

AgroParisTech



Mémoire

présenté par

Léa LUGASSY

Master Sciences et Technologies du Vivant et de l'Environnement
Mention ERM
Spécialité « De l'Agronomie à l'Agroécologie »

Lien entre système de culture et résistance à la pyriculariose chez le riz pluvial d'altitude des Hautes-Terres de Madagascar

Pour l'obtention du diplôme de Master Sciences et Technologies du Vivant et de
l'Environnement

Maître de stage : Julie DUSSERRE
Enseignant responsable du stage : Marie-Odile BANCAL

Engagement de non plagiat

① Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive. Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

② Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sur d'en citer la source.

③ Sanction

En cas de manquement à ces consignes, le département SIAFEE se réserve le droit d'exiger la réécriture du document, dans ce cas la validation de l'Unité d'Enseignement ou du diplôme de fin d'études sera suspendue.

④ Engagement

Je soussigné (e) Léa Lugassy

Reconnait avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A _____ le _____
Signature :

Cet engagement de non plagiat doit être inséré en début de tous les rapports, dossiers, mémoires.

Remerciements

Je remercie tout d'abord Julie Dusserre ainsi que Mathilde Sester de m'avoir encadrée tout au long de ce stage. Elles ont toujours été disponibles et ont pris le temps de répondre à mes questions avec beaucoup de gentillesse. Je leur suis également reconnaissante d'avoir accepté que je termine mon stage au Cirad de Montpellier sous la vigilance d'Eric Gozé dont l'aide statistique m'a été très précieuse. Sans son aide, je n'aurais pas pu faire un travail aussi abouti, et je l'en remercie profondément.

Je salue toutes les personnes que j'ai côtoyées pendant ce stage : Roger Michellon pour son accueil chaleureux à mon arrivée à Madagascar ainsi que tous les membres du Cirad, Lalaina ma binôme, les membres de la Fofifa que j'ai eu grand plaisir à rencontrer, ainsi que toutes les dames qui ont travaillé à nos coté pendant ces longues heures de terrain. Leur gentillesse et leur sourire ont rendu ces moments sous le soleil brûlant presque agréables.

Je remercie également ma tutrice Marie-Odile Bancal qui a été d'un grand soutien, depuis Paris, et qui par ses conseils et ses remarques éclairées m'a aidé dans la rédaction de ce rapport.

Enfin, je remercie dans le désordre Fred pour m'avoir si gentiment prêté sa maison, Héloïse pour tous les bons moments et pour m'avoir fait découvrir Lalassou, Lalassou pour avoir transfiguré ma garde-robe, Philippe pour sa bonne humeur et ses délicieuses Cristal et les Mpamanga pour leur musique. Cette expérience malgache n'aurait pas été la même sans eux. Et *last but not least*, Etienne, Quentin et toute ma famille pour m'avoir soutenue à distance pendant ces quatre mois au bout du monde.

Sommaire

Résumé/Abstract	1
Introduction	3
1. Généralités	5
1.1 La culture du riz pluvial à Madagascar.....	5
1.2 La pyriculariose du riz.....	5
1.2.1 Cycle infectieux de <i>Magnaporthe oryzae</i>	5
1.2.2 Symptômes de la maladie.....	5
1.2.3 Méthodes de lutte contre la pyriculariose.....	7
1.3 Système de culture et pyriculariose.....	7
1.3.1 Pyriculariose et azote.....	7
1.3.2 Pyriculariose et mode de gestion du sol.....	9
1.4 Problématique.....	9
2. Matériel et méthode	11
2.1 Dispositifs expérimentaux.....	11
2.1.1 Site expérimental d'Andranomanelatra.....	11
2.1.2 Site expérimental d'Ivory.....	13
2.2 Suivi de la croissance des plantes.....	15
2.3 Suivi du statut azoté des cultures.....	15
2.3.1 Le SPAD.....	15
2.3.2 Le Dualex.....	17
2.3.3 Dosage chimique.....	17
2.4 Suivis épidémiologiques.....	19
2.5 Composantes du rendement.....	19
2.6 Traitement des données et analyse statistique.....	21
2.6.1 Traitement des données de pyriculariose foliaire.....	21
2.6.2 Traitement des données de pyriculariose paniculaire.....	21
2.6.3 Analyse statistique.....	21
3. Résultats	23
3.1 Effet du système de culture sur la sévérité de la pyriculariose.....	23
3.1.1 Pyriculariose foliaire.....	23
3.1.2 Pyriculariose paniculaire.....	23
3.2 Effet du statut azoté et de la densité du couvert végétal sur la sévérité de la pyriculariose.....	25
3.2.1 Pyriculariose foliaire.....	27
3.2.2 Pyriculariose paniculaire.....	29
3.3 Effet du système de culture sur le rendement.....	31
3.3.1 Andranomanelatra.....	31
3.3.2 Ivory.....	31
3.4 Lien entre la sévérité de la pyriculariose paniculaire et le pourcentage de grains vides.....	33
4. Conclusion et discussion	35
Références bibliographiques.....	38
Annexes.....	40

Résumé

La pyriculariose du riz est une maladie fongique qui peut entraîner des pertes de rendement très importantes, particulièrement en riziculture pluviale d'altitude.

Dans le cadre du projet « Gestion Agronomique de la Résistance à la Pyriculariose du riz » mené par le Cirad, j'ai étudié sur les Hautes-Terres de Madagascar le lien entre le système de culture, la sévérité de la pyriculariose, et les rendements obtenus pour différentes variétés de riz pluvial d'altitude, à l'aide d'une expérimentation factorielle dans deux sites contrastés.

Nous avons montré que le mode de gestion du sol et la fertilisation azotée peuvent avoir un effet significatif sur la sévérité de la pyriculariose, et que ces effets s'expliquent dans la majorité des cas par une modification de la densité du couvert (que nous estimons par le Leaf Area Index) et/ou de la teneur en azote des feuilles. Néanmoins, dans un des cas que nous avons rencontré, l'effet du mode de gestion du sol n'a pas été expliqué, renforçant l'hypothèse que dans certaines conditions, le système sous couverture végétale (SCV) peut influencer sur la sévérité de la maladie autrement que par la simple modification de la croissance des plantes.

L'effet du système de culture sur le rendement a été différent selon le site expérimental et selon les variétés étudiées, mais nous pouvons néanmoins dire de manière schématique que les rendements ont été généralement plus élevés en labour qu'en SCV sur le site d'Andranomanelatra, tandis qu'à Ivory, les rendements obtenus en labour n'ont été supérieurs à ceux obtenus en SCV qu'en l'absence de fertilisation minérale azotée. Ce constat est principalement dû au fait que les conditions climatiques à Andranomanelatra sont défavorables aux SCV, tandis qu'à Ivory le riz cultivé en SCV sans azote minérale a rencontré des problèmes de croissance importants. Nous retenons néanmoins qu'à Ivory, les rendements pour les fertilisations azotées moyenne et haute ont été similaires pour les deux modes de gestion du sol, ce qui est un résultat encourageant pour les chercheurs travaillant sur les SCV.

Abstract

Rice blast is a fungal disease that can lead to important yield losses, especially in upland rainfed rice in a factorial experiment carried out in two contrasted sites.

In the framework of the project « Agronomical Management of the Resistance to Blast disease in rice » lead by the Cirad, I have studied in the Highlands of Madagascar the link between cropping system, severity of blast disease, and yields obtained for different varieties of upland rainfed rice.

We showed that soil management (conventional tillage vs. no tillage) as well as nitrogen fertilization had a significant effect on the severity of blast disease, and that these effects are mostly due to a modification of the density of the plant canopy (estimated by the Leaf Area Index) and/or of the nitrogen concentration in rice leaves. However, in one of the cases we encountered, the effect of soil management could not be explained by any of these variables, reinforcing the hypothesis that under certain conditions, no-till can influence the severity of the disease by other means than the modification of the plants' growth.

The effect of the cropping system on yield was different depending on the experimental site and the variety, but our data indicated that yields were generally higher with tillage than with no-till in Andranomanelatra, while in Ivory, yields obtained with tillage were higher only when no nitrogen fertilizer was applied. Low yields in no-till in Andranomanelatra were induced by unfavorable climatic conditions, while in Ivory, no-till rice cultivated without any nitrogen fertilization faced important growth problems. However, in Ivory, yields were similar for tillage and no-tillage cropping systems for the intermediate and high nitrogen fertilizations, which is an encouraging result for scientists working on no-till cropping systems.

Introduction

La pyriculariose est l'une des principales maladies du riz. Causée par le champignon *Magnaporthe oryzae*, cette maladie peut engendrer des pertes de rendement considérables allant jusqu'à 100% dans certains cas (FAO).

De nombreuses études ont montré que le système de culture influence la sévérité de la pyriculariose. Ainsi, nous savons que la quantité d'engrais azoté apportée aux cultures, ainsi que la temporalité des apports, jouent directement sur la sévérité de la maladie (Kürschner et al., 1992 ; Long et al., 2000). Par ailleurs, la maladie semble faire moins de dégâts en riziculture inondée qu'en riziculture pluviale, en partie parce que le riz cultivé sans irrigation est fragilisé par le stress hydrique, et dans le cas du riz pluvial d'altitude, par le froid (Seebold et al., 2000).

Sur les Hautes-Terres de Madagascar, la riziculture pluviale d'altitude est en plein essor depuis la création au milieu des années 1980 de variétés tolérantes au froid. Dans ce système, le mode de gestion du sol pourrait moduler la sévérité de la pyriculariose. Ainsi, Sester et al., (2008) ont montré que le riz cultivé en semis direct sous couvert végétal (SCV) serait moins atteint par la maladie que le riz cultivé sur des terres labourées.

Mon stage s'inscrit dans le projet « Gestion Agronomique de la Résistance à la Pyriculariose du Riz » (GARP), qui vise d'une part à identifier les conditions de culture liées à la fertilisation azotée et au mode de gestion du sol permettant au riz pluvial de résister au mieux à la maladie, et d'autre part à mieux comprendre les mécanismes qui relient le système de culture et la tolérance à la pyriculariose. Dans la région du Vakinankaratra, sur les Hautes-Terres de Madagascar, deux essais expérimentaux ont été mis en place en 2009 par le Cirad dans le cadre du projet GARP. Dans ces essais, nous faisons varier le mode de gestion du sol ainsi que la fertilisation azotée et la variété cultivée. L'objectif de mon stage était de récolter sur ces essais les données relatives aux statuts azoté et épidémiologique du riz ainsi qu'au développement du couvert végétal, puis d'analyser statistiquement ces données afin de déterminer si le mode de gestion du sol et la fertilisation azotée ont une influence sur la sévérité de la pyriculariose et sur les rendements obtenus.

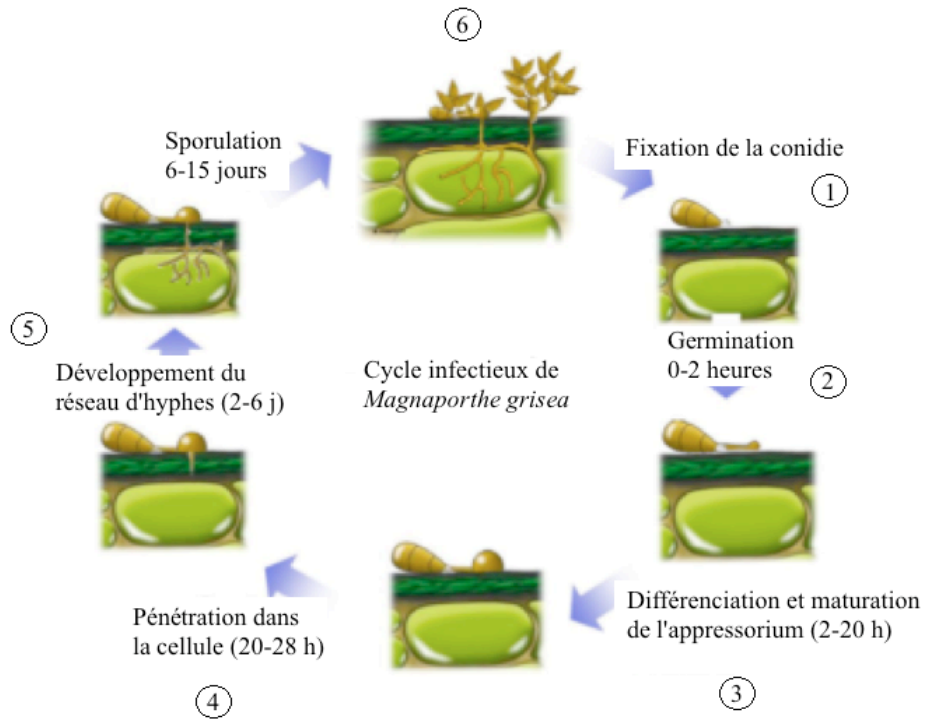


Figure 1 : Cycle infectieux de *Magnaporthe grisea*
 Source : Ribot et al., 2008



Figure 2 : Lésions de pyriculariose foliaire
 Source : Cliché JL Dzido

1 Généralités

1.1 La culture du riz pluvial à Madagascar

La surface cultivée en riz à Madagascar est estimée à 1 212 000 ha (FAO, 2005). Selon la même source, 10% de cette surface sont cultivés en riz pluvial. Le riz pluvial est presque exclusivement cultivé en labour (à la bêche ou à la charrue), sur les versants des collines qui ne sont pas aménageables en terrasse (*tanety*).

La culture du riz pluvial a lieu pendant la saison des pluies qui dure à Madagascar d'Octobre à Avril. La durée du cycle de développement du riz dépend beaucoup de la variété cultivée ainsi que des conditions climatiques (température, pluviométrie, ensoleillement principalement). Le cycle du riz pluvial n'est pas différent de celui du riz irrigué, on y retrouve les trois phases présentes dans le cycle de toute céréale (Combe et al., 1994) :

- 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 se détermine, 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 reproductive débute à l'initiation paniculaire et prend fin à l'épiaison-floraison. Au cours de cette phase s'élabore le nombre d'épillets par panicule, puis, peu avant la floraison, le pourcentage d'épillets fertiles et le poids d'un grain. Pendant cette phase la plante est très sensible au stress hydrique et au froid.

- La phase de maturation correspond à la période de remplissage des grains. C'est pendant cette phase que se poursuit l'élaboration du poids d'un grain et que se détermine le pourcentage de grains remplis.

1.2 La pyriculariose du riz

1.2.1 Cycle infectieux de *Magnaporthe oryzae*

Le cycle infectieux (Fig. 1) débute par la fixation (étape 1 du cycle) d'une spore asexuée de *M.oryzae*, transportée par une goutte ou par le vent, sur le plant de riz. Si les conditions climatiques le permettent ($HR \geq 90\%$, $18^{\circ}C \leq T^{\circ}C \leq 20^{\circ}C$) et s'il y a présence d'une goutte d'eau, la germination (2) se produit. Lors de cette étape, la spore asexuée appelée « conidie » produit un tube qui forme alors une nouvelle cellule, l'appressorium (3). L'appressorium 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, ce qui aboutit à la création d'un réseau d'hyphes (5) se nourrissant des éléments nutritifs présents dans la cellule et affectant la photosynthèse. Ces hyphes peuvent infecter les cellules voisines en passant par les jonctions cellulaires (plasmodesmes). Se développent également des hyphes aériens, au bout desquels sont situés des conidiophores qui portent chacun 3 à 5 conidies (6). La dispersion de ces spores se fait la nuit et nécessite une hygrométrie importante pour détacher les conidies des conidiophores. L'étendue de la dispersion est dépendante de la vitesse et de la direction du vent.

1.2.2 Symptômes de la maladie

La pyriculariose peut atteindre plusieurs organes du riz : la feuille, la ligule, la tige, le cou, la panicule, les racines, les tissus conducteurs (Ribot et al., 2008) et même les grains après récolte.

Pyriculariose foliaire : La figure 2 montre les lésions causées par la pyriculariose foliaire. La photosynthèse et la respiration sont affectées par la maladie. En effet, la surface disponible pour la photosynthèse est réduite par la présence de zones lésées.

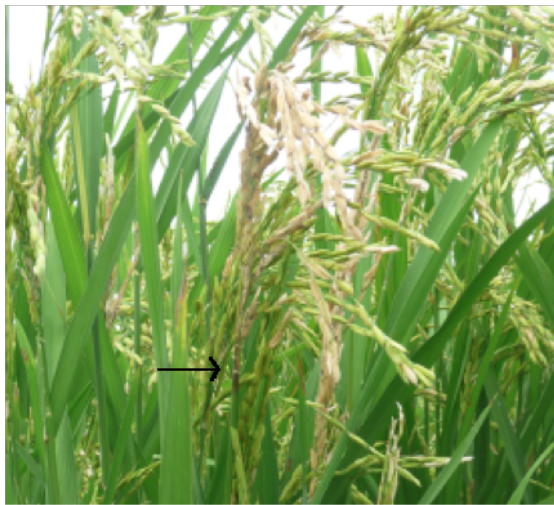


Figure 3 : Pyriculariose du cou.
On distingue clairement la nécrose du cou, indiquée par la flèche
Source : M. Sester, 2012

Plus les feuilles malades sont situées sur le haut de la plante, plus la capacité de photosynthèse est affectée. La pyriculariose foliaire constitue un foyer d'infection pour la pyriculariose paniculaire.

Pyriculariose paniculaire : A partir de la floraison, des lésions peuvent apparaître au niveau du cou (base de la feuille paniculaire, Fig. 3), du rachis, ou des nœuds inférieurs de la tige paniculaire. La nécrose des tissus infectés empêche le flux de sève vers la panicule, et par conséquent le remplissage des grains. Si l'attaque de pyriculariose est précoce, le pourcentage de grains pleins sera affecté. Si l'attaque est tardive, c'est le poids des grains qui sera diminué par la maladie. Les conséquences sur le rendement seront également différentes selon que les tiges paniculaires principales ou les tiges secondaires sont les plus touchées.

1.2.3 Méthodes de lutte contre la pyriculariose

Différentes stratégies peuvent être mises en place pour lutter contre la pyriculariose. Certaines variétés de riz résistantes à la maladie ont été développées et peuvent être utilisées. Cependant, la capacité de mutation de *M.oryzae* lui permet de contourner très rapidement les résistances (Seebold et al., 2004), limitant par conséquent la durée de vie de ces variétés par ailleurs difficiles et coûteuses à créer. L'utilisation de mélanges variétaux peut également s'avérer efficace pour contrôler la maladie (Zhu et al., 2000, Raboin et al., 2012) et pourrait être un moyen de prolonger la durée de vie des variétés. Le décalage de la date de semis, la gestion de la fertilisation azotée (premier apport plus tardif) ou l'apport de silice (Osuna-Canizalez et al., 1991, Datnoff et al., 1997, Seebold et al., 2000 et 2004) peuvent également contribuer à améliorer la tolérance de la plante. L'emploi de fongicides, au-delà des problèmes sanitaires et environnementaux qu'il peut engendrer, n'est pas envisageable à Madagascar pour des raisons économiques. En outre, il a été montré que *M.oryzae* est capable de développer des résistances à un ou plusieurs fongicides utilisés contre lui (Kim et al., 2008).

1.3 Système de culture et pyriculariose

A Madagascar, le riz pluvial d'altitude est très touché par la pyriculariose, et ce pour deux raisons principales. D'une part, les variétés de riz pluvial d'altitude cultivées sur les Hautes-Terres sont dans leur très grande majorité sensibles à la maladie car elles sont issues de parents provenant d'une population locale « Latsika », tolérante au froid mais très sensible à la pyriculariose. D'autre part, le riz doit faire face au froid qui règne à haute altitude et qui le rend plus vulnérable aux attaques de *M.oryzae* (Hashioka, 1965; Seebold et al., 2000) ainsi qu'au stress hydrique, problème courant en riziculture pluviale.

1.3.1 Pyriculariose et azote

La fertilisation azotée influe sur la sévérité de la pyriculariose. L'azote minéral, lorsqu'il est apporté à la plante en quantité trop importante, accroît la sensibilité de la plante (Kürschner et al., 1992). D'autre part, il a été démontré qu'un seul apport d'azote minéral en début de cycle entraîne des dégâts de pyriculariose foliaire plus importants que lorsque l'apport est fractionné et apporté à différentes dates (Long et al., 2000), suggérant une interaction entre la dynamique de l'azote dans la plante et l'expression de la résistance à la maladie. Enfin, 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 la forme nitrique (ce qui est le cas lorsque le riz est cultivé en milieu aérobie), le riz est significativement plus attaqué que lorsqu'il est disponible sous la forme ammoniacale (que l'on rencontre en riziculture inondée). Cela peut être l'une des raisons pour lesquelles le riz pluvial est plus attaqué par la pyriculariose que le riz inondé (Osuna-Canizalez et al., 1991).

1.3.2 Pyriculariose et mode de gestion du sol

Sur les Hautes Terres de Madagascar, les SCV ont été beaucoup étudiés afin de tester leur capacité à limiter l'érosion et à améliorer la durabilité des systèmes pluviaux. Ces systèmes sont caractérisés par l'arrêt du labour et par la couverture permanente du sol avec des végétaux (morts ou vivants) en plus de la culture d'intérêt. Au cours de certains de ces essais, il a été observé que la pyriculariose semblait être moins présente sur les parcelles de riz pluvial conduites en SCV (Sester et al., 2008 et 2010) que sur celles conduites en labour. Plusieurs hypothèses non-exclusives ont été avancées pour expliquer cela :

- La présence de la couverture végétale composée des résidus de culture, en réduisant l'évapotranspiration par rapport à un système labouré, permettrait au riz de ne pas souffrir de stress hydrique, problème récurrent en riziculture pluviale, et donc de mieux se défendre contre le pathogène.

- 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 de cycle par rapport aux pics de pression de maladie.

- 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.

L'étude d'un éventuel antagonisme entre le métabolisme de l'azote et l'expression de la résistance à la pyriculariose dans différents systèmes de culture est un pan important du projet GARP et est menée par d'autres équipes.

1.4 Problématique

Les questions auxquelles nous tenterons de répondre ici sont les suivantes :

- Le mode de gestion du sol et la fertilisation azotée ont-ils un effet sur la sévérité de la pyriculariose ?
- Si oui, comment expliquer ces effets ?
- Peut-on relier le statut azoté du riz et la sévérité de la pyriculariose ?
- Les éventuelles différences d'atteinte par la pyriculariose suivant le mode de gestion du sol et la fertilisation azotée se retrouvent-elles dans le rendement ?

Conditions climatiques à Andranomanelatra

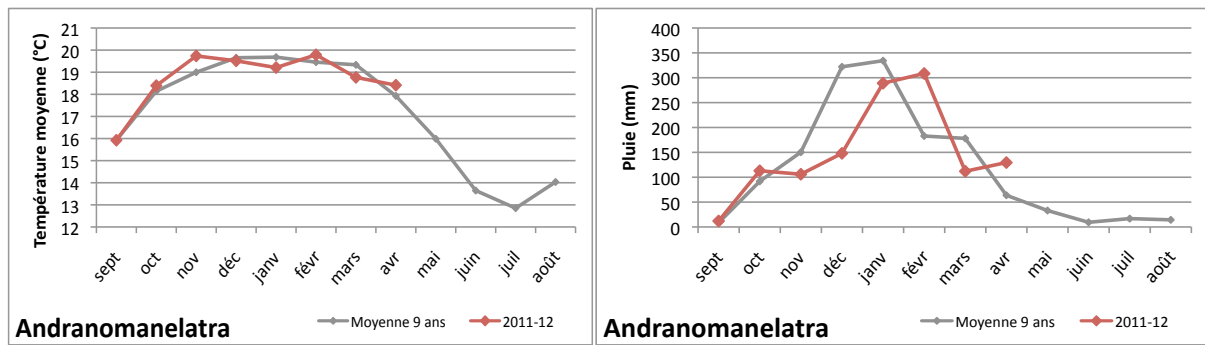


Figure 4 : Graphe des températures (gauche) et de la pluviométrie (droite) à Andranomanelatra

2 Matériel et méthode

2.1 Dispositifs expérimentaux

Les sites expérimentaux au sein desquels est mené le projet GARP sont situés sur les Hautes-Terres de Madagascar, dans la région du Vakinankaratra (Annexe 1).

Deux sites aux conditions contrastées ont été choisis, le premier situé à 17 kilomètres au nord d'Antsirabe (Andranomanelatra), le deuxième situé à 90 kilomètres à l'ouest d'Antsirabe dans la région du Moyen Ouest (Ivory). Sur ces deux sites, le dispositif expérimental est un dispositif factoriel en bloc (Annexe 2). Chaque site est constitué de quatre répétitions formées par des parcelles élémentaires dont la surface est de 42 m² (6 x 7 m). Les trois facteurs étudiés sont :

- **le mode de gestion du sol** : labour vs. semis direct sous couvert végétal (SCV). Comme nous le détaillerons dans le chapitre suivant, la rotation diffère également entre le labour et le SCV, néanmoins dans un souci de simplification, nous appellerons par la suite ce facteur « mode de gestion du sol ». La rotation est adaptée en fonction du site expérimental et n'est donc pas la même pour les deux sites.
- **la fertilisation azotée** : une fumure de base sans azote minéral, une fertilisation azotée intermédiaire, et une fertilisation forte. Les modalités exactes de fertilisation seront détaillées plus bas.
- **la variété** : très sensible, moyennement sensible et tolérante ou résistante à la pyriculariose.

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

Les modalités de fertilisation ne sont pas les mêmes sur les deux sites. En effet, les sols d'Andranomanelatra étant moins pauvres que ceux d'Ivory, il a été décidé d'augmenter les doses d'urée pour que la différence entre les modalités basse et haute puisse être suffisante.

Trois variétés de riz sont semées dans chacun des sites. La variété tolérante ou résistante est utilisée comme témoin afin de voir quels sont les rendements obtenus pour une variété qui n'est pas (ou extrêmement peu) touchée par la pyriculariose mais qui subit néanmoins les mêmes conditions que les deux autres variétés (vent, oiseaux, vers blancs, cyclone etc...). 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 en principe similaires.

2.1.1 Site expérimental d'Andranomanelatra

Le site expérimental d'Andranomanelatra est situé au nord d'Antsirabe, à 1590 m d'altitude, dans une zone où la pression de pyriculariose est importante. Les relevés de température et de pluviométrie fournis par la station météorologique automatique CIMEL sont présentés dans la figure 5.

Les semis ont été réalisés les 7, 8 et 9 novembre 2011 après trouaison à la bêche (*angady*), à raison de 5 à 7 graines par poquet. Un écart de 20 cm est respecté entre chaque poquet d'une même ligne. Les lignes sont séparées par un écart de 30 cm.

Les modes de gestion du sol et les rotations sont :

- labour après maïs+soja sur labour
- SCV sur résidus de maïs et soja après maïs+soja avec culture en dérobée d'avoine et de vesce velue

Conditions climatiques à Ivory

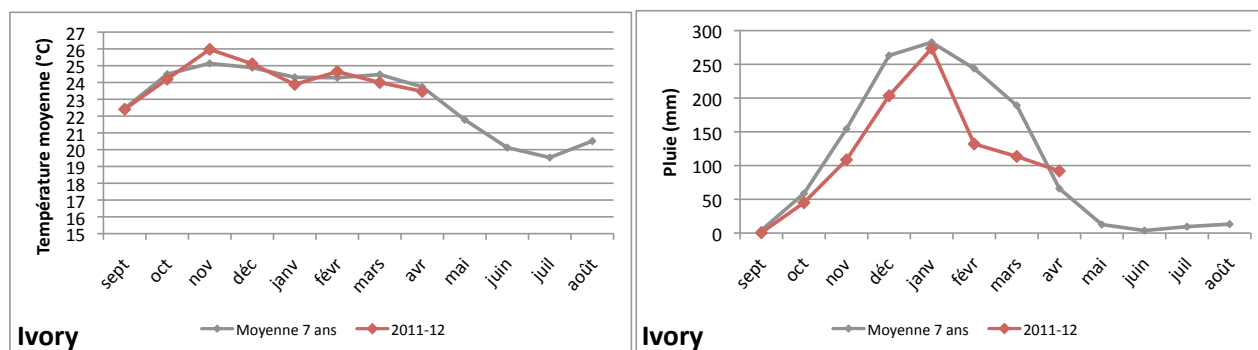


Figure 5 : Graphe des températures (gauche) et de la pluviométrie (droite) à Ivory

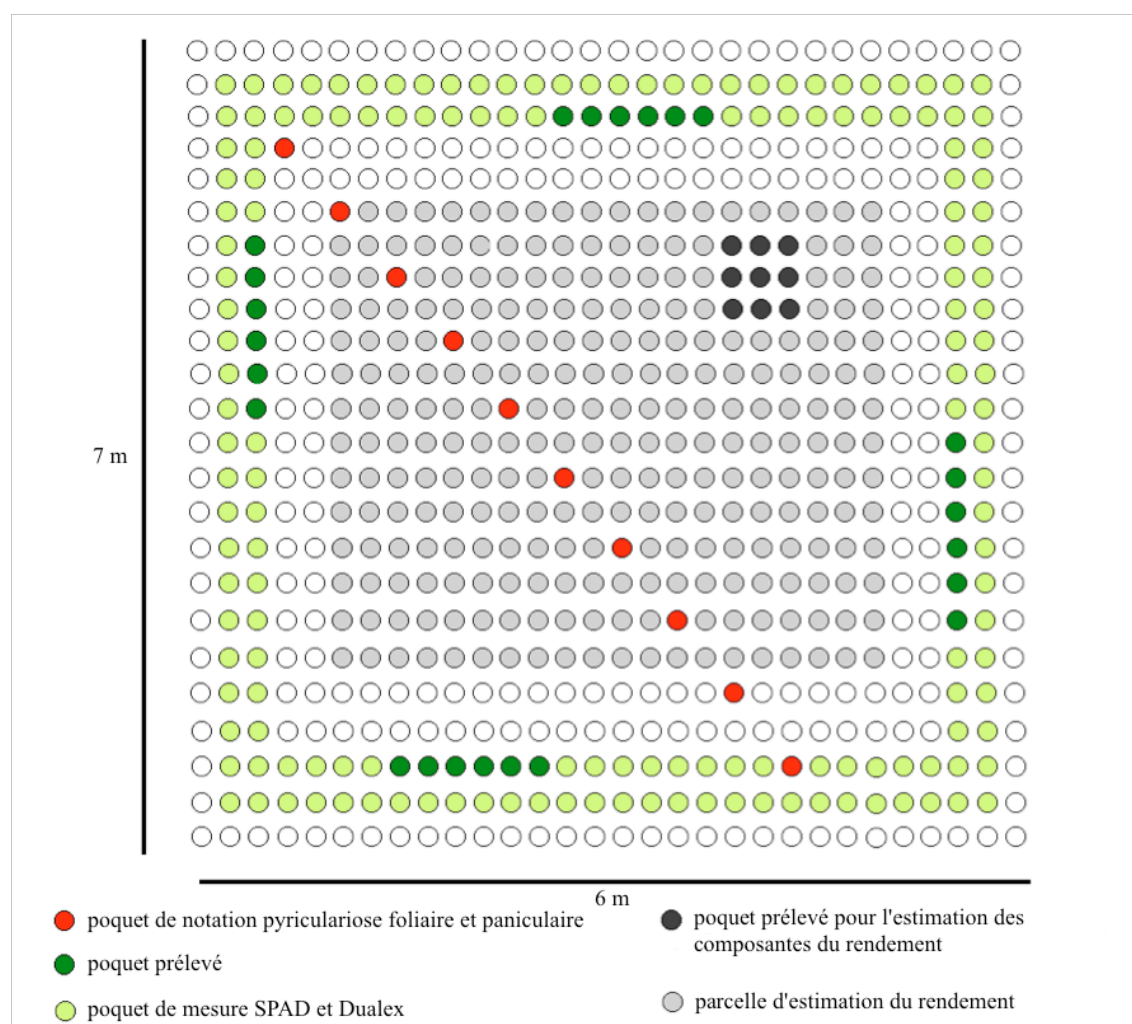


Figure 6 : Schéma d'une parcelle expérimentale

Les variétés semées sont :

- F154, très sensible (V1)
- F161, moyennement sensible (V2)
- F172, résistante (V3)

Les modalités de fertilisation sont :

- F1 : fumure de base constituée de 5t/ha de fumier de bovin, 500 kg/ha de dolomie (36% CaO + 16 % MgO), 150kg/ha de superphosphate triple (42% P₂O₅ et 40% CaO) et 80 kg/ha KCl.
- F2 : F1 + 30 N au semis (S) + 23 N à 30 JAS + 23 N à 60 JAS
- Fv : F1 + 60 N au semis (S) + 46 N à 30 JAS + 46 N à 60 JAS

Pour les modalités de fertilisation F2 et Fv, l'azote minéral est apporté sous forme d'urée (46% d'azote).

Un traitement insecticide préventif contre les vers blancs a été effectué avant le semis avec 400 g/ha de diméthoate (le 13 octobre 2011). Les semences ont été traitées contre les insectes avec 0,93 g d'imidachlopride + 0,27g de thirame par kg de semences. Un traitement herbicide a été effectué après le semis le 17 novembre 2011 avec 1500 g/ha de pendiméthaline. Des traitements insecticides ont été réalisés avec 500 g/ha de carbosulfan le 9 décembre 2011, et avec 60 g/ha de cyperméthrine + 600g/ha de chlorpyrifos-éthyl les 22 décembre 2011, 19, 26 et 30 janvier 2012.

Des désherbages manuels réguliers ont été réalisés, en particulier en décembre 2011 et janvier 2012.

2.1.2 Site expérimental d'Ivory

Le site est localisé dans une région où les conditions climatiques (Fig. 7) permettent une bonne performance des SCV, notamment grâce à une forte production de biomasse.

Les semis ont été réalisés les 28, 29, 30 novembre et le 1^{er} décembre 2011 selon la même procédure qu'à Andranomanelatra (cf. 2.1.1).

Les modes de gestion du sol et les rotations sont :

- labour après soja sur labour
- SCV sur résidus de maïs+soja+éleusine+*Cajanus cajan*

Les variétés semées sont :

- F154, très sensible (V1)
- B22, moyennement sensible (V2)
- Nerica4, tolérante (V3)

Les modalités de fertilisation sont :

- F1 : fumure de base constituée de 5t/ha de fumier de bovin, 150 kg/ha de superphosphate triple (42% P₂O₅ + 40% CaO) et 80 kg/ha de KCl
- F2 : F1 + 30 N au semis (S) + 15 N à 30 JAS + 15 N à 60 JAS
- Fv : F1 + 60 N au semis (S) + 30 N à 30 JAS + 30 N à 60 JAS

Pour les modalités de fertilisation F2 et Fv, l'azote minéral est apporté sous forme d'urée (46% d'azote).

Un traitement préventif contre les vers blancs avec 400g/ha de diméthoate a été réalisé avant le semis, le 8 octobre 2011. Les semences ont été traitées contre les insectes avec 0,93 g d'imidachlopride + 0,27g de thirame par kg de semences. Un traitement herbicide avec 1500 g/ha de pendiméthaline a été effectué en pré-levée, juste après le semis (le 2 décembre 2011). Enfin, des traitements insecticides contre les vers blancs ont été réalisés avec 60 g/ha de cyperméthrine + 600g/ha de chlorpyrifos-éthyl le 23 décembre 2011 et le 27 janvier 2012, ainsi qu'avec 500 g/ha de carbosulfan le 11 janvier 2012.

Des désherbages manuels réguliers ont été effectués, en particulier en décembre 2011 et janvier 2012.

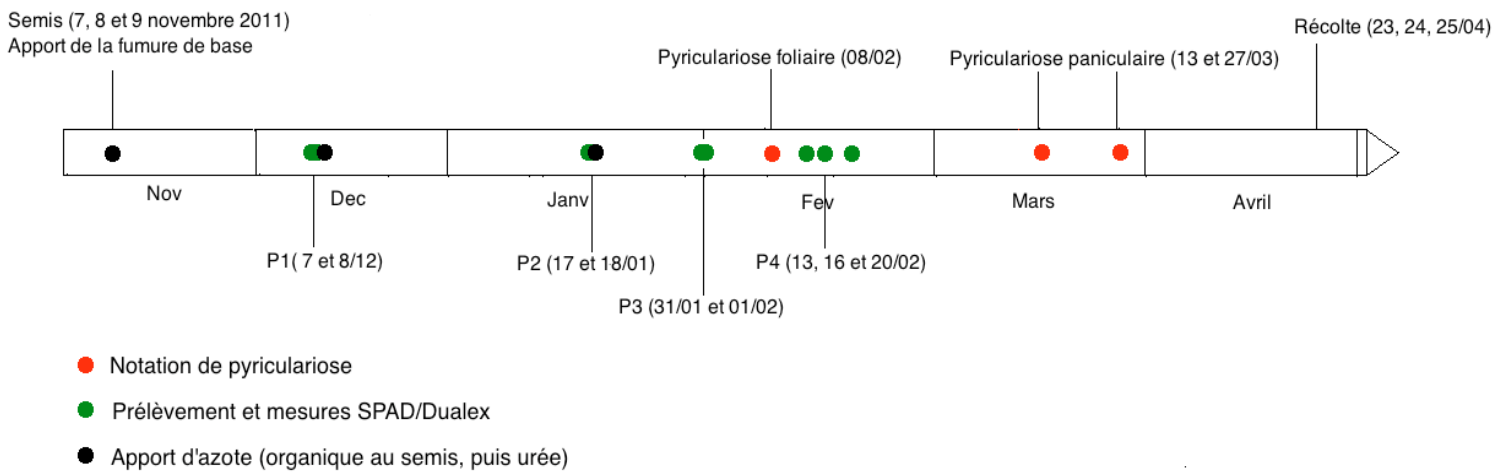


Figure 7: Chronologie de la campagne 2011/2012 pour le site d'Andranomanelatra

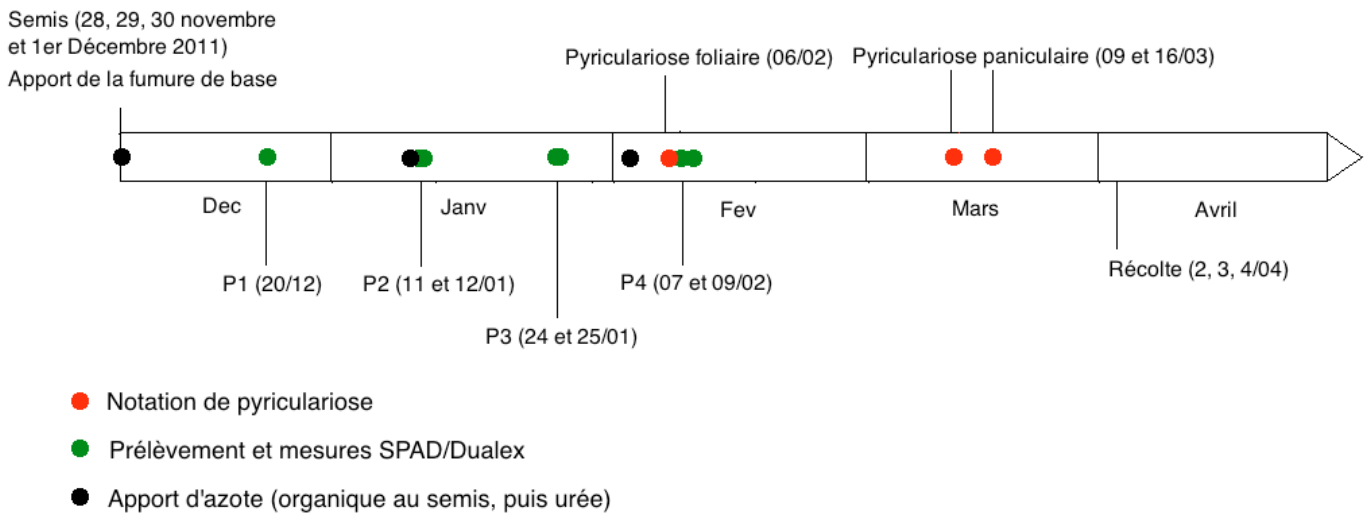


Figure 8: Chronologie de la campagne 2011/2012 pour le site d'Ivory

2.2 Suivi de la croissance des plantes

La croissance des plants de riz est évaluée quatre fois au cours du cycle :

- Au stade « 3- 4 feuilles » début tallage (les 7 et 8 décembre 2011 à Andranomanelatra et le 20 décembre 2011 à Ivory)
- Au stade « 6-8 feuilles » mi-tallage (les 11 et 12 janvier 2012 à Ivory, et les 17 et 18 janvier 2012 à Andranomanelatra)
- Au stade « début montaison » (les 24 et 25 janvier 2012 à Ivory, et les 31 janvier et 1 février 2012 à Andranomanelatra)
- Au stade « feuille paniculaire » (les 7 et 9 février 2012 à Ivory, et les 13, 16 et 20 février 2012 à Andranomanelatra).

Lors de chaque prélèvement, six poquets situés sur la 3^{ème} ligne en partant de la bordure de la parcelle sont mesurés puis prélevés (Fig. 6). Le nombre de plants et de talles est compté pour chacun des poquets. Ces poquets sont ensuite mis à sécher à l'étuve (72 heures à 60°C) puis pesés afin de déterminer la biomasse aérienne des poquets prélevés pour chacune des parcelles.

Le LAI (Leaf Area Index) est estimé dans chaque parcelle à l'aide d'un SunScan (Delta T). Cet appareil mesure le rayonnement au-dessus et au-dessous de la canopée, en déduit le rayonnement intercepté par le couvert et donne une estimation du LAI. D'après Sone et al. (2009), l'estimation du LAI par le SunScan est assez fiable, et ce pour différents cultivars de riz pluvial. Afin de s'assurer de la fiabilité des mesures, les chercheurs de l'équipe Scrid ont comparé l'année dernière les valeurs données par le SunScan et les valeurs de LAI obtenues de manière destructive à deux stades de développement du riz. Ces travaux ont été menés sur 4 variétés parmi lesquelles on retrouve les variétés F154, F161 et F172 étudiées dans les essais du projet GARP. La relation entre les deux types d'estimation du LAI est correcte puisque la régression linéaire obtenue avait un $R^2=0,75$.

Le SunScan possède en outre l'avantage par rapport à d'autres appareils comme le LAI-2000 de pouvoir être utilisé dans des conditions d'ensoleillement hétérogène, par exemple sous une couverture nuageuse non-uniforme (Potter et al., 1996). Pour chaque parcelle une mesure moyenne est obtenue à partir de 6 mesures effectuées sous différents angles dans le couvert avec le SunScan, mesures toujours réalisées sur la même placette par parcelle. Les mesures n'ayant pas été calibrées pour des couverts très peu denses, elles n'ont été effectuées qu'à partir du 2^{ème} prélèvement à Andranomanelatra, et à partir du 3^{ème} prélèvement à Ivory.

Tous les prélèvements et mesures effectués sur les deux sites expérimentaux, ainsi que les apports d'azote et les notations de pyriculariose, sont indiqués dans les figures 7 et 8.

2.3 Suivi du statut azoté des cultures

Le statut azoté des variétés très sensibles et moyennement sensibles a été mesuré à trois reprises au cours du cycle. Les mesures n'ont pas pu être effectuées au moment du 1^{er} prélèvement car les feuilles étaient alors trop petites pour permettre les mesures. Deux appareils ont été utilisés pour effectuer ce suivi : le SPAD et le Dualex.

2.3.1 Le SPAD

Le SPAD est un petit appareil portatif qui permet d'estimer la teneur en chlorophylle des feuilles. Lorsque la feuille sur laquelle on souhaite effectuer la mesure est pincée (Fig. 9), l'appareil mesure la transmittance dans le rouge (à 650 nm où l'absorption est forte) et dans le proche infrarouge (à 940 nm où l'absorption est très faible). La lumière transmise par la feuille est convertie en signal électrique. L'indice SPAD est égal au rapport entre les intensités lumineuses transmises aux deux longueurs d'onde.



Figure 9 : Mesure au SPAD
Source : Julie Dusserre (2012)



Figure 10: Mesure au Dualex
Source : Julie Dusserre (2012)

La valeur SPAD donnée par l'appareil est corrélée à la teneur en azote (Peng et al., 1993, Peng et al., 1995), c'est pourquoi ce dernier est traditionnellement utilisé comme aide au pilotage de la fertilisation azotée. Lorsque la valeur SPAD mesurée est inférieure à une valeur critique (fixée en fonction de l'espèce cultivée), de l'azote minéral doit être apporté à la plante afin d'éviter tout risque de carence.

Nous utilisons ici cet appareil comme indicateur du statut azoté des plantes. Lors des trois premiers prélèvements, les mesures ont été effectuées sur la dernière feuille ligulée (c'est à dire la dernière feuille entièrement développée) de 20 talles appartenant à 20 poquets différents (Fig. 6). Le quatrième prélèvement s'est déroulé différemment selon le site. A Andranomanelatra, les mesures ont été effectuées sur 10 feuilles paniculaires et sur 10 avant-dernières feuilles. A Ivory, les conditions de travail (éloignement géographique, très forte chaleur et orages fréquents) ne nous ont pas permis de faire les prélèvements de la même façon car ceux-ci prennent beaucoup de temps, nous avons donc effectué les mesures uniquement sur 20 feuilles paniculaires. La mesure SPAD doit être effectuée au tiers supérieur de la feuille, sur la face supérieure uniquement, en prenant soin de faire de l'ombre à l'appareil.

2.3.2 Le Dualex

Le Dualex (Fig. 10) est également un appareil portable. Il permet d'estimer les teneurs en chlorophylle (selon le même principe que le SPAD) et en flavonols des feuilles. Les flavonols sont des molécules carbonées issues du métabolisme secondaire de la plante et révélatrices d'une situation de carence azotée. L'estimation de la teneur en flavonols d'une feuille se fait en mesurant l'absorbance dans une longueur d'onde du rouge (où la fluorescence de la chlorophylle est excitée) et l'absorbance dans une longueur d'onde de l'ultraviolet (où la présence des flavonols affecte la fluorescence de la chlorophylle). La différence entre les deux fluorescences chlorophylliennes est directement reliée à la teneur en flavonols de l'épiderme foliaire.

Le Dualex calcule par ailleurs un index appelé NBI (Nitrogen Balance Index) qui correspond au ratio chlorophylle/flavonols. Cet index est un bon indicateur du statut azoté car lorsque la plante est en fonctionnement optimal, elle synthétise des molécules azotées (dont la chlorophylle) et peu de flavonols, et lorsque la plante est en situation de carence azotée, elle synthétise des flavonols (molécules carbonées) en quantité importante.

Sur chaque feuille, deux mesures doivent être effectuées : une sur la face supérieure et une sur la face inférieure, en évitant la nervure centrale. Le Dualex possède l'avantage d'être moins sensible à l'épaisseur des feuilles que le SPAD, ce qui est intéressant lorsque l'on veut, comme dans notre cas, étudier des feuilles d'âges (et donc d'épaisseurs) différents, ou de variétés différentes. Les mesures ont été effectuées sur les mêmes feuilles que les mesures SPAD, comme décrit précédemment.

2.3.3 Dosage chimique

A chaque prélèvement, les feuilles sur lesquelles sont prises les mesures SPAD et Dualex sont prélevées, séchées à l'étuve puis envoyées au laboratoire du CIRAD à Montpellier où est effectué le dosage de l'azote total. A partir du troisième prélèvement, lorsque la biomasse foliaire prélevée est suffisante, on effectue également le dosage de l'ammonium (NH_4^+) et des nitrates (NO_3^-).

Pour des questions de délai de traitement des prélèvements au laboratoire, nous n'avons obtenus que les résultats des prélèvements n°1 à 3. Je disposais donc au moment de faire l'analyse statistique des pourcentages d'azote foliaire des prélèvements n°1 à 3, et des quantités de nitrates et d'ammonium pour le prélèvement n°3. Pour les mêmes raisons, je n'ai pas pu utiliser les dosages de l'azote dans les plantes entières comme cela était initialement prévu.

2.4 Suivis épidémiologiques

Deux types de notations ont été effectués sur les variétés très sensibles et moyennement sensibles:

- Une mesure de la pyriculariose foliaire a été effectuée pendant le tallage. Dans chaque parcelle, 10 poquets ont été repérés (Fig. 6). Sur chacun d'entre eux, nous avons dénombré le nombre de talles total et le nombre de talles « malades » (ayant au moins une lésion de pyriculariose sur une de ses feuilles). Pour trois talles malades, le pourcentage de surface foliaire attaquée a été estimé visuellement sur les quatre feuilles supérieures. Nous ne calculons la sévérité de la maladie qu'à partir de ces quatre feuilles supérieures car les feuilles situées plus bas dans le couvert ne participent que très peu à la photosynthèse et leur statut épidémiologique n'a donc pas beaucoup d'incidence sur la physiologie de la plante. Les notations de pyriculariose foliaire ont été effectuées le 6 février 2012 à Ivory et le 8 février 2012 à Andranomanelatra.

- Deux notations de pyriculariose paniculaire ont été effectuées pendant la phase de maturation. Lors de ces notations, 10 poquets ont été repérés sur la diagonale de la parcelle (Fig. 6). Sur chacun de ces 10 poquets, le nombre de panicules total et le nombre de panicules malades ont été déterminés. Le pourcentage de grains atteints par la pyriculariose a alors été estimé visuellement pour 5 panicules malades par poquet. Ces notations ont été effectuées les 9 et 16 mars 2012 à Ivory, et les 13 et 27 mars 2012 à Andranomanelatra. La première notation est assez précise car lorsque les grains sont encore verts, il est relativement aisé de repérer les grains atteints de pyriculariose. Néanmoins, il est possible que cette première notation soit trop précoce par rapport au pic de l'épidémie, par conséquent nous en effectuons une deuxième une à deux semaines plus tard. Lors de cette deuxième notation, il est beaucoup moins facile de reconnaître les grains malades parmi les grains presque mûrs et les erreurs de notation peuvent donc être plus importantes. Nous n'utilisons pour les analyses statistiques que la date la mieux corrélée au pourcentage de grains vides à la récolte car elle représente le mieux la pyriculariose qui a eu un impact sur le rendement.

2.5 Composantes du rendement

Les composantes du rendement sont les variables élaborées au cours du cycle de la plante et desquelles dépend le rendement. Pour le riz, ces composantes sont : le nombre de plantes par m², le nombre de panicules par plant, le nombre d'épillets par panicule, le pourcentage de grains pleins et le poids de mille grains (PMG).

Le rendement a été mesuré sur l'ensemble de la parcelle, en supprimant cinq lignes de bordure de chaque côté (Fig. 6). La surface récoltée mesure 16,8 m².

Lors de la récolte (qui s'est déroulée les 23, 24, 25 avril à Andranomanelatra et les 2, 3, 4 avril à Ivory), les nombres de plants, de talles, et de panicules ont été comptés sur neuf poquets prélevés sur une placette (Fig. 6). Les panicules ont ensuite été récupérées et égrenées. Puis l'on a procédé au vannage qui permet de séparer les grains vides des grains pleins. Après séchage (à l'étuve) et pesée, 200 grains pleins et 200 grains vides ont été isolés et pesés. En multipliant le poids des 200 grains pleins par cinq, on obtient le poids de mille grains (PMG). Cela nous permet d'estimer le nombre de grains pleins et de la même façon celui des grains vides qu'il y avait dans les neuf poquets, et de calculer le nombre d'épillets (grains pleins + grains vides) par panicule et le taux de stérilité. Il est à noter que les rendements présentés dans ce rapport sont les rendements en grains pleins non décortiqués (paddy) à 0% d'humidité. Ils sont donc légèrement inférieurs aux rendements à 14% d'humidité présentés habituellement.

2.6 Traitement des données et analyse statistique

2.6.1 Traitement des données de pyriculariose foliaire

Les données dont nous disposions étaient les notes attribuées lors de la notation de pyriculariose foliaire aux 4 feuilles supérieures des talles malades (3 au maximum) pour chacun des 10 poquets notés par parcelle. Ces notes correspondaient au pourcentage de surface foliaire atteint par la pyriculariose que nous avons estimé visuellement. En multipliant la note moyenne par la proportion de talles malades du poquet, nous avons calculé la sévérité moyenne au poquet. La sévérité moyenne à la parcelle est la moyenne des sévérités au poquet, sans pondération. Cette sévérité exprimant un pourcentage, nous avons préféré la diviser par 100 afin d'obtenir une proportion de feuille malade.

2.6.2 Traitement des données de pyriculariose paniculaire

Nous disposions pour la pyriculariose paniculaire des notes attribuées à 5 panicules malades pour chacun des 10 poquets notés par parcelle. Ces notes représentaient le pourcentage de grains malades. En multipliant ce pourcentage par la proportion de panicules malades, nous obtenons un pourcentage de grains malades au poquet. La moyenne parcellaire brute de ces pourcentages est appelée sévérité moyenne par parcelle, et nous l'avons divisée par 100 afin d'obtenir la proportion de grains malades.

2.6.3 Analyse statistique

L'effet des traitements (mode de gestion du sol et fertilisation azotée) sur la pyriculariose foliaire et la pyriculariose paniculaire a été testé à l'aide du logiciel SAS, avec la procédure GLIMMIX. Nous ne connaissons pas la loi suivie par notre variable d'intérêt (qui est une proportion) mais nous pouvons en estimer la relation entre moyenne et variance à partir des données au poquet. En l'absence de connaissance de la loi, donc de la vraisemblance, l'estimation des paramètres du modèle se fait par maximisation d'un analogue de la vraisemblance, la quasi-vraisemblance (Mc Cullagh and Nelder, 1989). La variable à analyser étant une proportion, nous avons gardé la fonction de lien logit du modèle logistique, adaptée à des observations binomiales. Mais la fonction de variance n'est plus $V(\mu)=\mu(1-\mu)/n$, mais $V(\mu)=\phi \mu^b(1-\mu)^b$, ϕ et b étant estimés d'après les données.

La combinaison linéaire des variables explicatives ne prédit pas directement la proportion p (de surface foliaire ou de grains malades) mais son logit : $\ln(p/(1-p))$. Nous pouvons ainsi donner un sens à l'additivité des effets du mode de gestion du sol et de la fertilisation azotée, ce qui rend plus aisée l'interprétation des interactions à l'aide de graphiques. En effet, avec une proportion faible, une additivité des effets dans cette échelle logit est équivalente à une multiplication des effets sur les proportions. Le modèle permet de tester l'effet des 3 facteurs (mode de gestion du sol, fertilisation azotée et variété), les interactions entre ces facteurs ainsi qu'un effet bloc.

L'analyse des effets des covariables « azote » et « densité du couvert » sur la maladie a également été effectuée avec le logiciel SAS à l'aide de la procédure GLIMMIX. Cette analyse avait pour but de tester l'hypothèse que l'action des facteurs étudiés, c'est-à-dire du mode de gestion du sol et de la fertilisation azotée, passe par des covariables reflétant la densité du couvert végétal et la richesse en azote de ses feuilles. Le modèle est le même que précédemment, mais nous y ajoutons une ou deux covariables.

L'étude de l'effet du système de culture sur le rendement a été effectuée suivant un modèle linéaire avec le logiciel SAS à l'aide de la procédure GLIMMIX de façon à obtenir les mêmes graphiques que pour la pyriculariose. Nous testons l'effet des trois facteurs (mode de gestion du sol, fertilisation azotée et variété), les interactions entre ces facteurs ainsi qu'un effet bloc.

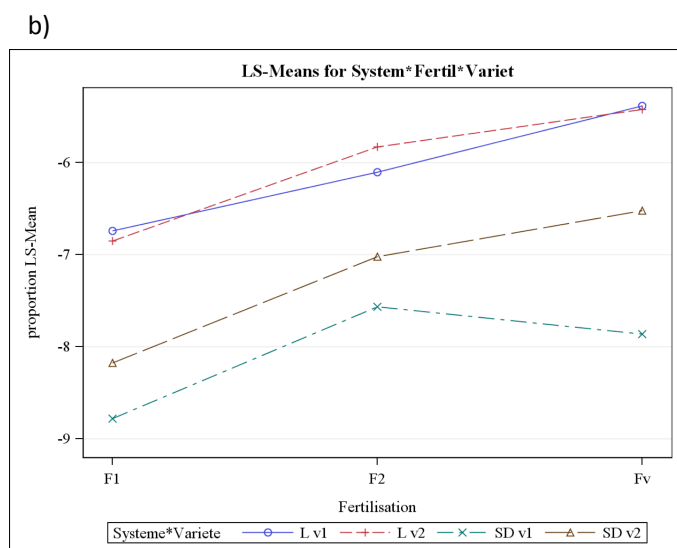
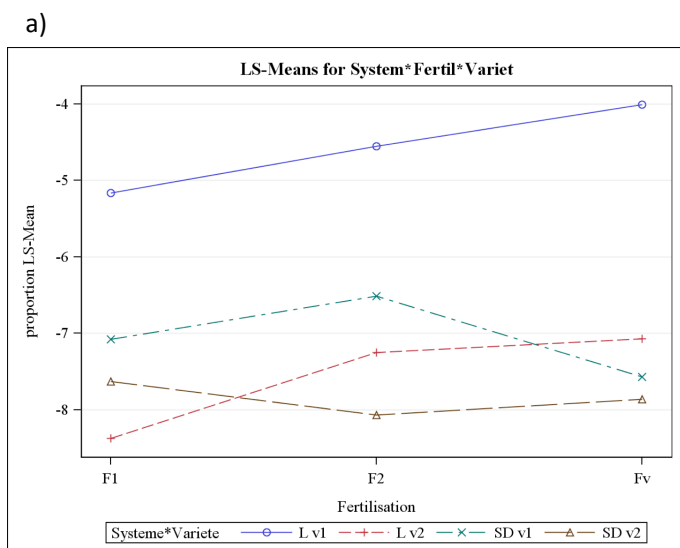


Figure 11: Logit de de la proportion de surface foliaire attequée par la pyriculariose à a) Andranomanelatra et b) Ivory. À Andranomanelatra: v1=F154, v2=F161; à Ivory: v1=F154, v2=B22. L=labour, SD=Semis direct (SCV)

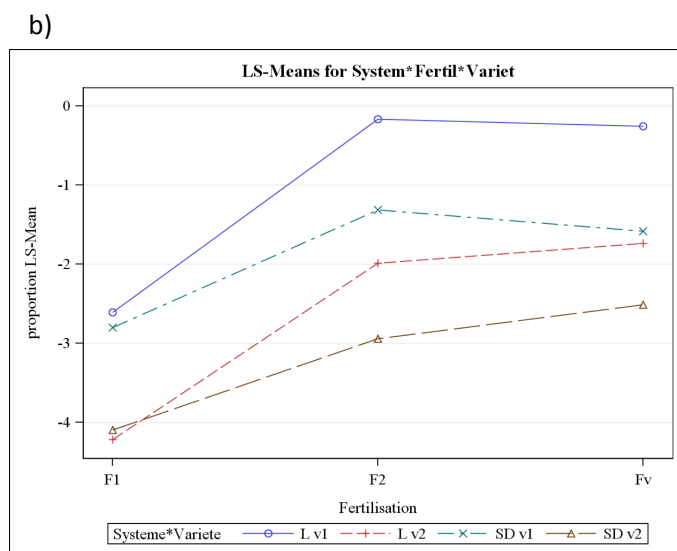
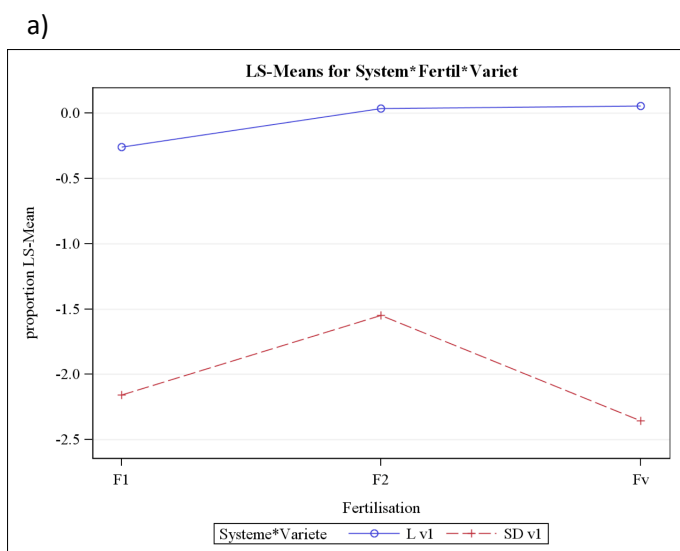


Figure 12: Logit de de la proportion de grains attequés par la pyriculariose à a) Andranomanelatra et b) Ivory. Seule la variété F154 est présentée pour Andranomanelatra car la variété F161 n'a pas été atteinte par la maladie. À Andranomanelatra: v1=F154, v2=F161; à Ivory: v1=F154, v2=B22. L=labour, SD=Semis direct (SCV)

3 Résultats

3.1 Effet du système de culture sur la sévérité de la pyriculariose

Les figures 11 et 12 présentent les résultats de pyriculariose foliaire et paniculaire pour les deux sites expérimentaux. La variable représentée en ordonnée est $\ln(p/(1-p))$ où p est la proportion de surface foliaire ou de grains malades. Afin de faciliter la compréhension, nous donnerons en même temps que l'interprétation des résultats, les valeurs de sévérité en pourcentage de surface foliaire ou de grains malades.

3.1.1 Pyriculariose foliaire

Globalement, la sévérité de la pyriculariose foliaire a été très faible pour l'année 2012 sur les deux sites expérimentaux. Les sévérités les plus importantes que nous ayons obtenues étaient pour le labour de la variété F154 à Andranomanelatra, où la sévérité était comprise entre 0,61% et 1,8% de surface foliaire attaquée selon la fertilisation, et pour le labour des variétés F154 et B22 à Ivory (entre 0,12% et 0,55%). Les très faibles valeurs de sévérité obtenues ont tout de même pu être étudiées statistiquement car pour chaque parcelle, la sévérité (surface foliaire attaquée) a été évaluée sur 120 feuilles.

Site d'Andranomanelatra

La figure 11a) montre une combinaison variété F154 x labour nettement plus touchée par la maladie que les autres, avec un effet aggravant de la fertilisation minérale.

L'analyse statistique a confirmé l'interaction entre le mode de gestion du sol et la variété avec un effet significatif du mode de gestion du sol pour la variété F154 uniquement, qui confirme que pour cette variété, le riz cultivé en labour est significativement plus touché par la pyriculariose foliaire que le riz cultivé en SCV. Un effet significatif de la fertilisation en labour F154 est également ressorti de l'analyse ($p=0,04$), indiquant que plus la fertilisation azotée est importante, plus la sévérité de la maladie augmente. L'absence d'effet de la fertilisation en SCV va dans le sens d'un possible tamponnage de l'azote par les microorganismes.

Pour la variété F161 qui est en théorie moyennement sensible, la sévérité de la pyriculariose foliaire a été extrêmement faible (sévérité maximale = 0,09% de la surface foliaire attaquée) et ni le mode de gestion du sol ni la fertilisation azotée n'ont eu d'effet significatif.

Site d'Ivory

Sur la figure 11b nous pouvons remarquer tout d'abord que la sévérité de la pyriculariose foliaire semble assez similaire pour les deux variétés. D'après les résultats de l'analyse statistique, l'effet de la variété est à la limite de significativité que nous nous sommes fixée ($p=0,050$). L'analyse statistique a également montré un effet significatif du mode de gestion du sol sur la sévérité de la pyriculariose foliaire ($p<0,0001$), le labour étant plus touché par la maladie que le SCV, ainsi qu'un effet significatif de la fertilisation ($p=0,0001$), la sévérité de la maladie augmentant avec la fertilisation.

3.1.2 Pyriculariose paniculaire

Site d'Andranomanelatra

A Andranomanelatra, l'analyse statistique n'a pu être menée que sur la variété F154 car la sévérité de la maladie pour la variété F161 était tellement faible qu'elle empêchait l'analyse sur les deux variétés réunies. Cette analyse a montré un effet significatif du mode de gestion du sol sur la sévérité de la pyriculariose paniculaire ($p<0,0001$), le labour étant plus touché que le SCV.

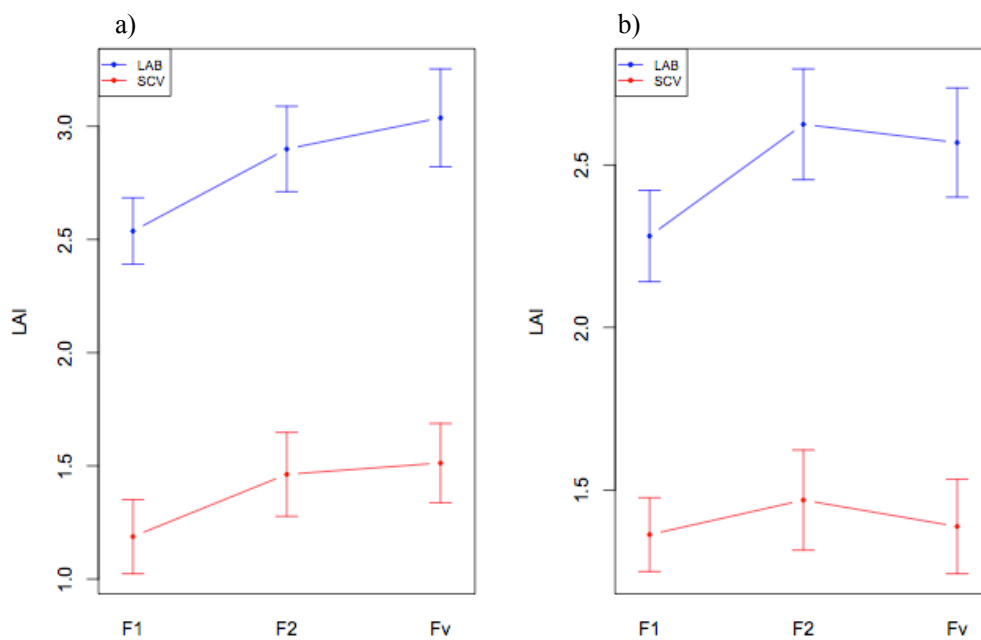


Figure 13: LAI estimé par le SunScan à Andranomanelatra pour les variétés **a)** F154 et **b)** F161
Les barres représentent les écarts-types.

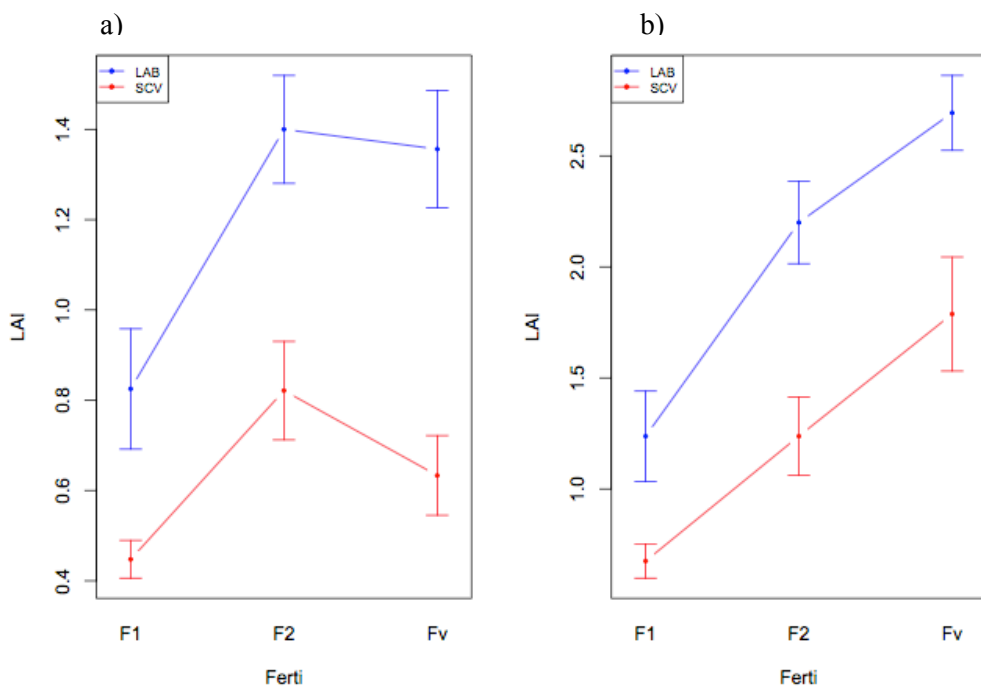


Figure 14: LAI estimé par le SunScan à Ivory pour les variétés **a)** F154 et **b)** B22
Les barres représentent les écarts-types.

Site d'Ivory

L'analyse statistique a révélé que la sévérité de la maladie était significativement plus élevée pour la variété F154 que pour la variété B22 ($p < 0,0001$). Elle a également montré un effet significatif du mode de gestion du sol ($p = 0,0017$), le labour étant plus touché que le SCV, ainsi qu'un effet significatif de la fertilisation ($p < 0,0001$). Nous pouvons voir sur la figure 12b que l'effet du mode de gestion du sol se fait ressentir uniquement pour les fertilisations moyenne et forte (F2 et Fv). Bien que l'analyse statistique n'ait pas montré d'interaction significative entre le mode de gestion du sol et la fertilisation ($p = 0,12$), nous ne pouvons pas nous empêcher de remarquer sur la figure 12b que le logit de la proportion de grains malades augmente moins en SCV qu'en labour alors que les niveaux de départ sont similaires.

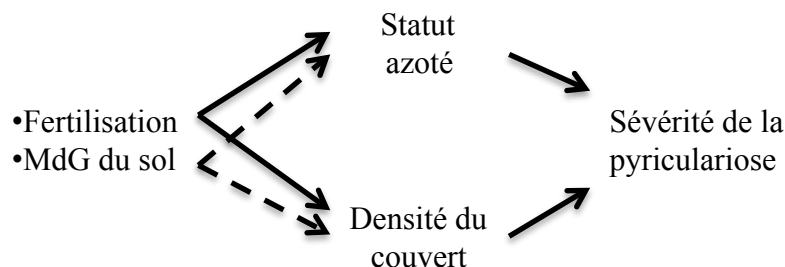
3.2 Effet du statut azoté et de la densité du couvert végétal sur la sévérité de la pyriculariose

Entre les deux modes de gestion du sol étudiés dans le projet GARP (labour et SCV), de nombreux facteurs diffèrent. En effet, la présence des résidus de culture en SCV peut modifier la dynamique hydrique du système, l'activité des micro-organismes telluriques et nombre d'autres facteurs susceptibles de jouer sur la nutrition des plantes ainsi que leur développement, et donc potentiellement sur la sévérité de la pyriculariose.

L'une des hypothèses principales du projet GARP était que le riz cultivé en SCV possède un statut azoté plus « stable » que le riz cultivé en labour, et que par conséquent il ne subit pas de « pics d'absorption d'azote » pouvant entraîner un déséquilibre dans la plante et empêcher l'expression des mécanismes de résistance à la pyriculariose. L'hypothèse qui a été avancée pour expliquer cela est que la dynamique de l'azote est différente dans les parcelles cultivées en SCV car les résidus de culture présents sur le sol apportent de l'azote organique qui est constamment immobilisé et minéralisé par les microorganismes du sol, constituant ainsi une source stable d'azote pour les plantes.

Pendant notre travail de terrain, nous avons émis une autre hypothèse pouvant expliquer une éventuelle différence de sévérité de la pyriculariose entre le labour et le SCV. Nous avons remarqué sur les deux sites expérimentaux, et particulièrement sur le site d'Ivory, que les parcelles cultivées en SCV avaient une densité de couvert sensiblement moins importante que les parcelles cultivées en labour (Fig. 13 et 14). Le développement de *M.oryzae* étant très sensible aux conditions microclimatiques et en particulier à l'humidité du couvert, nous avons émis l'hypothèse que les différences de sévérité observées entre le labour et le SCV pouvaient être dues aux différences de structure du couvert, et en particulier de densité de couvert. Nous parlons ici de densité non pas en terme de plante/m² mais en terme de surface foliaire/surface au sol.

Ces deux hypothèses sont représentées ci-dessous :



Pour tester ces hypothèses, nous avons effectué une analyse de covariance, plus précisément son analogue en modèle linéaire généralisé. Nous avons choisi deux types de covariables, d'une part des covariables reflétant le statut azoté des plantes et d'autre part des covariables reflétant la densité du couvert végétal.

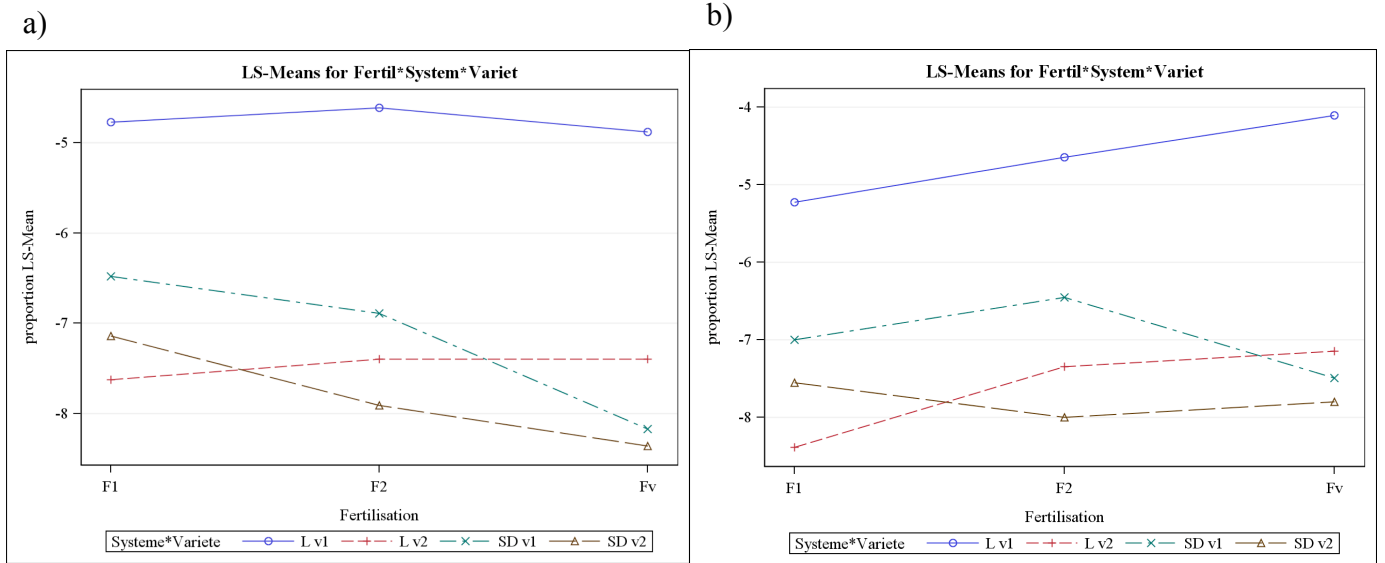


Figure 15: Logit de la proportion de surface foliaire attaquée par la pyriculariose à Andranomanelatra avec ajout dans le modèle **a)** du pourcentage d'azote du P3 et **b)** du pourcentage d'azote et du LAI du P3. La ou les covariables sont ajustées à leur valeur moyenne pour chaque traitement. À Andranomanelatra: v1=F154, v2=F161, L=labour, SD=Semis direct (SCV)

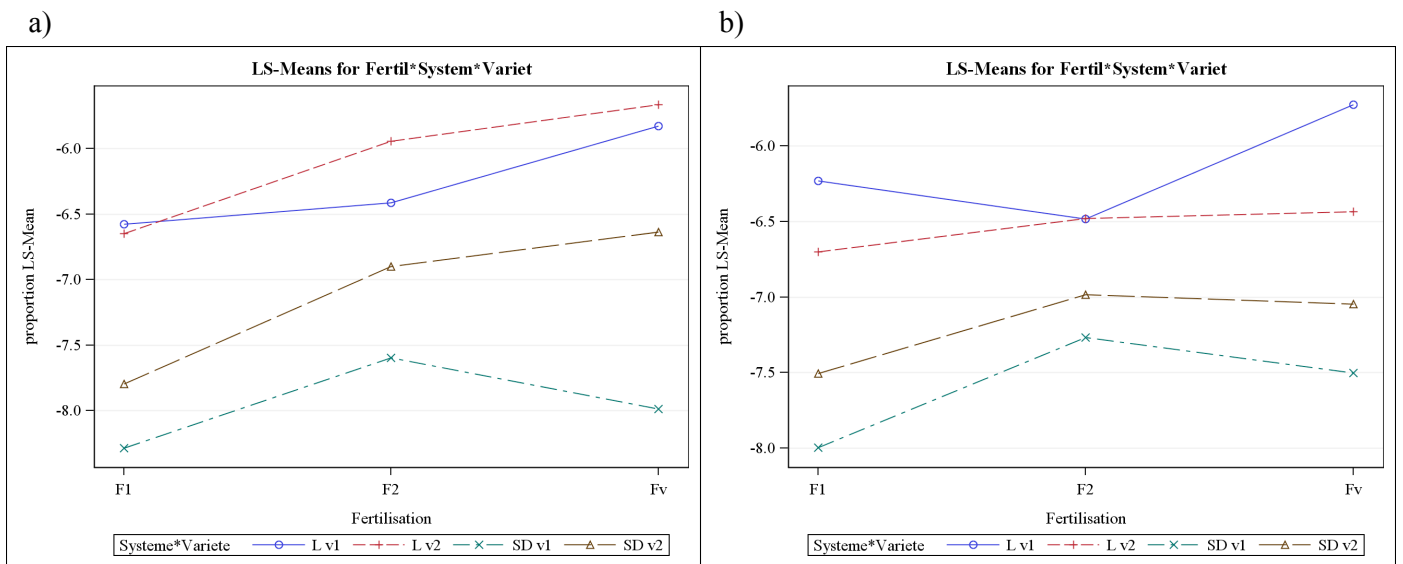


Figure 16: Logit de la proportion de surface foliaire attaquée par la pyriculariose à Ivory avec ajout dans le modèle **a)** du pourcentage d'azote du P3 et **b)** du pourcentage d'azote et du LAI du P3. La ou les covariables sont ajustées à leur valeur moyenne pour chaque traitement. Ivory: v1=F154, v2=B22, L=labour, SD=Semis direct (SCV)

Si l'effet des facteurs imposés dans le modèle (mode de gestion du sol et fertilisation azotée) passe par certaines de ces covariables, l'ajout de ces covariables dans le modèle linéaire généralisé utilisé précédemment doit annuler l'effet des facteurs.

Nous avons choisi d'ajouter tout d'abord une covariable reflétant le statut azoté afin de voir si l'effet du mode de gestion du sol ou l'effet de la fertilisation azotée disparaît. Nous testons également le modèle avec la covariable reflétant la densité du couvert.

Enfin, nous ajoutons les deux covariables ensemble dans le modèle et nous regardons si l'effet des facteurs persiste ou s'il a été entièrement annulé par les covariables.

Les covariables dont nous disposions étaient les suivantes : valeurs SPAD et Dualex pour les prélèvements n°2 à 4, pourcentage en azote foliaire pour les prélèvements n°1 à 3, et quantité de nitrates et d'ammonium dans les feuilles pour le prélèvement n°3. Les résultats que nous présentons ici sont ceux obtenus avec la ou les meilleures covariables pour chaque lieu et chaque type de pyriculariose (foliaire et paniculaire).

Dans chacun des graphiques de ce chapitre sont présentées des moyennes ajustées. Ces moyennes ont été prédites à l'aide du modèle linéaire généralisé en ramenant les valeurs de la ou des covariables à la valeur moyenne du site, quel que soit le traitement. De cette façon, nous pouvons voir si un effet des facteurs (fertilisation azotée et mode de gestion du sol) subsiste lorsque tous les traitements ont le même niveau de densité et/ou le même statut azoté.

3.2.1 Pyriculariose foliaire

Site d'Andranomanelatra

Nous avons constaté précédemment un effet significatif du mode de gestion du sol sur la maladie ainsi qu'un effet significatif de la fertilisation azotée pour la variété F154 cultivée en labour. Lorsque nous ajoutons le pourcentage d'azote foliaire du 3^{ème} prélèvement dans le modèle, nous voyons que celui-ci a un effet significatif sur la sévérité de la maladie, et qu'il fait disparaître l'effet de la fertilisation que nous avons constaté pour la variété F154 en labour. Cela nous indique que la fertilisation azotée augmente le pourcentage d'azote foliaire et que plus les feuilles sont riches en azote, plus elles sont attaquées par la pyriculariose. En effet, nous pouvons observer sur la figure 15a que lorsque le pourcentage d'azote est ajusté à sa valeur moyenne pour tous les traitements, la sévérité de la maladie pour le labour de la variété F154 reste constante quelle que soit la fertilisation. En revanche, l'introduction de la teneur en azote des feuilles dans le modèle ne permet pas d'éliminer l'effet du mode de gestion du sol, indiquant que cet effet passe par une ou des variables qui ne sont pas liées à l'azote foliaire.

Nous avons ensuite testé l'effet des variables « structure du couvert » dont nous disposions et avons constaté que le LAI du prélèvement n°3 (tout comme celui du prélèvement n°2) permettait de supprimer l'effet du mode de gestion du sol. L'ajout des deux covariables « pourcentage d'azote » et « LAI » dans le modèle permet d'annuler les effets du mode de gestion du sol et de la fertilisation azotée. Nous pouvons donc dire qu'à Andranomanelatra, le système de culture influait sur la sévérité de la pyriculariose foliaire en modifiant la teneur en azote des feuilles pour la variété F154 cultivée en labour, et la densité du couvert pour les deux variétés étudiées.

Site d'Ivory

À Ivory, l'analyse statistique avait révélé un effet du mode de gestion du sol ainsi qu'un effet de la fertilisation azotée sur la sévérité de la pyriculariose foliaire. En introduisant dans le modèle le pourcentage d'azote foliaire du prélèvement n°3, nous avons pu constater qu'il annulait l'effet de la fertilisation azotée. En revanche, l'effet du mode de gestion du sol était toujours présent. L'ajout du LAI du prélèvement n°3 dans le modèle n'a pas permis de faire disparaître cet effet, bien que cette covariable ait un effet significatif sur la sévérité de la maladie.

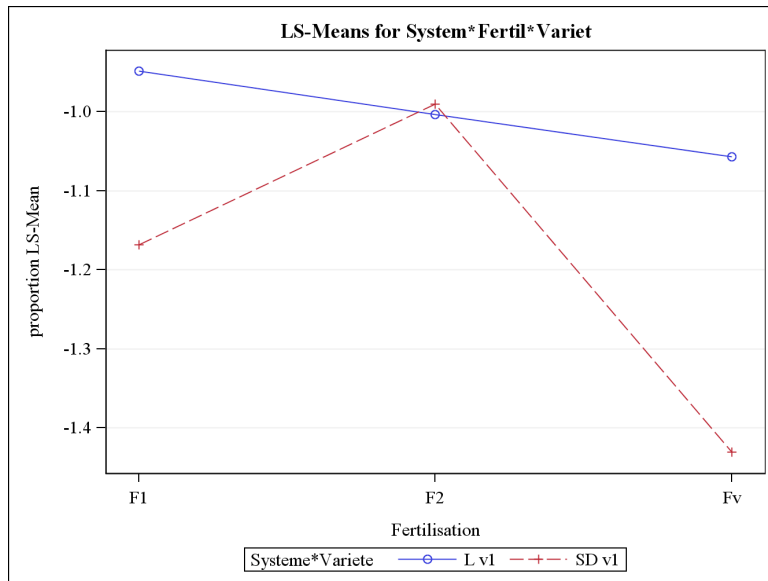


Figure 17: Logit de la proportion de grains attaqués par la pyriculariose panaculaire à Andranomanelatra pour la variété F154 avec ajout dans le modèle du LAI du P4. Le LAI est ajusté à sa valeur moyenne pour chaque traitement. v1=F154, L=labour, SD=Semis direct (SCV)

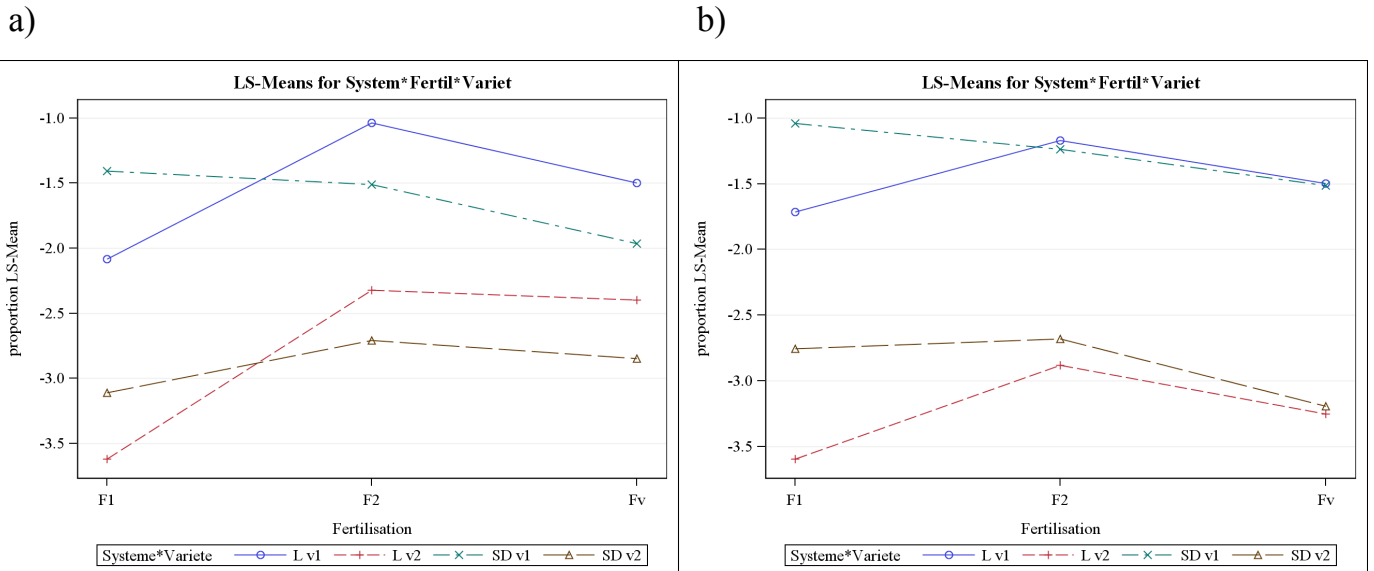


Figure 18: Logit de la proportion de grains attaqués par la pyriculariose à Ivory avec ajout dans le modèle **a)** du pourcentage d'azote du P3 et **b)** du pourcentage d'azote et du LAI du P3. La ou les covariables sont ajustées à leur valeur moyenne. v1=F154, v2=B22, L=labour, SD=Semis direct (SCV)

Dans le cas présent, aucune des covariables ou des couples de covariables testés n'ont pu faire disparaître l'effet du mode de gestion du sol, indiquant que ce dernier passe vraisemblablement par une ou des variables que nous n'avons pas étudiées.

Ce résultat est encourageant car il semble confirmer que le mode de gestion du sol peut influencer la sévérité de la pyriculariose foliaire sans que cet effet passe par une différence de croissance des plantes. Il sera très intéressant de réutiliser le modèle en y introduisant une covariable « nutrition » dès que les résultats des diagnostics foliaires seront connus, afin de savoir si les teneurs en minéraux, et en particulier en silice, peuvent expliquer l'effet du mode de gestion du sol.

3.2.2 Pyriculariose paniculaire

Site d'Andranomanelatra

Aucune des covariables reflétant le statut azoté que nous avons testées ne permet d'éliminer l'effet du mode de gestion du sol. En revanche, en ajoutant le LAI du prélèvement n°4 au modèle de base, nous constatons qu'il a un effet très significatif sur la sévérité de la maladie ($p < 0,0001$) et qu'il efface l'effet du mode de gestion du sol. Nous avons la confirmation que le mode de gestion du sol influe ici sur la sévérité de la pyriculariose paniculaire en modifiant le LAI. Les plantes cultivées en SCV forment un couvert significativement moins dense que les plantes cultivées en labour. Nous pouvons voir sur la figure 17 que lorsque le LAI du prélèvement n°4 est ajusté à sa valeur moyenne pour tous les traitements, la sévérité de la pyriculariose paniculaire diminue fortement en labour, passant de 47% de grains malades en moyenne à 27%, et augmente sensiblement en SCV, passant de 14% en moyenne à 23%. Il semble ressortir de la figure 17 une interaction entre la fertilisation et le mode de gestion du sol car le logit de la proportion de grains malades varie sensiblement pour les trois modalités de fertilisation en SCV, mais l'analyse statistique n'a pas révélé d'interaction significative.

D'après l'analyse statistique, seul le LAI du prélèvement n°4 influe sur la sévérité de la maladie et permet d'effacer l'effet du mode de gestion du sol, tandis que les LAI des prélèvements antérieurs n'ont aucun effet autre que celui induit par les traitements. Nous ne pouvons pas dire pendant quelle « étape » de l'épidémie a eu lieu le prélèvement n°4 mais il serait intéressant d'étudier cela afin de comprendre si la faible densité du couvert prévient l'arrivée de spores provenant de l'extérieur de la parcelle, ou si elle empêche la propagation de *M.oryzae* dans la parcelle.

Site d'Ivory

Lorsque nous introduisons le pourcentage d'azote foliaire du 3^{ème} prélèvement dans le modèle, nous constatons que celui-ci a un effet significatif sur la sévérité de la maladie. De plus, il annule les effets du mode de gestion du sol et de la fertilisation azotée que nous avons constatés précédemment. Nous pouvons voir sur la figure 18a que l'ajustement du pourcentage d'azote foliaire à sa valeur moyenne pour tous les traitements augmente la sévérité de la pyriculariose pour la fertilisation F1 et la diminue pour la fertilisation Fv. Cela nous indique que les différences d'azote foliaire induites par la fertilisation peuvent expliquer les différences de maladie observées entre les fertilisations. Pour chacune des deux variétés, nous voyons qu'à présent les courbes du labour et du SCV se croisent et que l'effet du mode de gestion du sol disparaît.

Le pourcentage d'azote du prélèvement n°3 semble donc expliquer entièrement l'effet du système de culture que nous avons constaté précédemment, néanmoins si l'on ajoute dans le modèle le LAI du prélèvement n°3, nous constatons qu'il a lui aussi un effet significatif sur la sévérité de la pyriculariose foliaire. Lorsque le LAI du prélèvement n°3 est ajusté à sa valeur moyenne, comme c'est le cas sur la figure 18b, nous constatons que la sévérité de la maladie augmente en SCV, indiquant que les SCV étaient également protégés par une densité de couvert inférieure à celle du labour.

			Nb plants / m ²	Nb panicules / plant	Nb epillets / panicule	% de grains pleins (GP)	PMG (g)	Rendement en GP (t/ha)
F154	Labour	F1	122,7	2,7	32,9	11,1	22,4	0,20
		F2	98,1	2,9	42,5	3,4	22,0	0,08
		Fv	101,4	2,7	44,2	3,2	23,7	0,06
	SCV	F1	115,7	2,7	41,1	16,9	22,0	0,31
		F2	104,2	3,6	42,5	11,6	24,0	0,16
		Fv	96,3	4,0	39,4	11,5	22,1	0,15
F161	Labour	F1	84,7	3,2	61,9	82,4	27,9	3,62
		F2	91,2	3,3	67,2	78,5	25,3	3,81
		Fv	94,0	3,3	74,2	74,5	24,7	3,58
	SCV	F1	97,2	3,0	66,1	68,8	24,8	2,26
		F2	93,1	2,9	62,2	65,3	25,4	2,39
		Fv	87,7	3,2	83,2	58,1	24,0	2,43
F172	Labour	F1	106,9	3,7	46,7	93,7	25,8	4,60
		F2	100,5	4,1	48,9	92,1	26,1	4,87
		Fv	106,0	4,0	43,3	84,5	25,8	4,78
	SCV	F1	112,0	3,6	52,5	90,4	25,2	3,25
		F2	115,3	3,9	45,2	88,3	28,7	3,95
		Fv	94,9	3,4	73,7	86,3	24,7	4,06

Tableau 1 : Composantes du rendement et rendement pour le site d'Andranomanelatra

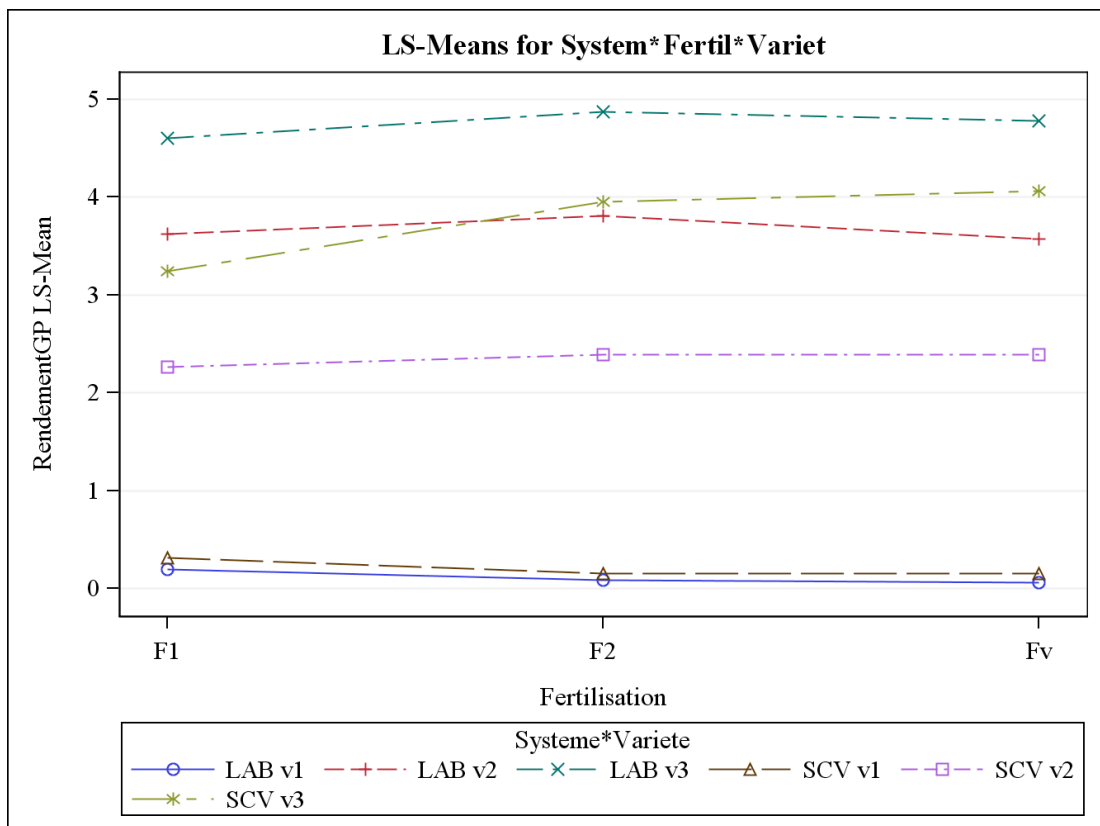


Figure 19: Rendements obtenus à Andranomanelatra pour les variétés F154 (v1), F161 (v2) et F172 (v3).

3.3 Effet du système de culture sur le rendement

3.3.1 Site d'Andranomanelatra

Le tableau 1 présente les résultats des composantes du rendement ainsi que les rendements obtenus sur le site d'Andranomanelatra pour les trois variétés (F154, F161 et F172). Les rendements sont également présentés sous forme de graphe dans la figure 19 afin de pouvoir observer l'évolution du rendement selon le mode de gestion du sol et en fonction de la fertilisation azotée. Les résultats de la variété résistante F172 nous permettent de voir comment se comporte le rendement en fonction du mode de gestion du sol et de la fertilisation azotée pour une variété sur laquelle la pyriculariose n'a pas d'effet.

L'analyse statistique a mis en évidence un effet significatif du mode de gestion du sol sur le rendement, uniquement pour les variétés F161 et F172. La fertilisation azotée n'a pas eu d'effet sur le rendement.

Les rendements les plus importants ont été obtenus pour le labour de la variété résistante F172 (4,8 t/ha).

La variété F161 qui n'a pas été touchée par la pyriculariose paniculaire cette année a connu des rendements allant de 2,4 à 3,8 tonnes de grains pleins/ha suivant les traitements.

Nous voyons sur la figure 19 que les rendements obtenus pour la variété F154 ont été extrêmement faibles cette année (de 0,06 à 0,31 t/ha). Ces très faibles rendements s'expliquent par une croissance faible du riz en SCV, et une forte sévérité de la pyriculariose paniculaire en labour. L'absence d'effet du mode de gestion du sol sur le rendement de cette variété nous indique que même si le SCV a été nettement moins touché par la pyriculariose paniculaire que le labour, comme nous l'avons vu dans la partie 2.7.2, les rendements finaux pour les deux modes de gestion du sol sont équivalents. Le SCV rattrape en quelque sorte sa moindre productivité par une meilleure tolérance à la maladie.

3.3.2 Site d'Ivory

Les résultats des composantes du rendement ainsi que les rendements obtenus sur le site d'Ivory pour les trois variétés (F154, B22 et Nerica4) sont présentés dans le tableau 2. Les rendements sont également présentés sous forme de graphique dans la figure 20.

L'analyse statistique a montré chez Nerica4 une différence de rendement significative entre les deux modes de gestion du sol pour la fertilisation F1 ($p=0,0061$), le rendement étant plus élevé en labour qu'en SCV. L'écart de rendement entre le labour et le SCV diminue pour les fertilisations F2 et Fv (il n'est alors plus significatif). Pour chaque mode de gestion du sol, l'effet de la fertilisation est significatif (plus la fertilisation est importante, plus le rendement est élevé).

Pour la variété B22, nous voyons sur la figure 20 que le rendement est plus élevé en labour qu'en SCV pour les fertilisations basse et moyenne mais que les rendements se rejoignent pour la fertilisation Fv. Nous serions tentés de dire que nous observons le même phénomène que pour la variété Nerica4 mais l'analyse statistique a révélé que la différence de rendement entre les deux modes de gestion du sol n'est pas significative. En revanche, cette analyse a montré un effet de la fertilisation, uniquement en SCV ($p=0,004$). Le rendement passe ainsi de 2,1 à 3,4 t/ha entre la fertilisation F1 et la fertilisation Fv.

Pour la variété F154, nous avons constaté un effet significatif du mode de gestion du sol pour la fertilisation basse F1 ($p<0,0001$), mais cet effet disparaît pour les fertilisations F2 et Fv. Le rendement est extrêmement faible en SCV F1, probablement car les plantes ont très peu poussé, mais il augmente en F2 et Fv. En labour, le rendement est élevé pour la fertilisation F1, et diminue sensiblement pour les fertilisations F2 et Fv. Il est probable que la pyriculariose soit une des causes de cette baisse de rendement car d'une part la sévérité de la pyriculariose paniculaire était faible en F1 (moins de 10% de grains malades) et très importante en F2 et Fv (environ 45% de grains malades), et d'autre part nous avons constaté une baisse du pourcentage de grains pleins, composante sur laquelle influe la pyriculariose paniculaire, en F2 et Fv.

			Nb plants / m ²	Nb panicules / plant	Nb epillets / panicule	% de grains pleins	Poids de 1000 grains (g)	Rendement en grains pleins (t/ha)
F154	Labour	F1	70,4	3,8	58,5	66,4	31,2	2,56
		F2	67,4	4,2	56,3	48,5	29,1	1,78
		Fv	54,4	5,1	62,4	55,3	29,4	1,83
	SCV	F1	52,0	3,3	39,8	57,1	31,9	0,95
		F2	78,1	3,3	65,8	70,0	32,2	1,75
		Fv	58,3	4,3	53,6	56,8	30,1	1,65
B22	Labour	F1	59,4	2,9	70,4	90,1	32,2	2,74
		F2	55,5	3,8	65,2	87,2	33,6	3,43
		Fv	55,5	3,7	64,6	86,6	32,4	3,24
	SCV	F1	55,8	2,6	63,4	88,1	33,3	2,10
		F2	56,9	3,3	59,5	79,8	34,4	2,94
		Fv	58,6	3,9	63,6	79,9	33,3	3,35
Nerica4	Labour	F1	58,1	3,8	93,2	93,0	24,2	3,25
		F2	66,1	4,0	104,2	89,4	25,1	4,45
		Fv	59,5	4,2	120,6	83,4	24,4	4,57
	SCV	F1	61,5	3,0	75,9	89,9	26,0	2,21
		F2	72,8	4,1	81,2	90,2	25,6	4,18
		Fv	66,4	3,9	86,2	76,7	25,3	4,27

Tableau 2 : Composantes du rendement et rendement pour le site d'Ivory

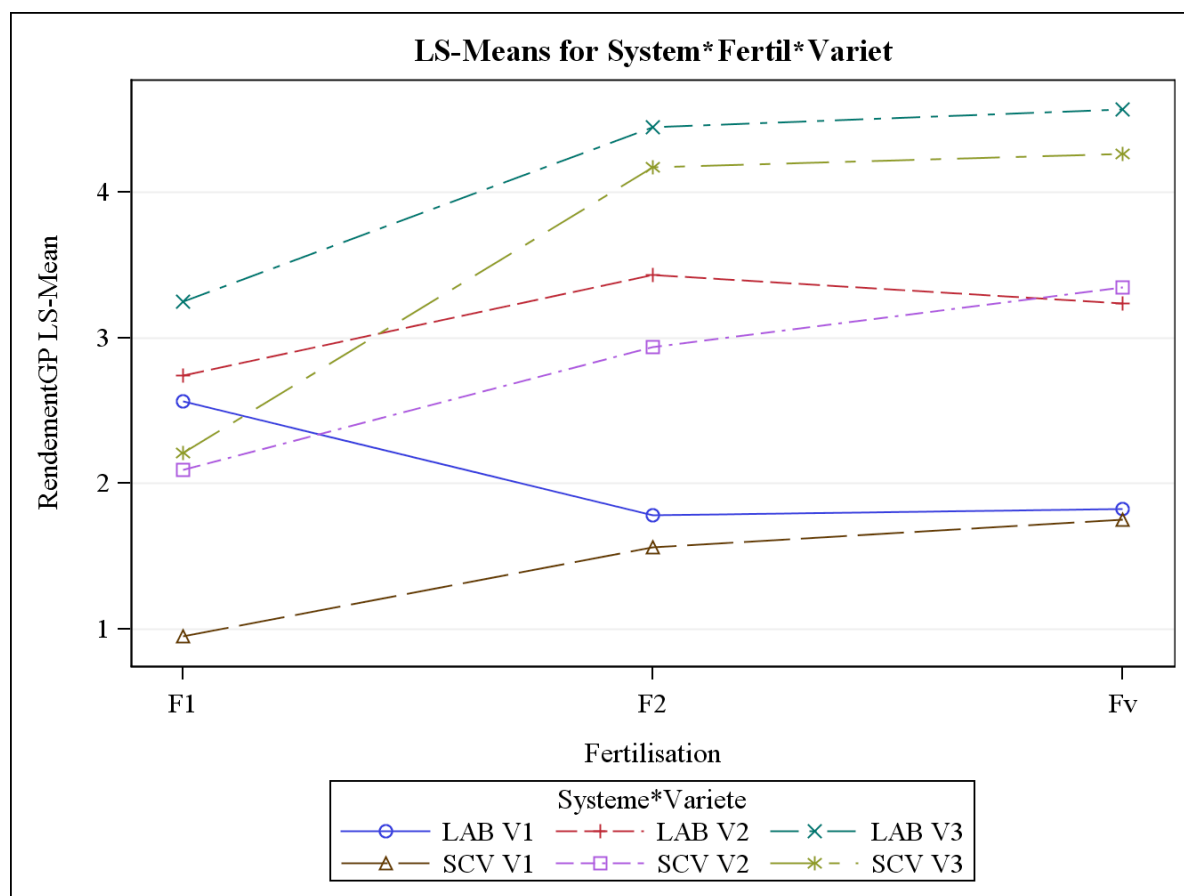


Figure 20: Rendements obtenus à Ivory pour les variétés F154 (V1), B22 (V2) et Nerica4 (V3).

3.4 Lien entre la sévérité de la pyriculariose paniculaire et le pourcentage de grains vides

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la pyriculariose paniculaire entraîne des baisses de rendement en empêchant le remplissage des grains. La sévérité de la pyriculariose paniculaire exprimée en pourcentage de grains malades doit donc en principe être très proche du pourcentage de grains vides estimé lors de la récolte. Nous avons voulu vérifier cette relation en effectuant des régressions linéaires entre la sévérité de la pyriculariose paniculaire et le pourcentage de grains vides pour les variétés très sensibles et moyennement sensibles cultivées sur chacun des deux sites expérimentaux. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 21. La sévérité ayant été quasiment nulle pour la variété F161 à Andranomanelatra, nous ne présentons pas les résultats pour cette variété.

La première chose que nous remarquons est la valeur faible des R^2 . Cela peut s'expliquer par le très important nombre de parcelles ayant un pourcentage de grains vides très élevé mais un pourcentage de grains malades faibles. Pour la variété F154 à Andranomanelatra, la quasi-totalité des parcelles cultivées en SCV (en rouge sur le graphique) a une sévérité inférieure à 20% mais présente néanmoins des pourcentages de grains vides compris entre 65 et 100%. C'est particulièrement flagrant sur la figure 21b où nous voyons que, malgré une sévérité proche de 0%, la variété F161 présente des pourcentages de grains vides compris entre 10 et 60%. L'explication la plus plausible pour expliquer ce résultat surprenant est que des facteurs autres que la pyriculariose ont eu un effet très prononcé sur le pourcentage de grains vides. Nous savons que le vent lors de la floraison est susceptible d'entraîner de la stérilité. Les parcelles expérimentales n'étaient pas encore à floraison lorsque le cyclone Giovanna est passé dans la région d'Antsirabe le 14 février 2012, mais plusieurs tempêtes ont eu lieu dans le mois qui a suivi le cyclone et il est possible qu'elles aient entraîné de la stérilité. Les cardinaux, passereaux rouge vif présents en grand nombre dans la région du Vakinankaratra, ont également pu contribuer au pourcentage élevé de grains vides que nous observons. En effet, ces oiseaux se nourrissent du contenu des grains de riz et laissent les enveloppes sur les panicules. Enfin, pour le site d'Ivory où nous avons constaté un retard de certaines parcelles en SCV, il se peut que des panicules immatures aient été récoltées, augmentant ainsi le nombre de grains vides qui ne sont pas atteints par la pyriculariose.

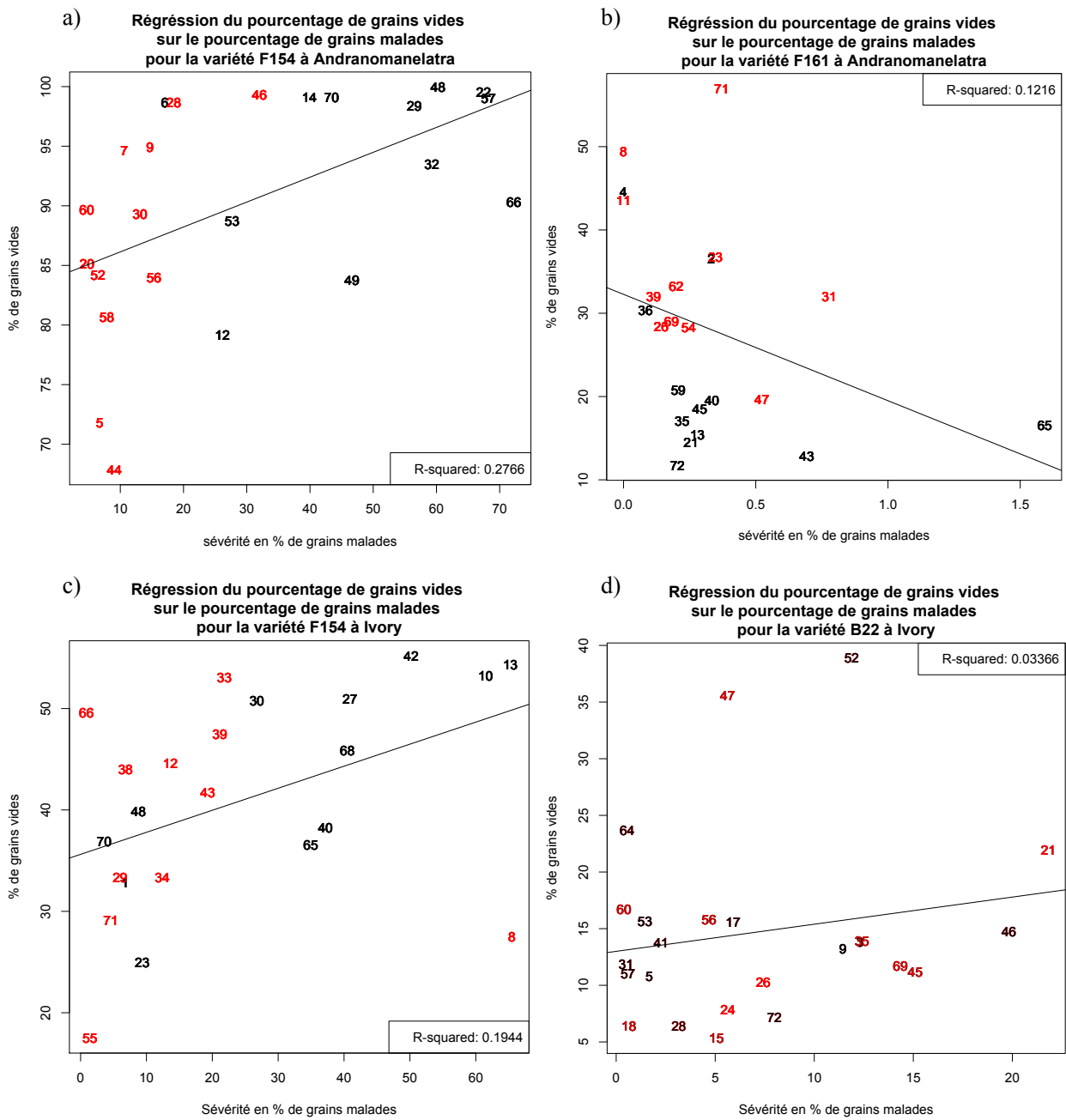


Figure 21: Régression du pourcentage de grains vides sur le pourcentage de grains malades a) à Andranomanelatra pour la variété F154, b) à Andranomanelatra pour la variété F161, c) à Ivory pour la variété F154 et d) à Ivory pour la variété B22. Chaque parcelle est représentée par son numéro. Les parcelles en noir sont les parcelles labourées, celles en rouge sont les parcelles cultivées en SCV.

4 Conclusion et discussion

Nous avons pu voir qu'à Andranomanelatra, les rendements sont pour l'année 2012 plus élevés en labour qu'en SCV pour les variétés moyennement sensibles et résistantes (F161 et F172), et que la fertilisation n'a aucun effet sur le rendement. Comme nous l'avons avancé précédemment, l'absence d'effet de la fertilisation est probablement due au fait que la teneur naturelle en azote des sols d'Andranomanelatra n'est pas aussi faible qu'à Ivory. Aucune plante n'étant en situation de carence azotée, la différence de nutrition entre les plantes cultivées avec la modalité de fertilisation F1 et celles cultivées avec la modalité de fertilisation Fv est certainement moins importante qu'à Ivory et insuffisante pour qu'un effet de la fertilisation ressorte.

La différence de rendement constatée entre les deux modes de gestion du sol est probablement due au fait qu'à Andranomanelatra, où les conditions climatiques ne favorisent pas le SCV, les plantes cultivées en SCV se développent moins bien que les plantes cultivées en labour. Il est possible que dans les parcelles cultivées en SCV, la température du sol sous le mulch soit assez diminuée pour avoir un effet délétère sur la croissance des plantes et la vie biologique des sols. En effet, des études ont montré que la présence des résidus de culture en surface peut être à l'origine d'une diminution de la température du sol (Azooz et al., 1995), ce qui peut retarder l'émergence du couvert et l'absorption des nutriments dans des sols pauvres (Chassot et Richner, 2002). Il est également important de noter que toutes les parcelles expérimentales du site d'Andranomanelatra étaient cultivées en SCV depuis de très nombreuses années avant la mise en place du projet GARP. Les parcelles destinées à être cultivées en labour ont donc été labourées il y a trois ans et il est possible que les plantes cultivées sur ces parcelles profitent d'une importante minéralisation de l'azote organique accumulé en SCV (Reicosky et al., 1997). Il se peut également qu'une meilleure croissance racinaire en début de cycle chez les plantes cultivées en labour favorise ces dernières. Nous avons constaté dans nos essais un développement racinaire plus rapide en labour en début de cycle, dû sans doute à une meilleure porosité du sol labouré (Pinheiro et al., 2006). Ce meilleur développement racinaire pourrait conférer aux plantes cultivées en labour une meilleure croissance car elles seraient à même de puiser de l'eau et des nutriments plus profondément dans le sol si ces derniers venaient à manquer en surface. Nous avons néanmoins observé qu'à la floraison, ce sont les racines des plantes cultivées en SCV qui sont les plus profondes, mais nous pouvons penser que ce rattrapage a été trop tardif pour permettre au SCV de combler son retard de croissance.

Toutes ces raisons peuvent expliquer qu'à Andranomanelatra, le riz cultivé en SCV ait moins bien poussé que le riz cultivé en labour en début du cycle, et qu'il n'ait pas rattrapé ce retard par la suite. Néanmoins, cette croissance plus faible du riz cultivé en SCV n'est pas nécessairement une mauvaise chose puisque nous avons montré que c'est précisément la faible densité du couvert en SCV au moment du 4^{ème} prélèvement (mi-février) qui a protégé la variété F154 cultivée en SCV de la pyriculariose paniculaire et nous a permis d'obtenir des rendements similaires, bien que très faibles, en labour et en SCV pour cette variété.

Concernant le site d'Ivory, nous constatons pour les variétés F154 et Nerica4 que les rendements obtenus sont toujours significativement supérieurs en labour lorsqu'aucune fertilisation azotée minérale n'est appliquée, et que la différence de rendement entre les deux modes de gestion du sol s'estompe en condition de forte fertilisation azotée pour devenir non significative. Nous pouvons expliquer cela par le fait que les plantes cultivées en SCV avec la fertilisation F1 ont très peu poussé comparées aux plantes cultivées en labour avec la même fertilisation, mais que cette différence de croissance entre modes de gestion du sol s'est atténuée pour les fertilisations F2 et Fv. Il est possible qu'en SCV en condition de fertilisation basse (F1), les microorganismes immobilisent le peu d'azote présent, ce qui explique que nous ne retrouvons pas le même phénomène en labour où l'activité des microorganismes est moindre, et pour les fertilisations F2 et Fv où l'azote apporté sous forme d'urée est immédiatement disponible pour la plante sans avoir besoin d'être minéralisé au préalable par les microorganismes. Nous avons cependant noté une exception pour la variété B22 pour laquelle la différence de rendement observée entre le labour et le SCV n'est pas significative. Nous pouvons émettre l'hypothèse que les plantes de cette variété ont bien supporté les conditions de la fertilisation F1 lorsqu'elles étaient cultivées en SCV et que leur croissance n'a pas été trop affectée par la faible fourniture en azote.

Globalement, nous avons montré que le riz cultivé en SCV croissait moins bien que le riz cultivé en labour, avec des différences entre les deux sites expérimentaux dues aux conditions climatiques et aux conditions physico-chimiques des sols. Cette plus faible croissance du riz en SCV se caractérise notamment par une plus faible biomasse et un couvert végétal moins dense. Grâce à l'analyse statistique que nous avons menée, nous avons démontré que cette diminution de la densité du couvert est pour beaucoup dans le fait que le riz cultivé en SCV soit moins touché par la pyriculariose que le riz cultivé en labour. L'autre facteur déterminant dans la sévérité de la maladie est la teneur en azote des feuilles. Dans des conditions favorables aux SCV, comme sur le site d'Ivory, les plantes cultivées en SCV avec fertilisation azotée minérale ont pu rattraper le retard de croissance pris en début de cycle et compenser leur plus faible rendement par une meilleure tolérance à la pyriculariose. En revanche à Andranomanelatra, les conditions climatiques défavorables aux SCV n'ont pas permis à ces derniers de rattraper leur retard de croissance pris en début de cycle, et leur meilleure tolérance à la pyriculariose n'a pas suffi à effacer la différence de rendement entre les deux modes de gestion du sol. Enfin et pour remettre ces résultats en perspective, nous avons vu sur les deux sites expérimentaux que des facteurs autres que la pyriculariose (vent, oiseaux, retard de cycle...) sont responsables d'une grande partie des grains vides que nous observons, ce qui rend difficile l'étude de l'effet de la pyriculariose sur le rendement en fonction du système de culture.

Références bibliographiques

Azooz R.H., Lowery B., Daniel T.C. (1995) : Tillage and residue management influence on corn growth. *Soil and Tillage Research* **33** : 215-227

Chassot A. and Richner W. (2002) : Root characteristics and phosphorus uptake of maize seedlings in a bilayered soil. *Agronomy Journal* **94** : 118-127

Combe L., Picard D. (1994) : Elaboration du rendement des principales cultures annuelles, Editions Quae, p.54

Datnoff, L.E., Deren C.W., Snyder G. H. (1997) : Silicon fertilization for disease management of rice in Florida. *Crop Protection* **16** (6) : 525-531

FAO (2005) : Rapport sur l'eau, 29

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

Kim Y.S., Oh J.Y., Hwang B.K., Kim K.D. (2008) : Variation in sensitivity of Magnaporthe oryzae isolates from Korea to edifenphos and iprobenfos, *Crop Protection*, **27** : 1464-1470

Kürschner E., Bonman J.M., Garrity D.P., Tamisin M.M., Pabale D., Estrada B.A. (1992) : Effects of nitrogen timing and split application on blast disease in upland rice. *Plant Dis.* **76** : 384-389

Long D.H., Lee F.N., and TeBeest D.O. (2000) : Effect of nitrogen fertilization on disease progress of rice blast on susceptible and resistant cultivars. *Plant Dis.* **84** : 403-409

Mc Cullagh P., Nelder J.A. (1989) : Generalized Linear Models (second edition), Chapter 9 "Quasi-likelihood". Editions Chapman & Halls

Osuna-Canizalez F.J., De Datta S.K., Bonman, J.M. (1991) : Nitrogen form and silicon nutrition effects on resistance to blast disease of rice, *Plant and Soil* **135** : 223-231

Peng S., Garcia F.V., Laza R.C. Cassman K.G. (1993) : Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration, *Agronomy Journal* **85** : 987-990

Peng S., Laza R.C., Garcia F.V., Cassman K.G. (1995) : Chlorophyll meter estimates leaf area-based nitrogen concentration of rice. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **26** : 927-935

Pinheiro B.d.S., Castro E.d.M., Guimaraes C.M. (2006) : Sustainability and profitability of aerobic rice production in Brazil. *Field Crops Research* **97** : 34-42

Potter E., Wood J., Nicholl C. (1996) : SunScan canopy analysis system: Users manual. Delta-T Devices, Cambridge, UK.

Rajeriarison P., Urfer S. 201 S., Tharreau D., Notteghem J.L., Lebrun M.H., Morel J.B. (2008) : Susceptibility of the rice to the blast fungus, Magnaporthe grisea, *Journal of Plant Physiology* **165** : 114-124

Reicosky D.C., Dugas W.A., Torbert H.A. (1997) : Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. *Soil and Tillage Research* **41** : 105-118

Ribot, C., Hirsch, J., Balzergue, S., Tharreau, D., Notteghem, J.L., Lebrun, M.H., and Morel, J.B. (2008) : Susceptibility of rice to the blast fungus, *Magnaporthe grisea*. *J. Plant Physiol.* **165** : 114–124

Sas Online Doc® 9.3. Sas Institute Inc., Cary, NC (USA)

Seebold K.W., Datnoff L.E., Correa-Victoria F.J., Kucharek T.A., Snyder G.H. (2000) : Effect of Silicon Rate and Host Resistance on Blast, Scald, and Yield of Upland Rice, *Plant Disease* **84** : 871-876

Seebold, K.W., Datnoff, L.E., Correa-Victoria, F.J., Kucharek, T.A., and Snyder, G.H. (2004) : Effects of silicon and fungicides on the control of leaf and neck blast in upland rice. *Plant Disease* **88** : 253-258

Sester M., Raboin L. M., Ramanantsoarinina 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., Michellon R., Dusserre J., Tharreau D. (2010) : Cropping system to limit blast disease in upland rice. In : 5th International Rice Blast Meeting, Little Rock, Arkansas, USA

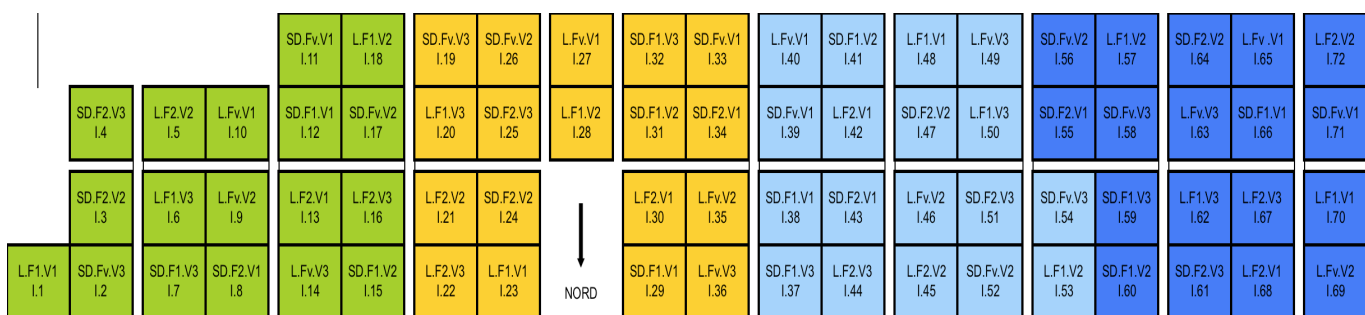
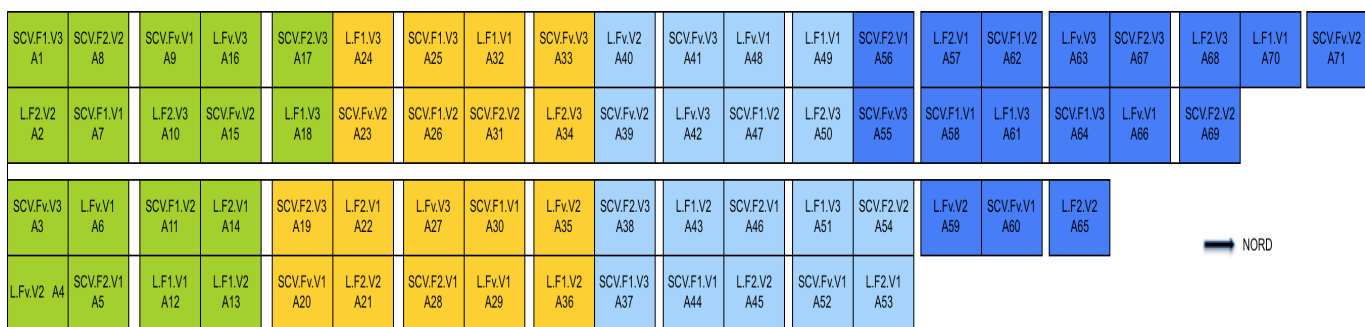
Sone C., Saito K., Futakuchi K. (2009) : Comparison of three methods for estimating Leaf Area Index of upland rice cultivars, *Crop Science* **49** : 1438-1443

Zhu Y., Chen H., Fan J., Wang Y., Li Y. (2000) : Genetic diversity and disease control in rice. *Nature* **406** : 718-722

Annexes :



Annexe 1 : Carte de Madagascar. Les deux sites expérimentaux du projet GARP sont situés dans la région du Vakinankaratra (entourée en rouge)



Annexe 2: Plan des parcelles expérimentales d'Andranomanelatra (haut) et Ivory (bas).
L=labour, SD=semis direct (SCV). Vert=bloc A, jaune=bloc B, bleu ciel=bloc C, bleu=bloc D