanche,

cette corrélation n'apparaît jamais pour la variété intermédiaire, ce qui pourrait signifier que les attaques de pyriculariose ont été trop tardives pour affecter la fertilité des grains sur cette variété. On s'attendrait alors à ce que le poids de mille grains soit affecté : les grains se seraient remplis partiellement et seraient par conséquent moins "lourds". Cependant, on ne trouve aucune corrélation significative entre la pyriculariose et le poids de mille grains, ce qui remet en question notre hypothèse.

V. DISCUSSION GENERALE

1. Réponses aux hypothèses de GARP

La grande hypothèse du projet GARP était l'existence d'une interaction entre système de culture et fertilisation azotée : l'apport d'azote favoriserait la pyriculariose, mais ce phénomène serait tempéré par un système de culture de type SCV. La sévérité de la maladie devrait donc être plus faible en SCV qu'en labour, mais il devrait également y avoir une interaction significative entre l'effet du système de culture et la fertilisation azotée. Cependant, les résultats des analyses statistiques réalisées sur les données récoltées au cours des quatre années de projet ne semblent pas aller dans ce sens. En effet, si on observe un effet significatif du système ou de la fertilisation dans la plupart des cas, l'interaction entre ces deux facteurs n'est, elle, jamais significative. Afin d'exacerber les différents effets, on pourrait envisager de prendre une variété encore plus sensible, ou d'augmenter la source d'inoculum extérieur, par exemple en apportant des pailles contaminées de la culture précédente à côté des parcelles cultivées. Le risque d'une telle pratique est que la variété soit tellement attaquée que la maladie atteigne dans tous les cas un niveau maximum sans qu'aucune différence n'apparaisse entre les traitements. Une autre expérience de GARP consistant à comparer un panel de variétés plus ou moins sensibles à la pyriculariose pourra permettre de compléter ces observations et de voir si les variétés répondent toutes de la même façon aux différents traitements.

Il n'en demeure pas moins que les plantes cultivées en SCV sont plus attaquées que les plantes cultivées en labour. Plusieurs hypothèses avaient été listées dans l'introduction pour expliquer cette différence, que nous allons à présent reconsidérer.

1.1. Régularité dans la distribution d'azote au cours du cycle

Bien que l'on trouve des corrélations positives entre la quantité d'azote apportée et l'incidence de la maladie, nos données actuelles ne nous permettent pas de tirer de réelles conclusions concernant la distribution d'azote au cours du cycle entre les systèmes labour et SCV. Pour répondre à cette question, il serait intéressant d'étudier la dynamique évolutive de l'assimilation d'azote par la plante : on pourrait pour cela faire une mesure au premier apport de fertilisation et une autre une semaine plus tard, ce qui permettrait d'établir un lien plus clair entre azote et les cycles de *M. oryzae* et de la plante. L'investissement dans un appareil NIRS (Near Infrared Reflectance Spectroscopy) qui faciliterait les analyses est envisagé.

Par ailleurs, afin de tester l'impact de la répartition des apports d'azote dans le temps, il a été choisi en 2012-2013 d'apporter une même quantité d'azote en une ou deux fois au cours du cycle. Les résultats, présentés dans le paragraphe IV- 1, sont intéressants puisqu'ils semblent montrer que l'apport d'une quantité n d'azote concentré en début de cycle augmente la maladie de la même façon qu'un apport fractionné de $2n$ unités d'azote par rapport à un apport fractionné de n unités d'azote. Le protocole sera réitéré pour la campagne 2013-2014 et permettra de confirmer ou non ces résultats.

1.2. Développement végétatif de la plante

Comme nous l'avons déjà évoqué dans le paragraphe IV-1, durant les trois premières années de projet le riz cultivé en SCV mettait toujours plus de temps à démarrer sa croissance que le riz en labour. Cela n'a pas été le cas à Ivory en 2012-2013 : un épisode de sécheresse a entraîné un stress hydrique important en labour tandis que le mulch présent en SCV a permis aux plantes d'arriver à un couvert équivalent à celui du labour. Or, les plantes en SCV ont justement été davantage touchées par la maladie que les plantes en labour, alors que c'était le contraire les années précédentes, ce qui laisse supposer que la moindre attaque des plantes en SCV les années précédentes était plus le fait d'un retard de développement de la plante que d'un tamponnement dans la dynamique d'apport d'azote.

Comme nous l'avons également déjà vu, d'autres essais GARP portant sur l'effet de la densité du couvert ont montré que celle-ci pouvait avoir un impact sur la vitesse de progression de la maladie. Cela pourrait être dû à la modification des conditions microclimatiques à l'échelle de la parcelle. La stabilisation des systèmes à Ivory va pouvoir permettre d'évaluer l'effet système sans la différence de densité.

1.3. Equilibre minéral dans la plante

Nos résultats sur les analyses de teneurs des feuilles en différents éléments minéraux ne se sont pas révélés probants. Cependant, nous restons persuadés que l'équilibre minéral global de la plante joue un rôle fondamental dans sa résistance à la maladie. Une analyse plus poussée, consistant à évaluer l'effet de l'équilibre des différents minéraux sur la pyriculariose serait à envisager pour une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu. Il a par ailleurs déjà été montré que certains sols (tel que celui de la région de Betafo, à quelques dizaines de kilomètres à l'ouest d'Andranomanelatra) avaient des propriétés favorisant la résistance du riz à la pyriculariose, ce qui permettait d'augmenter le rendement des parcelles de la même manière que si elles avaient été traitées aux fongicides (Huot de Longchamp, 2009). Bien que jusqu'à présent, les tentatives d'amélioration du sol de la commune d'Andranomanelatra (par apport de cendres ou de balles de riz grillées pour augmenter le taux en silice par exemple) n'aient pas suffi à améliorer la résistance du riz ni son rendement, il serait intéressant de continuer à surveiller la structure et la nature du sol.

2. Variabilité des résultats au cours du projet

En comparant les résultats obtenus au cours des quatre années de projet, nous avons pu constater une grande variabilité dans les résultats. Si la pression de la maladie est incontrôlable et peut fortement varier au cours des années, de même que les conditions climatiques, l'utilisation de plusieurs variétés de niveaux de résistance différents était justement prévue pour être sûr que chaque année, l'une au moins des variétés pourrait avoir un niveau de maladie « intermédiaire », permettant une bonne observation des différences entre traitements. Il faudrait alors sélectionner uniquement les années, les sites et les variétés où les attaques de pyriculariose étaient suffisamment sévères pour que la majorité des pourcentages de surface foliaire attaquée soient supérieurs à 1%, ce qui pourrait permettre de ne pas noyer les résultats vraiment significatifs avec des bruits de fond.

3. Traitement des données

L'interdisciplinarité inhérente au projet GARP rend les analyses de données à la fois très intéressantes et très complexes : il est difficile de savoir exactement quoi tester, et de comprendre les interactions entre les différents paramètres. En outre, la longueur du projet (5 campagnes), l'ampleur des essais et l'hétérogénéité des terrains rendent les comparaisons difficiles.

Jusqu'à présent, des analyses des résultats étaient faites indépendamment à l'issue de chaque campagne. S'il était alors possible de faire ressortir des effets ponctuels, l'analyse perdait de son intérêt en cela qu'elle ne traitait qu'une seule phase du projet. La conception d'une base de données dans ce contexte nous a permis de considérer les données dans leur ensemble, et d'en tirer un bilan plus général et plus juste. Il sera désormais également plus facile pour les différents acteurs de consulter et de compléter les informations contenues dans la base de données. En outre, il sera nécessaire de poursuivre les analyses statistiques sur le reste des données, en particulier sur celles du rendement, et d'intégrer la dernière campagne de projet aux bilans établis cette année.

VI. CONCLUSION

Cette étude nous a permis d'avoir une vue d'ensemble sur les multiples données du projet GARP à Madagascar, et de produire un bilan partiel à l'issue de la quatrième année d'étude.

Contrairement à nos hypothèses de départ, l'interaction entre système de culture et fertilisation n'a jamais été statistiquement significative au cours de ces quatre années de projet. Cependant, il est indéniable que, prises séparément, l'une ou l'autre de ces deux modalités de culture ont un impact sur la progression des épidémies de pyriculariose. En raison de la grande variabilité des résultats, l'analyse statistique n'a pas permis la mise en évidence d'un facteur particulier expliquant le lien entre pyriculariose et système de culture ou fertilisation mais la dynamique de l'assimilation de l'azote ainsi que la densité du couvert végétal semblent avoir des effets conjoints sur la maladie. Des études plus approfondies portant sur l'équilibre entre tous les éléments minéraux pourraient permettre d'établir un bilan plus pertinent sur le lien entre la teneur en éléments minéraux et taux de maladie.

La répartition des apports d'azote dans le temps (apport fractionné ou non) semble particulièrement intéressante et sera de nouveau étudiée au cours de la cinquième et dernière année de projet.

La lutte contre la pyriculariose est complexe et d'autant plus difficile à mener à Madagascar que de nombreux problèmes écologiques, pédologiques, économiques et culturels se greffent au problème épidémiologique initial. Dans ce contexte, une approche systémique est nécessaire, afin de trouver un compromis intégrant toutes ces contraintes, et permettant de maintenir la maladie à un niveau acceptable n'affectant pas significativement le rendement. La collaboration entre les différents domaines de recherche est nécessaire, ainsi que le développement d'outils transversaux de traitement de données et d'évaluation des systèmes de culture.

VII. REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement ma maîtresse de stage, Mathilde Sester, pour son excellent accueil, ses précieux enseignements et la bonne ambiance qui a régné durant toute la durée de ce stage.

Je remercie également :

Julie, Njaka, Nathalie et toute l'équipe Cirad-FOFIFA, ainsi que toutes les dames qui nous ont aidés à réaliser nos prélèvements, toujours avec le sourire.

Sandrine, Eric et Emilie pour la collaboration fructueuse à distance et l'excellent accueil qu'ils m'ont réservé à Montpellier.

Priscille qui a fait germer ce projet dans ma tête plus d'un an avant mon départ, Claire Neema, chercheuse à Montpellier SupAgro, qui m'a permis de le concrétiser, et mes tuteurs AgroParisTech Lilian Gout et Jean-Denis Faure qui ont pris le relais dans mon encadrement administratif.

Mes fantastiques colocataires de Grandira, tous autant qu'ils sont : Annaïg, Herminie, Emeraude, Leïla, Mélanie, Antoine, Christophe, Lisa, Ségolène, Stéphanie, Cybill et Laurie, sans oublier Viviane notre fée du logis et Vigor notre fidèle compagnon ; et tous les habitués de l'Alliance Française d'Antsirabe : Fred, Annabelle, Solofo, Aina, Damian, Mathilde, JD, Emmelie, Bema, Lucas, Cardo, Ibabely, Laura, Ophélie et Adrien. Merci d'avoir donné une dimension sociale exceptionnelle à mon séjour, que je ne suis pas près d'oublier. Tiako be ianareo !!

Enfin, je tiens à remercier les fidèles lecteurs de mon blog, éparpillés aux quatre coins de la planète, ainsi que ma famille et Thomas pour m'avoir laissée partir si loin pendant ces 6 mois.

VIII. BIBLIOGRAPHIE

Bastiaans L. (1993). Understanding yield reduction in rice due to leaf blast. PhD thesis, University of Wageningen, 127p.

Balbino LC., Brossard M., Leprun JC., Bruand A. (2002). Mise en valeur des Ferralsols de la région du Cerrado (Brésil) et évolution de leurs propriétés physiques : une étude bibliographique. *Étude et Gestion des Sols* 9(2):83-104.

Capillon A., Séguy L. (2002). Ecosystèmes cultivés et stockage du carbone : cas des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale. *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture Française* 88(5):63-70.

Chaudhary RC., Nanda JS., Tran DV. (2003). Guide d'identification des contraintes de terrain à la production de riz. Commission internationale du riz. Conférence de la FAO Rome, 2003.

Dabat MH., Razafimandimby S., Chauvigné V. (2005). La riziculture pluviale dans les systèmes d'exploitation, Hautes Terres et Moyen-Ouest à Madagascar.

Datnoff LE., Elmer WH., Huber DM. (2007). Mineral nutrition and plant disease. APS Press, St. Paul, MN.

Doge E. (2013). Etude statistique de l'effet de différents systèmes de culture sur la pyriculariose du riz pluvial à Madagascar. Rapport de stage Université Toulouse III, 50p.

Dusserre J., Choparta JL., Douzeta JM., Rakotoarisoab J., Scopel E. (2012). Upland rice production under conservation agriculture cropping systems in cold conditions of tropical highlands. *Field Crops Research* 138:33-41.

Dzido JL., Vales M., Rakotoarisoa J., Chabanne A., Ahmadi N. (2004). Upland rice for the highlands: New varieties and sustainable cropping systems to face food security. Promising prospects for the global challenges of rice production the world will face in the coming years? FAO Rice Conference, Rome, 12-13 Feb. 2004.

Ebbole DJ. (2007). Magnaporthe as a Model for Understanding Host-Pathogen Interactions. *Annual Review of Phytopathology* 45:437-456.

Eusoils : Oldeman LR., 1988, ISRIC, Wageningen.

http://eusoils.irc.ec.europa.eu/Esdb_Archive/EuDASM/Africa/lists/cmg.htm

FAO (2011). FAOSTAT

<http://faostat3.fao.org/home/index.html>

Froyd JD., Paget CJ., Guse LR., Dreikorn BA., Pafford JL. (1976). Tricyclazole: A New Systemic Fungicide for Control of *Piricularia oryzae* on Rice. *Phytopathology* 66(9):1135-1139.

- Hashioka Y.** (1965). Effects of environmental factors on development of causal fungus infection, disease development, and epidemiology in rice blast disease. In: International Rice Research Institute: Proceedings symposium on rice blast disease. John Hopkins Press, Baltimore, Maryland, p.153-161
- Howard RJ., Valent B.** (1996). Breaking and entering: Host Penetration by the Fungal Rice Blast Pathogen *Magnaporthe grisea*. *Annual Review of Microbiology* 50:491-512.
- Huot de Longchamp P.** (2009). Etude des facteurs influençant la pyriculariose du riz pluvial d'altitude : cas des Hautes Terres à Madagascar. Rapport de stage AgroParisTech, 54 p.
- Husson O., Michellon R., Charpentier H., Razanamparany C., Moussa N., Naudin K., Razafintsalama H., Rakotoarinivo C., Andrianaivo AP., Séguy L.** (2008). Principes et intérêts du SCV : contrôle des pestes végétales : Le contrôle du striga par les systèmes SCV (Semis direct sur Couverture Végétale permanente). *Manuel pratique du semis direct à Madagascar*, Vol. III, Chapitre 3.
- INSTAT** (Institut National de la Statistique malgache) (2010). Enquête Périodique auprès des Ménages 2010 : rapport principal. Pal Prod, 372 p., Antananarivo, Madagascar.
- IRRI** (International Rice Research Institute). World Rice Statistics Online Query Facility. <http://ricestat.irri.org:8080/wrs2/entrypoint.htm>
- Kato H.** (1974). Epidemiological aspect of sporulation by blast fungus on rice plants. Japan agricultural research quarterly, Tropical Agriculture Research Center, Ministry of Agriculture and Forestry, 8(1):19-22.
- Kim YS., Baik JM., Kim EN., Kim KD.** (2004). Sectors from *Pyricularia grisea* isolates on Edifenphos and Iprobenfos-Amended media. *Plant Pathol. J.* 20(4):244-246.
- Kim YS., Oh JY., Hwang BK., Kim KD.** (2008). Variation in sensitivity of *Magnaporthe oryzae* isolates from Korea to edifenphos and iprobenfos. *Crop Protection* 27:1464–1470.
- Kürschner E., Bonman JM., Garrity DP., Tamisin MM., Pabale D., Estrada BA.** (1992). Effects of nitrogen timing and split application on blast disease in upland rice. *Plant Dis.* 76:384-389.
- Lee K., Singh P., Chung WC., Ash J., Kim TS., Hang L., Park S.** (2006). Light regulation of asexual development in the rice blast fungus, *Magnaporthe oryzae*. *Fungal Genetics and Biology* 43:694-706.
- Long DH., Lee FN. and Te Beest DO.** (2000). Effect of nitrogen fertilization on disease progress of rice blast on susceptible and resistant cultivars. *Plant Dis.* 84:403-409.
- Maekawa K., Watanabe K., Kanto T., Aino M., Iwamoto Y.** (2002). Accumulation of silicon around penetration sites of *Magnaporthe grisea* and silicon-dependent promotion of superoxide generation after inoculation on rice leaf. In: Second silicon in Agriculture Conference (p.34-38). T. Match, ed. Press-Net, Kyoto, Japan.

Moreau D. (1987). L'analyse de l'élaboration du rendement du riz : les outils de diagnostic. GRET (Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques).

Notteghem JL. (1977). Field evaluation of horizontal resistance to rice blast disease. *Agron. Trop.*, 34 (2):180–192.

Olofintoye JA., Ajayi AS. (1996). Rainfed rice (*oryza sativa*) response to soil moisture conservation - Practices in rainfed rice ecosystem in the guinea savanna zone of Nigeria. *Biocommerce Research Communication* Vol. 8 N°1.

Osuna-Canizalez FJ., De Datta SK., Bonman JM. (1991). Nitrogen form and silicon nutrition effects on resistance to blast disease of rice. *Plant and Soil* 135:223-231.

Ou SH. (1985). Rice Disease, 2nd ed.. Commonwealth Mycological Institute, CAB International, Kew, UK.

Pande HK., Tran DV., That TT. (1997). Systèmes améliorés de riziculture pluviale. Rapport pour la FAO, Rome, Italie.

Penot E., Tokarski Y., Rakotofiringa A., Bodoy A., Ahmim Richard A., Dabat MH., Rahahison Tahina, Rakoto Harivony Andry, Razafimandimby S. (2009). Rôle et place du riz pluvial dans les exploitations du Vakinankaratra (Hauts Plateaux et Moyen Ouest). Atelier national sur la recherche et le développement du riz pluvial à Madagascar, Antsirabe, Madagascar.

PRDR (2007). Programme Régional de Développement Rural GTDR Vakinankaratra 2007. www.agriculture.gov.mg/archives/pdf/PRDR_vakinankaratra.pdf

Rabeharisoa L., Morel C., Fardeau JC. (2005). Evaluation, by coupling sorption and isotopic labelling and isotopic dilution methods, of the bioavailability of phosphorus. *In* : "tanety" soils of Madagascar. FAO/IAEA Technical Meeting - Combating Soil Degradation to Enhance Food Security in Africa: The Role of Nuclear Techniques in Developing Improved Soil, Water and Nutrient Management Practices - Nairobi, Kenya.

Raboin LM., Ramanantsoanirina A., Dusserre J., Razasolofonahary F., Tharreau D., Lannou C., Sester M. (2012). Two-component cultivar mixtures reduce rice blast epidemics in an upland agrosystem. *Plant Pathology* 61:1103–1111.

Rakotoarisoa A. (2006). Effet du système de culture, de la date de semis et du mode d'apport en azote sur la pyriculariose du riz pluvial. Master thesis, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure des Sciences agronomiques, Tananarive, Madagascar.

Rakotoarisoa J., Oliver R., Dusserre J., Muller B., Douzet JM., Michellon R., Moussa N., Razafinjara L. A., Rajeriarison C., Scopel E. (2010). Bilan de l'azote minéral au cours du cycle du riz pluvial sous systèmes de culture en semis direct sous couverture végétale en sol ferrallitique argileux à Madagascar. *Etude et Gestion des Sols* 17, 2:169-186.

Rakotofiringa A., Tokarski Y. (2007). Le riz pluvial : quelle opportunité pour les paysans d'une zone péri-urbaine des hauts plateaux de Madagascar ? Exemple de la commune d'Andranomanelatra. Rapport de stage IRC Montpellier SupAgro, 24p.

Randriamanantsoa R., Quaranta B., Aberlenc HP., Rafamatanantsoa E., Naudin K., Ratnadass A., Vercambre B. (2012). Diversité et gestion des vers blancs (Coléoptères, scarabaeoidea) en riziculture pluviale sur les hautes terres malgaches. Bulletin de l'Académie malgache, tome XC/1, janvier-juin 2011.

Ribot C., Hirsch J., Balzergue S., Tharreau D., Nottéghem JL., Lebrun MH., Morel JB. (2008). Susceptibility of rice to the blast fungus, *Magnaporthe grisea*. *Plant Physiol.* 165(1):114-24.

Scopel E., Triomphe B., Affholder F., Macena Da Silva FA., Corbeels M., Valadares Xavier JH., Lahmar R., Recous S., Bernoux M., Blanchart E., De Carvalho Mendes L., De Tourdonnet S. (2013). Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts : a review. *Agronomy for sustainable development* 33(1):113-130.

Seebold KW., Datnoff LE., Correa-Victoria FJ., Kucharek TA., Snyder GH. (2000). Effect of silicon rate and host resistance on blast, scald, and yield of upland rice. *Plant Dis.* 84:871-876.

Seebold KW., Datnoff LE., Correa-Victoria FJ., Kucharek TA., Snyder GH. (2004). Effects of silicon and fungicides on the control of leaf and neck blast in upland rice. *Plant Dis.* 88:253-258.

Séguy L., Husson O., Charpentier H., Bouzinac S., Michellon R., Chabanne A., Boulakia S., Tivet F., Naudin K., Enjalric F., Ramaroson I., Rakotondramanana M. (2009). Principes et intérêts du semis direct, Volume I. Chapitre 1 : Principes et fonctionnement des écosystèmes cultivés en semis direct sur couverture végétale permanente.

Sekizawa Y., Watanabe T. (1981). On the Mode of Action of Probenazole against Rice Blast. *Journal of Pesticide Science* vol.6 n°2:247-255.

Serghat S., Mouria A., Ouazzani Touhami A., Badoc A., Douira A. (2003). Effet de quelques fongicides sur le développement in vitro de *pyricularia grisea* et *helminthosporium oryza*. *Bull. Soc. Pharm. Bordeaux* 143:7-18.

Sester M., Raboin LM., Ramanantsoanirina A., Tharreau D. (2008). Toward an integrated strategy to limit blast disease in upland rice. *In* : ENDURE International Conference, La Grande Motte, France.

Sester M., Raveloson H., Tharreau D., Dusserre J. (2013). Conservation agriculture cropping system to limit blast disease in upland rainfed rice. *Plant Pathology*. doi: 10.1111/ppa.12099.

Talbot N. (2003). On the trail of a cereal killer: Exploring the Biology of *Magnaporthe grisea*. *Annual Review of Microbiology* 57:177-202.

Vales M., Razafindrakoto J. (1996). Point sur la recherche et le développement de la riziculture d'altitude. Communications présentées par l'Amélioration des Plantes du Programme Riz Altitude du FOFIFA-CIRAD. Atelier international FOFIFA-CIRAD.

Volk RJ., Kahn RP., Weintraud RL. (1958). Silicon content of the rice plant as a factor influencing its resistance to infection by the rice blast fungus, *Pyricularia oryzae*. *Phytopathology* 48:179-184.