



ATHENEE SAINT JOSEPH ANTSIRABE

(A.S.J.A.)

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DE
DIPLOME D'INGENIEUR**

En

Filière: Sciences Agronomiques

Option: Production végétale

**ANALYSE DES EFFETS DE LA SILICE DU
SOL SUR LA SENSIBILITE DU RIZ
PLUVIAL A LA
PYRICULARIOSE**

Soutenu par

RANDRIABEHAJA Franklin, le 14/11/2013

Devant les membres de jury Composé de

Président :

Rapporteurs: Madame Sahondra ANDRIAMALAZA, docteur en Pédologie

Monsieur BECQUER Thierry, docteur en Pédologie

Examineurs: Monsieur RABARY Eugène, Agronome sélectionneur

Madame DUSSERE Julie, Docteur en Ecophysiologie





ATHENEE SAINT JOSEPH ANTSIRABE

(A.S.J.A.)

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DE
DIPLOME D'INGENIEUR**

En

Filière: Sciences Agronomiques

Option: Production végétale

**ANALYSE DES EFFETS DE LA SILICE DU
SOL SUR LA SENSIBILITE DU RIZ
PLUVIAL A LA
PYRICULARIOSE**

Soutenu par

RANDRIABEHAJA Franklin, le 14/11/2013

Devant les membres de jury Composé de

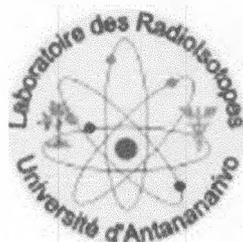
Président :

Rapporteurs: Madame Sahondra ANDRIAMALAZA, docteur en Pédologie

Monsieur BECQUER Thierry, docteur en Pédologie

Examineurs: Monsieur RABARY Eugène, Agronome sélectionneur

Madame DUSSERRE Julie, Docteur en Ecophysiologie



DEDICACES

Je dédie ce mémoire spécialement à :

❖ MA FAMILLE

Pour leur soutien moral et financier depuis mon enfance jusqu'à maintenant, et qu'elle le considèrera comme un signe de récompense et de gratitude en faveur de ses sacrifices et ses persévérances.

❖ A MES PROMOTIONS D'ETUDES

En souvenir des bons et mauvais moments passés ensemble, que Dieu tout puissant vous gardera toujours sur le bon chemin dans vos futures aventures.

REMERCIEMENTS

Gloire et louange au **Seigneur Haute Suprême** Tout Puissant sans qui je ne serais pas arrivée à ce stade. Par sa grâce infinie, il a voulu que ce travail soit effectué par son humble serviteur. Nos cinq années d'études en tant qu'étudiant-ingénieur en Agronomie ainsi que ce travail n'a pu s'accomplir sans contribution de nombreuses institutions et de leurs acteurs principaux, aussi, j'adresse mes sincères remerciements à :

- Père Directeur Général **CUOMO MARIO Giuseppe**, Fondateur de l'université ASJA pour ses initiatives et ses envies inébranlables de faire entrer notre pays dans une nouvelle ère de développement, à travers ses relèves;
- Professeur **RALAMBORANTO Laurence**, et Recteur de l'ASJA, pour ses immenses responsabilités pédagogique et andragogique qu'elle a fait preuve durant une décennie d'existence de l'A.S.J.A et qui m'a donné l'autorisation de présenter publiquement le fruit de mon travail de recherche pendant cette soutenance de mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur Agronome;
- Professeur **Lilia RABEHARISOA**, Directeur du Service de la Radio Agronomie au LRI, de m'avoir donné la chance et une énorme opportunité d'effectuer mon stage de recherche au sein du laboratoire;
- Professeur **Sophie GOEDEFROIT**, Anthropologue et Représentant de l'IRD à Madagascar, pour son accord de m'avoir accepté comme stagiaire au sein de l'IRD;

, d'avoir bien voulu présider cette séance de soutenance, et de bien vouloir apporter ces visions critiques constructives de ce travail de ce document.

- Docteur **Sahondra ANDRIAMALAZA**, pédologue à l'A.S.J.A., d'être mon encadreur pédagogique, pour ses conseils précieuses et ses persévérances malgré son état de santé et ses lourdes responsabilités, toutes mes sincères reconnaissances.
- Docteur **BECQUER Thierry**, pédologue à l'IRD, d'être mon encadreur professionnel, de m'avoir accordé ce stage de recherche, pour ses encadrements enrichissants et ses encouragements bienveillants;
- Monsieur **RABARY Eugène**, Ingénieur et sélectionneur spécialiste du riz, enseignant à l'ASJA et mon examinateur, pour sa volonté d'apporter ses appréciations et ses critiques de ce travail de recherche.
- Madame **DUSSERRE Julie**, Docteur en écophysiologie, d'avoir bien voulu examiner et améliorer la qualité de ce travail de recherche.
- Docteur **Mathilde SESTER**, épidémiologiste au CIRAD, pour ses apports scientifiques et techniques dans la conduite de notre expérimentation, et pour l'accomplissement de cette recherche;
- Monsieur **Jean LARVY DELARIVIERE**, chimiste à l'IRD, pour ses conseils pleins de motivation et ses encadrements techniques dans la réalisation de tous nos analyses chimiques au sein du laboratoire LRI;
- Tous les personnels Enseignants et Administratifs de l'ASJA, en particulier ceux du département Sciences Agronomiques, pour leurs efforts pleins d'enthousiasme;
- Toute l'équipe du Laboratoire des Radio-Isotopes, et de FOFIFA d'Antsirabe d'être toujours bienveillants et accueillants et d'avoir bien voulu partager avec moi leurs expériences et connaissances;

RESUME

La riziculture pluviale constitue en grande partie une forme de production du riz sur les Hauts Terre de Madagascar. Le nombre de pratiquant et la surface exploitée ne cessent de croître à chaque année. Malgré cette évolution, le riz cultivé sur ce type d'environnement rencontre quelques problèmes phytosanitaires, à savoir la fameuse maladie cryptogamique dénommée : la pyriculariose ».

Dans le cadre de la protection de cette culture contre cette épidémie, nous avons conduit une étude spécifique analysant les effets de la silice du sol sur la sensibilité du riz pluvial à la pyriculariose. De ce fait, nous avons effectué une expérimentation au champ en apportant comme source de silice : la balle de riz, la cendre de balle de riz, et le sol de Betafo; accompagnée par des suivies phytopathologiques et agronomiques et des analyses chimiques des échantillons du sol et des échantillons de la paille du riz au Laboratoire RadioIsotope. Nos objectifs de recherche sont orientés vers la détermination de l'implication de la silice par son effet prophylactique dans la lutte contre cette maladie. En effet, les composantes de rendements, les taux d'infestations de la maladie et les teneurs de quelques éléments minéraux (la silice totale dans la plante et dans le sol, la silice labile dans le sol, l'azote totale dans la plante, le phosphore totale dans la plante, le pH_{eau} et pH_{KCl}) ont été déterminés.

Nos résultats ont montré que l'apport en balle de riz et de cendre n'ont pas permis d'augmenter la teneur en silice labile du sol d'Andranomanelatra. Ces teneurs sont peut-être insuffisantes ou les produits utilisés sont très peu solubles. Et l'infestation est très modérée, même pour le témoin, ce qui rend difficile la conclusion sur les effets des apports de la silice. Et durant cette campagne la variété F152 est marquée par un faible taux d'infestations en moyenne général de 5%. Pour les trois types de rendements, l'analyse des variances (ANOVA) ne trouve aucune différence significative entre les 5 traitements.

Mots clés : Phytosanitaire, environnement, cryptogamique, pyriculariose, phytopathologie, teneurs, laboratoire, silice, riz pluvial, variance, Andranomanelatra.

ABSTRACT

Rain rice growing mainly constitutes the shape of production of rice on the Highland of Madagascar. The number of practitioner and exploited surface do not cease an increase at each year. In spite of this evolution, the rice cultivated on this type of environments encounters some plant health problems, namely the famous cryptogamic disease called: the pyriculariose ".

Within the framework of the protection of this culture against this epidemic, we led a study specific analyzing the effects of the silica of the ground on the sensitivity of rain rice to the pyriculariose. So we carried out an experimentation with the field while bringing like source of silica: the rice ball, the ash of rice ball, and ground of Betafo; accompanied by followed phytopathological the and agronomic ones and chemical analyses by the samples by the ground and samples by the straw by rice to the RadioIsotope Laboratory. Our objectives of research are directed towards the determination of the implication of silica by its prophylactic effect in the fight against this disease. Indeed, the components of outputs, the rates of infestations of the disease and the contents of some biogenic salts (silica total in the plant and the ground, unstable silica in the ground, nitrogen total in the plant, phosphorus total in the plant, the pH water and pH KCl were given.

Our results showed that the contribution in ball of rice and ash did not make it possible to increase the unstable silica content of the ground of Andranomanelatra. These contents are perhaps insufficient or the products used are far from soluble. And the infestation is very moderate, even for the witness, which makes difficult the conclusion on the effects of the contributions of silica. And during this program the F152 variety is marked by a weak rate of infestations on average general of 5%. For the three types of outputs, analyzes it variances (ANOVA) does not find any difference significant between the 5 treatments.

Key words: Plant health, environment, cryptogamic, pyriculariose, phytopathology, contents, laboratory, silica, rain rice, variances, Andranomanelatra.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Cycle de développement du riz pluvial.....	6
Figure 2: Cycle d'infection foliaire de la pyriculariose (26°C).....	12
Figure 3 : Cycle continental du silicium dans le système sol-plante.....	17
Figure 4: Solubilité de la silice amorphe en fonction de la température et du pH.....	20
Figure 5 : Représentation schématique du système de transport de la silice chez le riz, présentant la localisation des deux transporteurs Lsil et Lsi2.....	22
Figure 6: Prise, distribution et accumulation du silicium (silicium) en riz.....	25
Figure 7 : Localisation de la commune d'Andranomanelatra et du site d'expérimentation Nutrition 2012-2013(ESSAI NUTRITION).....	30
Figure 8 : Courbe ombrothermique de Gaussen d'Andranomanelatra (2002-2012).....	31
Figure 9 : Dispositif nutrition 2012-2013 d'Andranomanelatra.....	33
Figure 10 : Comparaison des pH_{eau} et pH_{KCl} du sol entre les divers traitements du dispositif nutrition.....	43
Figure 11: Comparaison des teneurs en silice total des échantillons des sols des divers traitements	44
Figure 12 : Comparaison des teneurs en silice labile des échantillons des sol des divers traitements.....	44
Figure 13 : Comparaison des teneurs en silice des échantillons des pailles du riz des divers traitements.....	45
Figure 14 : Comparaison des teneurs en phosphore total dans la paille des échantillons du riz des divers traitements.....	45
Figure 15 : Comparaison des teneurs en azote total des échantillons des pailles de riz des divers traitements.....	46
Figure 16 : Comparaison des rendements de paille de la variété de riz pluvial de F152.....	47

Figure 17 : Comparaison des rendements de graines non triés de la variété F152 des divers traitements	48
Fig.18 : Comparaison des rendements de graines pleines de la variété du riz pluvial F152 des divers traitements	48
Figure 19 : Distribution des taux de sévérités de la variété F152 suivant les 4 stades de développement.....	49
Figure 20 : Cercle de corrélation des variables étudiés.....	50
Figure 21: Cercle de corrélation sans le traitement sol Betafo (T3).....	51

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Variétés F152 et F172 en pleines maturités au champ d'expérimentation.....	32
Photo 2 : Emplacement des parcelles d'expérimentations « Nutrition 2012-2013 ».....	35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Conditions climatiques optimums pour le riz pluvial.....	5
Tableau 2: Rôles agronomiques des éléments minéraux	7
Tableau 3: Doses prescrites des fumures avec leurs périodes d'épandage	8
Tableau 4 : Les concentrations critiques en macroéléments et en microéléments important....	9
Tableau 5 : Variétés de riz pluvial d'altitude : généalogie, années de nomination, statuts en termes de diffusion.....	10
Tableau 6: Les organes infectés par la pyriculariose et ses symptômes.....	13
Tableau 7: Classification des minéraux silicatés.....	18
Tableau 8 : Classification des végétaux selon leurs teneurs en silice.....	21
Tableau 9: Chronogramme des activités.....	28
Tableau 10: Matériels de prélèvement et préparation des échantillons.....	33

LISTES DES ANNEXES

Annexe I : Matériels et produits de laboratoire	I
Annexe II : Matrice de corrélation du 1 ^{er} cercle de corrélation (avec sol de Betafo).....	IV
Annexe III : Matériel de corrélation du 2 ^{ème} cercle de corrélation (sans sol de Betafo).....	IV
Annexe IV : Tableau de donnée pour l'Analyse de Composante Principale (ACP)	V
Annexe V : Résultats statistiques de l'analyse de la variance (ANOVA).....	VI

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

% : pour cent

°C : degré Celsius

µm : micron mètre

Å : angstrom

ADN : acide désoxyribonucléique

ARN : acide ribonucléique

CEC : capacité d'échange cationique

cm : centimètre

cmol : centimole

g : gramme

ha : hectare

Kg : kilogramme

L: litre

m : mètre

m² : mètre carré

MAEP : Ministère de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche

Mg : méga gramme

mg : milligramme

mm : millimètre

MO : matière organique

pH : Potentiel Hydrogène

PIB : Produit Intérieur brute

ppm : partie par million

SCV : semis direct sous couverture végétale

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

RESUME/ABSTRACT

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS-TABLEAUX-ANNEXES

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION..... 1

PREMIERE PARTIE: SYNTHESES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I: LE RIZ PLUVIAL 3

1.1-GENERALITE SUR LE RIZ PLUVIAL..... 3

1.1.1-Origine et description botanique 3

1.1.2-Ecologie 4

1.1.3-Cycle biologique 5

1.2-FERTILISATION ET BESOINS DU RIZ 6

1.2.1-Rôles agronomiques des éléments minéraux majeurs 6

1.2.2-Fumure organique 8

1.2.3-Fumure minérale 8

1.3-DIVERSES CONTRAINTES POUR LA PRODUCTION DU RIZ 8

1.3.1- Contraintes relatives au sol 8

1.3.2-Contraintes relatives au climat..... 9

1.3.3-Contraintes biologiques..... 10

CHAPITRE II: LA PYRICULARIOSE..... 11

2.1-IMPORTANCES, GENERALITES DE LA PYRICULARIOSE ET BIOLOGIE DE *MAGNAPORTHE ORYZAE*..... 11

2.1.1- Importance 11

2.1.2- Généralités..... 11

2.1.3- Biologie de *Magnaporthe oryzae*..... 11

2.2- SYMPTOMES - DEGATS ET CONDITIONS FAVORABLES A L'EPIDEMIE..... 13

2.2.1- Symptômes –dégâts..... 13

2.2.2- Conditions favorables à l'épidémie..... 14

2.3-LUTTES INTEGREES..... 14

2.3.1-Variétés résistantes..... 14

2.3.2-Les systèmes de cultures..... 15

CHAPITRE III: LA SILICE DANS L'AGRICULTURE..... 16

CHAPITRE III: LA SILICE DANS L'AGRICULTURE 16

3.1-LA SILICE DANS LE SOL	16
3.1.1- <i>Le cycle global de la silice</i>	16
3.1.2- <i>Altération des minéraux silicatés en minéraux argileux</i>	17
a) Mécanisme d'altération des silicates.....	18
b) La structure des minéraux argileux	19
c) Formation des minéraux argileux.....	19
3.1.3- <i>Le silicium dans la solution du sol</i>	20
3.2- LA SILICE CHEZ LA PLANTE	20
3.2.1- <i>Teneur en silice des plantes cultivées</i>	20
3.2.2- <i>Mode d'absorption</i>	21
3.2.3- <i>Rôles potentiels de la silice</i>	23
3.3- EFFETS BENEFIQUES DE LA SILICE.....	25
3.3.1- <i>Effets sur la croissance</i>	25
3.3.2- <i>Résistance aux stress abiotiques et biotiques</i>	26
3.3.3- <i>Apports de la silice et mécanisme de défense de la plante</i>	26

DEUXIEME PARTIE: CONTEXTE ET CADRE DE L'ETUDE, MATERIELS ET METHODES

CHAPITRE I : CONTEXTE GENERAL ET CADRE DE L'ETUDE 27

1.1-CONTEXTE GENERAL ET JUSTIFICATION DE L'ETUDE	27
1.2-OBJECTIFS	28
1.3-CADRE GENERAL DE L'ETUDE.....	28
1.4-PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	30
1.4.1- <i>Situation géographique</i>	30
1.4.2- <i>Conditions pédoclimatiques</i>	31
1.4.3- <i>Description pédologique du site d'Andranomanelatra</i>	31

CHAPITRE II : MATERIELS..... 32

2.1 -MATERIEL VEGETAL	32
2.2-LE SOL	32
2.3- DISPOSITIF EXPERIMENTAL	33
a) Système de culture	34
b) Description	34

CHAPITRE III : METHODES 36

3.1- MESURE DU NIVEAU D'INFESTATION PAR LA PYRICULARIOSE	36
3.1.1- <i>Suivi de la pyriculariose foliaire</i>	36
3.1.2- <i>Suivie de la pyriculariose paniculaire</i>	36

3.2- ANALYSE AU LABORATOIRE.....	38
3.2.1- Détermination du pH.....	38
3.2.2-Détermination des teneurs en silice du sol.....	38
3.2.3-Détermination des teneurs en silice labile du sol.....	39
3.2.4-Dosage colorimétrique.....	40
3.2.5-Détermination de teneur en silice, en phosphore et en azote dans la plante.....	40
a) Extraction de silice et de phosphore par calcination.....	40
b) Dosages de phosphore et de silice totaux dans la plante.....	41
c) Extraction et dosage en azote total dans la paille du riz.....	41
3.3-ANALYSE STATISTIQUE DES RESULTATS.....	42

TROISIEME PARTIE: ANALYSES DE RESULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE I : ANALYSES DES RESULTATS.....	43
1.1-RESULTATS DES ANALYSES DES ECHANTILLONS DU SOL.....	43
1.1.1-pH _{eau} et pH _{KCl}	43
1.1.2-Teneurs en silice total.....	43
1.1.3-Teneurs en silice labile (Oxalate d'ammonium).....	44
1.1.4 Teneur en silice labile (Bicarbonate de Sodium).....	45
1.2- RESULTATS DES ANALYSES DES ECHANTILLONS DU RIZ.....	45
1.2.1- Teneurs en silice total.....	45
1.2.2- Teneurs en phosphore total.....	45
1.2.3-Teneur en azote total.....	46
1.3-RESULTATS DES COMPOSANTES DE RENDEMENT.....	47
1.3.1-Rendement de pailles par types de traitement.....	47
1.3.2-Rendements moyens de graines non triés par traitement.....	47
1.3.3-Rendements moyens de grains pleins par traitement.....	48
1.4- RESULTATS SUR LA SEVERITE DE PYRICULARIOSE.....	49
1.5-CORRELATION INTRA ET INTER CARACTERISTIQUES.....	49
CHAPITRE II : DISCUSSION.....	52
2.1- A PROPOS DE LA METHODOLOGIE.....	52
2.2-EFFETS DE LA FERTILISATION SILICATE SUR L'EPIDEMIE DE LA PYRICULARIOSE.....	52
2.3-EFFETS DE LA PYRICULARIOSE ET DES APPORTS EN SILICE SUR LE RENDEMENT DE LA VARIETE F152.....	53
2.4-RELATION ENTRE LA NUTRITION ET LE STATUT NUTRITIONNEL DU RIZ.....	53
2.5-VERIFICATION DES HYPOTHESES.....	54
CONCLUSION ET PERSPECTIVE.....	55
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	56

INTRODUCTION

L'élaboration d'une stratégie de développement agricole durable, efficiente et surtout respectueuse de l'environnement est primordiale dans les pays en voie de développement pour satisfaire les besoins locaux en réduisant au minimum possible l'ampleur du cout de l'importation des produits agricoles. Madagascar, deuxième pays rizicole du continent africain (après l'Egypte), a produit 4,5 millions de tonnes de paddy en 2012 selon le service statistique agricole du ministère de tutelle. Cette production ne suffit pas à couvrir les besoins de la population estimée à 22 599 098 personnes (estimation en juillet 2013). Pour éviter de grave problème d'insécurité alimentaire et nutritionnelle, aggravés cette année par l'invasion de criquet, l'Etat Malgache devrait importer en 2013, 360 000 tonnes de riz ce qui représente 25% du besoin total du pays (FAOSTAT, 2012).

Sur les Hautes Terres malgaches, les bas-fonds sont quasiment saturés et les paysans commencent à exploiter les collines. Dans la région du Vakinankaratra 42,7% des *tanety* ne sont pas encore cultivées (MAEP, 2002). Avec l'apparition de nouvelles variétés résistantes au froid, développées par le programme « riz d'altitude » du FOFIFA et du CIRAD la riziculture pluviale s'est bien développée dans la région durant ces dernières années. Cependant, le riz en système pluvial se trouve confronté à plusieurs problèmes agronomiques, notamment la pyriculariose, maladie fongique causée par *Magnaporthe oryzae*, qui peut affecter fortement le riz (Kürschner et al, 1994). La connaissance des conditions d'apparition des épidémies et des facteurs environnementaux ou agronomiques qui peuvent influencer leur développement est un élément important de la lutte intégrée contre la pyriculariose. En outre, la gestion agronomique a un effet majeur sur l'intensité des épidémies à l'échelle de la parcelle (Sester et al, 2013) et peut donc contribuer à augmenter la durabilité d'une stratégie de lutte en maintenant une pression parasitaire faible. De nombreuses recherches ont été effectuées dans ce domaine, mais le risque d'épidémies importantes de pyriculariose persiste et reste un vrai sujet de débats. Une des hypothèses pour expliquer les différences d'épidémies entre parcelles est que la teneur en silice de la plante augmente la résistance du riz face à la pyriculariose (Ma et al, 2006). Pour pouvoir tester cette hypothèse, les chercheurs Fofifa et Cirad de l'équipe SCRID (Système de Culture et Riziculture Durables) ont mis en place une étude expérimentale au champ, centrée sur l'implication de la silice dans son rôle bioactif pour la lutte contre cette maladie cryptogamique. Dans le cadre d'un partenariat avec le Laboratoire des RadioIsotopes (LRI) de l'université d'Antananarivo et avec l'UMR Eco&Sols

de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), j'ai réalisé une étude visant à analyser au laboratoire les teneurs en silice des sols et des plantes afin de déterminer le lien entre ces teneurs et le niveau d'infestation du riz par la pyriculariose dans diverses conditions.

Le silicium est un élément abondant dans la croûte terrestre. Son absorption aurait des effets bénéfiques chez plusieurs plantes, parmi lesquels l'accroissement de la résistance à divers stress biotiques et abiotiques est le mieux documenté. La théorie initialement avancée pour expliquer son rôle, notamment dans le contexte d'interactions plante-agent pathogène, est celle de la « barrière mécanique » qui stipule qu'une couche subcuticulaire de silice empêcherait la pénétration d'agents pathogènes fongiques (Seebold et al, 2004). En effet, la plus grande partie du silicium absorbé par une plante est polymérisée de façon irréversible sous forme de phytolithes (silice amorphe, $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) (François Fauteux, 2006).

Le thème de la présente recherche porte sur « l'analyse des effets de la silice sur la sensibilité du riz à la pyriculariose ». Il vise à déterminer **comment se comportera le riz pluvial face à la pyriculariose après un amendement siliceux ?** Pour répondre à cette question, trois hypothèses de recherche ont été avancées:

- ❖ H1 : **Les caractéristiques naturelles des sols (sols de Betafo ou Andranomanelatra) ou des apports riches en silice (cendre, résidus) modifient la teneur en silice labile (disponible) des sols ;**
- ❖ H2 : **L'augmentation de la teneur en silice labile dans le sol affecte la teneur en silice des plantes et contribue à améliorer la croissance de la culture de riz ;**
- ❖ H3: **La fréquence et la sévérité de la pyriculariose décroît en fonction de la teneur de la silice labile dans le sol et la plante.**

Ainsi, ce travail comporte trois grandes parties qui :

- **Première partie:** Synthèse bibliographique traitant le riz pluvial, la silice et la pyriculariose tout en évoquant les diverses interactions qu'ils entretiennent entre eux.
- **Deuxième partie:** Problématique, cadre de l'étude, ainsi que les matériels et méthode tout en précisant les diverses approches scientifiques et expérimentale d'analyse des résultats.
- **Troisième partie:** Analyses et interprétations des résultats. Une brève conclusion achèvera ce travail tout en ouvrant une porte au futur thème de recherche dans ce domaine.

PREMIERE PARTIE:
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I: LE RIZ PLUVIAL

1.1-Généralités sur le riz pluvial

Le riz cultivé à Madagascar comporte de nombreuses variétés locales et quelques variétés améliorées. La superficie rizicole malgache est estimée à 1.330.000 hectares dont environ 20% est en système pluvial (MAEP, 2005).

Depuis les années 1980, un programme d'amélioration variétale a permis l'obtention de variétés de riz pluviales adaptées à l'altitude et la culture du riz pluvial sur les Hautes Terres malgaches. Toutefois, la base génétique des premières variétés issues de ce programme était très étroite. Une grande partie était issue de parents extraits d'une population locale « *Latsika* », mondialement reconnue comme l'une des plus tolérantes au froid (Dzido *et al*, 2004).

Par ailleurs, le riz pluvial est d'habitude cultivé sur des sols ferrallitiques des collines (tanety). Ce type de sol est caractérisé par une dissolution totale des minéraux primaires, et une exportation des bases et de la silice à la concentration relative du fer et de l'aluminium (Legros, 2007). Le sol en question est donc pauvre en bases échangeables et en silice. En outre, il a une teneur élevée en fer et en aluminium qui sont des éléments susceptibles d'être toxiques pour les plantes. A cela s'ajoute un pH acide. Toutes ces conditions pédologiques soumettent le riz à un état de fragilité qui le rend plus sensible aux maladies.

Dans la région du vakinankaratra, la promotion du riz pluvial entraîne une nette augmentation des superficies depuis les cinq dernières années. Il occupe actuellement la cinquième position en termes de superficie et la sixième en termes de quantité de production. Avec un rendement moyen de 2,5 tonnes à l'hectare, on a enregistré une production totale annuelle plus de 6 000 tonnes. Cette dernière représente alors 7% de la production rizicole du District d'Antsirabe II (CSA LOVA Antsirabe II, 2010).

1.1.1-Origine et description botanique

Le riz est une plante monocotylédone de la famille des graminées et du genre *Oryza*. Le genre *Oryza* comprend de nombreuses espèces sauvages et deux espèces cultivées : *Oryza sativa* et *Oryza glaberrima*. Ces deux espèces cultivées ont des origines géographiquement différentes : *Oryza sativa* a été domestiquée en Chine et en Inde et est majoritairement cultivée à Madagascar et dans les autres pays rizicoles du monde tandis qu'*Oryza glaberrima* a été domestiquée dans l'ancien delta du fleuve Niger au Mali et est en régression (Lacharme, 2001a).

Actuellement, il existe un très grand nombre de variétés. Elles sont généralement regroupées en deux types : le type *indica* regroupant les variétés à grains plutôt longs et asymétriques adaptées au climat tropical et le type *japonica* englobant les variétés à grains plutôt ronds et symétriques cultivées en climat subtropical et tempéré (Arraudeau, 1998). Du côté génétique, le génome du riz est relativement petit, mais présente de grandes similitudes avec celui des autres céréales dans l'arrangement de ses gènes (Second, 2004).

1.1.2-Écologie

Le riz est une graminée très répandue dans le monde. On peut le trouver sur une large gamme d'écosystèmes. Comme chez les autres plantes, les facteurs pédoclimatiques ont chacun une influence plus ou moins importante sur son développement. Toutefois, les conditions optimums de ces paramètres seront présentées ci-après (tableau 1) :

- ⚡ **Humidité** : Certaines variétés de riz irrigué contrairement aux variétés pluviales, tolèrent mieux un excès d'humidité par rapport aux autres graminées mais ne supporte pas un engorgement d'eau et une sécheresse prolongés. Ce besoin est croissant avec l'âge de la plante et largement différent suivant la performance génétique des variétés du riz.
- ⚡ **Température** : Les besoins en température sont variables suivant les stades. Le riz n'est pas adapté aux climats froids. Une température dépassant les 50°C est généralement létale tandis que les variétés adaptées à l'altitude peuvent se développer à des températures basses de 10 °C.
- ⚡ **Sol et pH**: Si la pluviosité est régulière, le riz pousse sur une large gamme de sol, si elle est aléatoire, le riz a besoin d'un sol à bonne capacité de rétention d'eau. En général, les sols équilibrés sont les plus propices, c'est-à-dire, les sols qui possèdent une proportion équivalente en argile, limon et sable. Par ailleurs, un sol qui a un pH compris entre 5 et 8 est nécessaire pour le développement du riz, (Jacquot et Courtois, 1983).
- ⚡ **Vent** : Un vent violent peut entraîner la verse et perturbe le processus de la fécondation.
- ⚡ **Photopériodisme** : Le riz est une plante héliophile. Plusieurs variétés sont photopériodiques, notamment ceux appartenant au type *indica*. Ces variétés ne fleurissent que lorsque la longueur du jour décroît jusqu'à un niveau critique. Leur floraison se fait donc à une date fixe quelle que soit la date de semis (Arraudeau, 1998).

mais les variétés
pluviales sur
Haute-terres
sont plus
photo-dépendantes

Tableau 1: Conditions climatiques optimums pour le riz pluvial

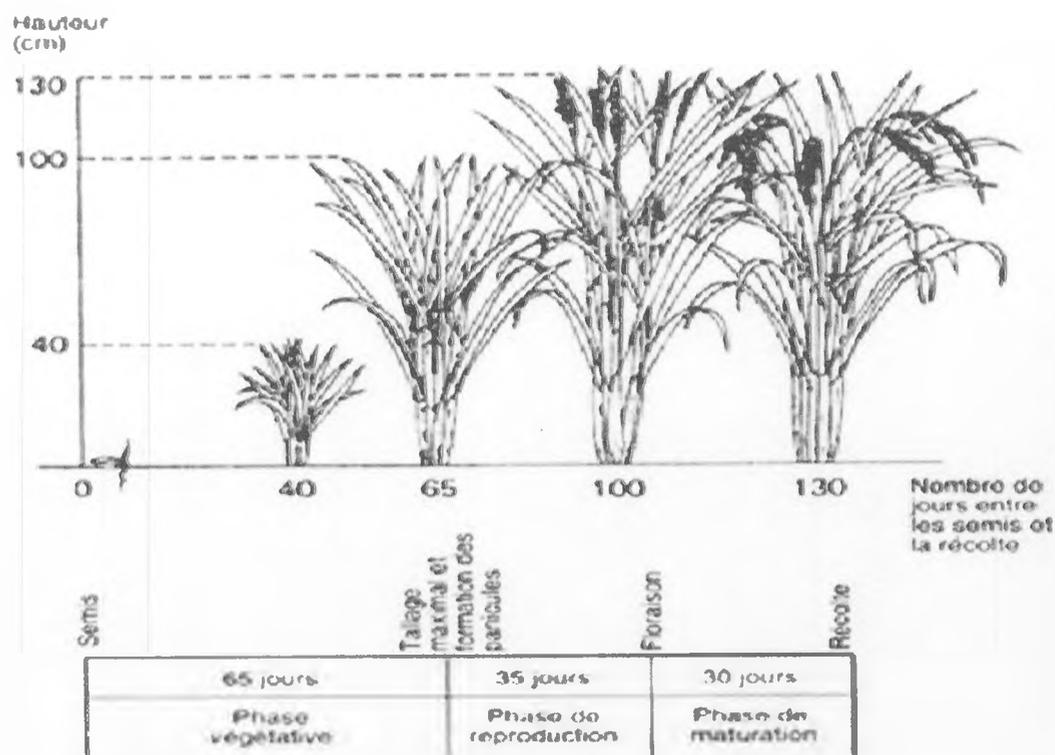
Paramètres climatiques	Valeurs et caractéristiques
Humidité	▪ 160 –300mm /mois : humidité optimale pendant la période végétative,
Température	▪ 28°C à 30°C : température optimale durant tout le cycle du riz pluvial,
Sol et pH	▪ 6 à 7 : pH optimal du sol de culture du riz pluvial
Vent	▪ Vent léger ≤ 2 km/heure : favorable à la transpiration de la plante du riz,
Intensité lumineuse	▪ 500 calories/cm ² /jour : radiation optimale journalière.

Source : Jacquot et Courtois, (1983).

1.1.3-Cycle biologique

Ce cycle comporte trois phases :

- ✦ **Phase végétative :** La phase végétative comprend la germination, la levée et le tallage et dure du semis jusqu'à la phase de différenciation paniculaire ou initiation paniculaire. Elle commence par la germination qui dure 3 à 4 jours, puis la feuille primaire émerge à la surface du sol, c'est la levée .A partir de la troisième semaine, les plantules commencent à émettre des talles, puis l'élongation des entre-nœuds de la tige fait augmenter la hauteur de la plante.
- ✦ **Phase reproductive :** c'est la phase comprise entre l'initiation paniculaire et la fécondation. Elle comprend l'initiation paniculaire, la montaison, l'épiaison et la fécondation. Le tallage s'arrête à partir de l'initiation paniculaire.
- ✦ **Phase de remplissage des graines et maturation :** Cette phase commence par la fécondation et se termine par la maturation des grains. Le remplissage des grains par le transfert des éléments nutritifs de la plante vers les grains s'effectue pendant cette phase. Ainsi, les grains passent successivement par trois états : laiteux, pâteux et mature (Lacharme, 2001b).



- La durée de la phase végétative varie selon les variétés
- Les phases de reproduction et de maturation sont assez constantes pour la plupart des variétés.
- La phase de reproduction dure environ 35 jours, la phase de maturation dure environ 30 jours
- Le temps qui sépare les semis de la récolte varie de 90 à 180 jours ou plus

Fig. 1: Cycle de développement du riz pluvial

Source : « Mémento Technique de Riziculture », Marc Lacharme, mai 2001b

1.2-Fertilisation et besoins du riz

1.2.1-Rôles agronomiques des éléments minéraux majeurs

Le sol et la fertilisation doivent apporter les éléments nécessaires à la plante pour atteindre les prévisions de rendement. Les plus importants d'entre eux sont : l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K). En plus de ces trois éléments nutritifs majeurs, la plante doit trouver dans le sol des éléments nutritifs secondaires tels que : soufre, calcium, magnésium (tableau 2).

Tableau 2: Rôles agronomiques des éléments minéraux

	Eléments	Rôles agronomiques
E	Azote (N)	-Permet une croissance vigoureuse des plants de riz pendant la phase végétative. -Assure le verdissement de la culture correspondant à l'accroissement de la teneur en chlorophylle et une

L E M E N T S M A J E U R S		bonne performance photosynthétique.
	Phosphore (P)	<ul style="list-style-type: none"> - Favorise la croissance racinaire du riz, le tallage ainsi que la formation et le rendement en grains. - Le phosphore absorbé au cours de la phase de tallage a une influence positive sur la production de grains. - Intervient aussi dans les réactions chimiques nécessitant de l'énergie, la division cellulaire et le développement des tissus du méristème.
	Potassium (K)	<ul style="list-style-type: none"> - Il favorise le tallage et accroît la taille et le poids des grains. - Il permet à la plante de mieux résister à la verse, aux attaques de maladies et d'insectes et à la sécheresse. - Il détient un effet synergique avec le phosphore.
E L E M E N T S S E C O N D A I R E S	Calcium (Ca)	<ul style="list-style-type: none"> -Il stimule le bon développement et la croissance des racines. C'est un constituant essentiel des membranes cellulaires. - Il joue également un rôle dans la division cellulaire (mitose) et dans le maintien de la structure des chromosomes. - Enfin, il est un activateur important d'enzymes et un neutralisant des acides organiques.
	Magnésium (Mg)	<ul style="list-style-type: none"> - En plus d'assurer une fonction similaire à celle du calcium, c'est l'un des constituants majeurs de la chlorophylle et de plusieurs enzymes essentiels dans la plante de riz.

Source : Akintayo et al, (2008).

1.2.2-Fumure organique

Elle a une importance majeure dans la culture du riz pluvial. En effet, les sols pluviaux sont en général pauvres en matière organique (1 à 3,5 % Henin et Dupuis, 1945). Aussi on doit apporter à ces sols du compost, de l'engrais vert ou encore du fumier de ferme. Cet apport est en général compris entre 5 à 10 tonnes à l'hectare. La matière organique a pour rôle d'augmenter la capacité de rétention en eau et la capacité d'échange cationique du sol, d'améliorer sa structure et l'infiltration de l'eau, d'apporter des éléments nutritifs et d'abaisser la densité apparente du sol, d'augmenter la teneur en carbone organique du sol (PSDR,MAEP,FAO, 2008).

1.2.3-Fumure minérale

Elle consiste à apporter des engrais minéraux sous formes de NPK, urée, dolomie, contenant des éléments majeurs et secondaires (N, P, K et Ca) au sol de culture du riz, pour satisfaire ses besoins biologique et physiologique permettant une meilleure production lors de la récolte (tableau 3).

Tableau 3: Doses prescrites des fumures avec leurs périodes d'épandage

Noms des fumures	Doses respectives (Kg /ha)	Périodes d'épandage
N.P.K. 11-22-16	200 à 300	Avant la mise en place de la culture
UREE	35	Au 1 ^{er} sarclage
UREE	30	Au 2 ^{ème} Sarclage
DOLOMIE	150 - 300	Avant le semis (pour relever le pH du sol)

Source : (www.maep.gov.mg/filtecrizpluv.htm).

1.3-Diverses contraintes pour la production du riz

1.3.1- Contraintes relatives au sol

Pour un bon développement du riz pluvial, la rétention de l'humidité est importante excluant les sols grossiers ou peu profonds. Sur les parcelles en pente, les fortes pluies accélèrent considérablement l'érosion qui emporte les couches arables et les éléments nutritifs conduisant à un appauvrissement du sol.

L'acidité du sol est aussi un obstacle à la productivité du riz pluvial à Madagascar. C'est le cas notamment des sols ferrallitiques : le pH compris entre 5 à 5,4 ; la capacité d'échange cationique se situe entre 3 à 15 cmolc.kg⁻¹ (Drouet, 2010), le taux de saturation est généralement inférieur 20%, la somme des cations échangeables varie entre 0, 3 et 0,5 me .Par

contre les teneurs en azote sont convenables entre 1,9 à 2,6 % (Pedro, 1994). Ainsi le tableau 4 présente les concentrations critiques en macroéléments et en microéléments importants :

Tableau 4 : Les concentrations critiques en macroéléments et en microéléments important

Eléments	Carence (D) Toxicité (T)	Niveau Critique	Partie du plant touchée	Stade de développement
N	D	2,5	Limbe foliaire	Tallage
P	D	0,1	Limbe foliaire	Tallage
	T	1,0	Paille	Maturation
K	D	1,0	Paille	Maturation
	D	1,0	Limbe foliaire	Tallage
Ca	D	0,15	Paille	Maturation
Mg	D	0,10	Paille	Maturation
S	D	0,10	Paille	Maturation
Fe	D	70ppm	Limbe foliaire	Tallage
	T	300ppm	Limbe foliaire	Tallage
Zn	D	10ppm	Bourgeons	Tallage
	T	1500ppm	Paille	Maturation
Mn	D	20ppm	Bourgeons	Tallage
	T	2500ppm	Bourgeons	Tallage
B	D	3,4ppm	Paille	Maturation
	T	100ppm	Paille	Maturation
Cu	D	6ppm	Paille	Maturation
	T	30ppm	Paille	Maturation
Al	T	30ppm	Bourgeons	Tallage

Source : <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/006/y2778f/Y2778F03.pdf>

1.3.2-Contraintes relatives au climat

Bénéficiant d'une large gamme de variété du riz pluvial (Tableau 5) adapté au climat froid et plus ou moins résistant à certains types d'infection, ces contraintes semblent être résolus en partie. En outre, ce type de climat favorise l'apparition et l'épanouissement des différents types d'infection (cryptogamique, bactérien et virale) et fragilise en effet, le

système de défense du riz (stress, capacité adaptative des microorganismes infectieux). Par conséquent, ils ne permettent pas de garantir la protection complète de cette culture et seules les variétés tolérantes au froid sont cultivables sur les Hautes Terres Malgaches.

Tableau 5 : Variétés de riz pluvial d'altitude : généalogie, années de nomination, statuts en termes de diffusion

Variété	Femelle	Male	Année	Diffusion
Fofifa 133	Latsidahy	Fofifa 62	1992	Diffusée mais sensible à la pyriculariose
Fofifa 134	Latsidahy	Fofifa 62	1994	Non diffusée
Fofifa 151	Latsidahy	Shin Ei	1995	Non diffusée
Fofifa 152	Latsidahy	Fofifa 62	1995	Diffusé mais sensible à la pyriculariose
Fofifa 154	Latsidahy	Fofifa 62	1995	Diffusée mais sensible à la pyriculariose
Fofifa 157	Latsidahy	Fofifa 62	2000	Non diffusée
Fofifa 158	Fofifa 62	Shin Ei	2000	Non diffusée
Fofifa 159	IRAT 114	Fofifa 133	2000	Diffusée et résistante à la pyriculariose
Fofifa 161	IRAT 114	Fofifa 133	2003	Diffusée et résistante à la pyriculariose
Fofifa 167	CA 148	Shin ei	2005	Diffusée et résistante à la pyriculariose
Fofifa 168	Latsidahy	Fofifa 62	2005	Diffusée et résistante à la pyriculariose
Fofifa 172	IRAT 265	Jumli Marshi	2006	Diffusée et résistante à la pyriculariose
Chhomrong Dhan	Variété introduite originaire de NEPAL		2006	Diffusée et résistante à la pyriculariose

Source : CIRAD, FOFIFA : <http://www.cirad.mg/fr/anx/rizpluvial.php#haut>

1.3.3-Contraintes biologiques

Le riz pluvial souffre durement des attaques des ravageurs dont les insectes (ex : vers blanc), les maladies (ex : *pyriculariose*), les nématodes (ex : *Meloidogyne incognita*) et les rongeurs (ex : *Rattus argentiventer*) (Jacquot et Courtois, 1983). En outre, les adventices constituent une contrainte sérieuse et nécessitent une lutte constante comme le sarclage. Ils sont des concurrents importants pour les éléments nutritifs, l'eau et la lumière. Ainsi, sans un travail laborieux de désherbage mécanique ou manuel, l'utilisation d'herbicides est incontournable.

CHAPITRE II: LA PYRICULARIOSE

2.1-Importances, généralités de la pyriculariose et biologie de *Magnaporthe oryzae*

2.1.1- Importance

La pyriculariose du riz, due au champignon pathogène *Magnaporthe oryzae*, a une importance énorme du point de vue économique et du point de vue scientifique puisqu'elle est considérée comme la plus grave maladie de cette céréale majeure (Ou, 1985).

D'ailleurs le système *Oryza sativa* – *M. oryzae* est devenu un modèle pour l'étude de l'interaction plante-champignon puisque les séquences du génome des deux organismes sont bien connues (Ebbolle, 2007). Ce système modèle est de loin la seule interaction entre monocotylédone et champignon où de tels outils génétiques et moléculaires sont disponibles (Ribot et al. 2007).

2.1.2- Généralités

La pyriculariose est la principale maladie fongique du riz. L'agent responsable de cette maladie est un champignon filamenteux ascomycète hétérothallique et haploïde, de la famille des *Magnaporthaceae*. Il se divise en deux différentes formes : -une forme sexuée (*Magnaporthe grisea*) et -une forme asexuée (*Pyricularia oryzae* Cavara). L'analyse phylogénétique et des tests de fertilité interspécifique ont permis de démontrer que le genre *Magnaporthe* peut être séparé en deux espèces :- *Magnaporthe grisea*, l'espèce qui attaque la digitale (*Digitaria* spp.) et - *Magnaporthe oryzae* qui attaque à son tour l'*Oryza sativa* et d'autres graminées (Couch and Kohn, 2002).

Il paraît que le centre d'origine de la pyriculariose est dans l'Himalaya (Kumar et al, 1999). Actuellement *M. oryzae* cause des maladies sérieuses sur une large variété de graminées tels que le riz, l'orge et le blé (Talbot, 2003).

2.1.3- Biologie de *Magnaporthe oryzae*

L'infection commence quand une spore asexuée atterrit sur la surface des feuilles et se fixe à l'aide de substances adhésives produites sur son compartiment apical. Les conidies se déplacent de plante en plante et la présence d'eau libre est nécessaire pour la germination des spores (Hamer et al, 2001). Dans les conditions environnementales favorables (basse température, humidité de l'air élevée, rosée), un tube germinatif émerge de l'une des cellules apicales de la conidie et se prolonge sur une courte distance pour effectuer une phase de reconnaissance du substrat. Après deux heures, le tube germinatif arrête sa croissance et se

différencie en cellule spécialisée appelé appressorium (Bourett et al, 1990). Ce stade nécessite une surface dure, hydrophobe et l'absence de substances nutritives exogènes inhibe ce processus de différenciation (Dean et al, 1997). La paroi cellulaire de l'appressorium contient une couche de mélanine. Ce pigment assure plusieurs rôles : antioxydant, protection contre l'exposition à l'ultra-violet et les métabolites toxiques (Henson et al, 1999).

La pénétration à travers la cuticule et la paroi cellulaire de l'hôte se fait par l'intermédiaire d'un hyphe de pénétration formé à la base de l'appressorium. Cet organe de pénétration est doté d'une forte pression osmotique et avec l'aide d'autres produits comme la cutinase, il transperce la cuticule et les parois cellulaires (Ribot et al, 2007). Le *M. Oryzae* se développe d'abord à l'intérieur d'une cellule puis envahit les cellules épidermiques adjacentes et les cellules sous-jacentes du mésophylle. Une lésion sporulante apparaît plus tard pouvant libérer des milliers de nouvelles conidies par jour pour réinitialiser le cycle de la maladie (fig.2) (Richard et al, 1996).

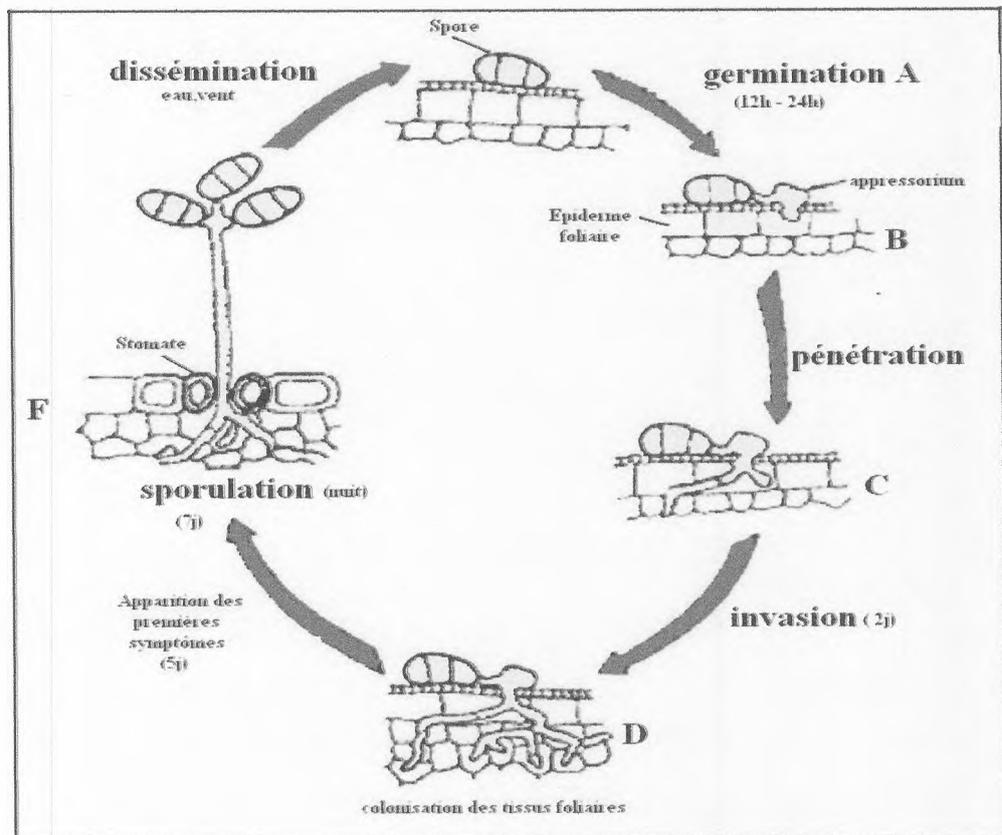


Fig.2: Cycle d'infection foliaire de la pyriculariose (26°C)

Source : RANOMENJANAHARY, 1989

2.2- Symptômes - dégâts et conditions favorables à l'épidémie

3.2-1- Symptômes –dégâts

M. oryzae peut infecter tous les tissus aériens du riz dont les feuilles, les tiges et les panicules. La plus importante perte de rendement est cependant causée par la pyriculariose paniculaire (Ribot et al, 2007). Elle empêche directement le remplissage des grains. Quant à la pyriculariose foliaire, elle entraîne une diminution de la surface photosynthétique des feuilles (Seebold et al, 2004), ce qui a pour conséquence une baisse du nombre de grains et de leur poids. Cette deuxième forme de la maladie conduit donc d'une manière indirecte à une perte de rendement.

Ses symptômes peuvent apparaître sur trois organes de la plante du riz (tableau 6). D'autres études montrent que le pathogène peut aussi infecter les racines et les vaisseaux conducteurs. Dans ce cas, *M. oryzae* utilise les procédures de développement typique des champignons pathogènes des racines (Sesma et Osbourn, 2004). L'importance de ce type d'infection au champ reste encore mal connue.

Tableau 6: Les organes infectés par la pyriculariose et ses symptômes

Désignations	Organes infectés	Symptômes
PYRICULARIOSE FOLIAIRE	Feuilles	<ul style="list-style-type: none">-Apparition des petits points bruns;-Transformation de ces derniers en lésions brunes à centre blanchâtre;-Ces lésions présentent une forme plus ou moins effilée et orientée dans le sens de la longueur de la feuille.-Dans le cas graves, les taches de lésion s'élargissent et les feuilles infectées finissent par se dessécher.
PYRICULARIOSE	Tiges	<ul style="list-style-type: none">-Apparition d'un anneau brunâtre au niveau du dernier nœud, juste en dessous de l'inflorescence;-En cas d'attaque précoce, les panicules portent des grains vides qui n'ont pas pu être alimentés.-En cas d'attaque tardive, ils sont à moitié pleins.

PANICULAIRE		
	Grains	-Apparition des taches brunes qui peuvent d'élargir pour recouvrir totalement les glumelles ;

Source : (Arraudeau, 1998)

2.2-2- Conditions favorables à l'épidémie

Les conditions climatiques et le sol influencent largement l'épidémie de pyriculariose. Les températures basses favorisent la maladie surtout en régions tempérées. Il en est de même pour les régions tropicales de haute altitude. Sous les tropiques, un air humide et les rosées sont les facteurs qui favorisent l'épidémie. Tout déficit hydrique peut également favoriser la progression de l'infestation. Chaque lésion produit 2000 à 6000 spores par jour, pendant 14 jours en présence d'eau. La plupart des spores sont libérées entre 2 et 6 heures du matin.

Le vent est le principal facteur de dissémination des spores qui ont pu être trouvées à plus de mille mètres d'altitude. Au champ, les sources de l'inoculum peuvent être la présence de paille de riz et des plantes déjà infectées.

Le facteur de développement de la maladie peut également être la plante elle-même. En effet, la présence d'hôte, en l'occurrence les variétés sensibles, contribuent à la prolifération de la pyriculariose. Quelques stades de développement du riz sont aussi connus comme étant des stades de sensibilité, notamment, la période tallage et le début floraison (Arraudeau, 1998).

2.3-Luttes intégrées

2. 3-1-Variétés résistantes

L'utilisation de variétés résistantes est probablement le meilleur moyen de lutte. Cependant, face à la capacité du champignon à surmonter la résistance de la plante, le déploiement de variétés résistantes doit être intégré au sein d'une approche globale de durabilité agronomique (Notteghem, 2009).

La résistance contre la pyriculariose est reconnue comme étant une résistance complexe. Pour une variété donnée, un changement de l'environnement ou de la souche des pathogènes cause le plus souvent un changement dans l'impact de la maladie. La résistance verticale se caractérise par une infection très limitée et spécifique à une race. La faillite de cette résistance intervient souvent entre 1 à 3 ans après la commercialisation de la variété. Par

contre, la résistance horizontale se caractérise par une période latente plus longue et une capacité de sporulation réduite. Elle est plus durable mais inclut plusieurs gènes mineurs rendant les travaux génétiques plus complexes (Arraudeau, 1998). La résistance d'une variété est donc une qualité précieuse mais fragile. Il faut à tout prix conserver cette qualité le plus longtemps possible puisque la création d'une variété est une démarche longue et coûteuse.

2. 3-2-Les systèmes de cultures

Plusieurs études ont été menées au sein de l'URP SCRID (Unité de Recherche en Partenariat "Systèmes de culture et rizicultures durables") autour du thème pyriculariose du riz pluvial et système de culture. Il a été observé maintes fois une attaque de pyriculariose relativement faible en SCV (Randriarimanana, 2007).

Cependant, les mécanismes mis en jeu ne sont pas encore très clairs (Ma et al, 2005). Certains laissent penser que la couverture végétale exerce un effet tampon lors de l'apport d'urée et évite ainsi un déséquilibre nutritionnel temporaire pouvant affaiblir la défense de la plante (Nakata, 2008). D'autres avancent l'hypothèse que ce phénomène est lié à un microclimat créé par la couverture végétale (Huot de Longchamp, 2009). Il est également possible que la couverture modifie des réactions chimiques ou biologiques qui facilitent la mobilisation des éléments minéraux du sol tels que le phosphore, ou la silice (Rakotoarisoa, 2006).

CHAPITRE III: LA SILICE DANS L'AGRICULTURE

3.1-La silice dans le sol

3.1.1-Le cycle global de la silice

Le silicium (Si) représente, après l'oxygène, l'élément le plus abondant de la lithosphère (31%). Le cycle global du Si joue un rôle important dans de nombreux processus biogéochimiques tels que la régulation du CO₂ atmosphérique via la nutrition des organismes aquatiques (Sommer et al, 2006).

Le cycle du silicium se divise en un cycle continental (Fig.3) et un cycle marin (Exley, 1998). Le stock continental a été estimé à environ $3,8.10^{17}$ kg et le stock océanique à environ $2,5.10^{15}$ kg (Lucas, 2007). Dans le cycle continental, le silicium présent dans les minéraux primaires (des silicates ou des aluminosilicates : feldspath, pyroxène, amphiboles, micas, quartz, péridots, feldspathoïdes,...) est libéré sous forme d'acide monosilicique (H₄SiO₄) dans la solution du sol via l'altération. Cette forme de silicium soluble peut conduire à la formation de minéraux secondaires formés par des phyllosilicates, des oxyhydroxyde, des carbonates, des sulfates, et des chlorure dont leurs constituants sont : (Al(OH)₃ : gibbsite, Al₂Si₂O₅(OH)₄ : Kaolinite, (Si_{4x}Al_x)O₁₀Al₂(OH)₂CE_x : Smectites et dans certain cas SiO₂ : Quartz), être adsorbé sur des oxydes, former des précipités ou être lessivée vers les nappes souterraines (Figure.3) (Mckeague and Kline, 1963).

Les végétaux participent également au cycle du Si (Meunier, 2003). Ils absorbent la silice présente dans la solution du sol qui se précipite dans les organes en silicium phytogéniques (phytolites) puis est restitué au sol après la dégradation des tissus végétaux (Meunier, 2003). Les phénomènes d'absorption et de dégradation confèrent à la plante une importance primordiale dans le cycle du Si (Alexandre et al, 1997).

Le cycle terrestre alimente le cycle marin en silicium soluble via les rivières. En effet, au cours du développement du sol, une partie du silicium peut être lixiviée et se retrouver dans les eaux de surface ou souterraines (Exley, 1998). La nature et l'origine des minéraux silicatés dans l'océan ont été l'objet d'attentions depuis la publication de Sillén (1961) sur le contrôle possible de la composition de l'eau de mer par les réactions de ces minéraux avec la phase dissoute. Le cycle biogéochimique du silicium présente un intérêt majeur, de par son impact sur les concentrations globales de CO₂ au travers des processus combinés d'érosion des roches silicatées et de transfert de CO₂ de l'atmosphère vers la lithosphère (Wollast et Mackenzie, 1983). L'érosion des minéraux de la croûte terrestre peut entraîner la production

a) **Mécanisme d'altération des silicates**

Ces minéraux (tableau.7) sont altérés par hydrolyse. L'hydratation de la surface du silicate permet la mise en contact des ions de la solution aqueuse avec la structure du silicate. Il se produit alors un échange de cations, les H^+ étant de fort potentiel ionique, ils vont préférentiellement se lier aux ions O^{2-} et ces derniers vont libérer les cations présents dans les silicates (Na, K, Ca,...) dont le potentiel ionique est plus faible. Les cations migrent du minéral vers l'eau et le remplacement de l' H^+ modifie la charpente silicatée qui à son tour favorisera la libération des ions Al. La dégradation des silicates dépend donc de la proportion de liaisons O-Al dans la structure. L'anortite $Ca(Al_2Si_2O_8)$ est le plus fragile des feldspaths car il contient plus de liaison que de l'orthose $K(AlSi_3O_8)$ ou de l'albite $Na(AlSi_3O_8)$. L'altération sera d'autant plus poussée que le milieu aqueux sera riche et se renouvellera en ions H^+ ;

Tableau 7: Classification des minéraux silicatés

BO	Formal name	Informal name	Si-O group	Examples	Sample formula
0	nesosilicates	island silicates	$[SiO_4]^{4-}$	Forsterite almandine	$Mg_2(SiO_4)$ $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$
1	sorosilicates	group silicates	$[Si_2O_7]^{6-}$	Lawsonite epidote	$Ca_3Al_2(Si_2O_7)(OH)_2 \cdot H_2O$ $Ca_2Fe_3(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$
2	cyclosilicates	ring silicates	$[Si_3O]^{2-}$	Beryl tourmaline	$Be_3Al_2(Si_6O_{18})$ $NaMg_3Al_6(BO_3)_3(Si_6O_{18})(OH)_4$
2	inosilicates	chain silicates	$[Si_3O]^{2-}$ $[Si_4O_{11}]^{6-}$	Diopside tremolite	$CaMg(Si_2O_6)$ $[]Ca_2Mg_5(Si_8O_{22})(OH)_2$
3	phyllosilicates	sheet silicates	$[Si_2O_5]^{2-}$	Talc Phlogopite muscovite	$[]Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$ $KMg_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ $K[]Al_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$
4	tectosilicates	framework	$[SiO_2]^0$	Quartz Orthoclase leucite	SiO_2 $K(AlSi_3O_8)$ $K(AlSi_2O_6)$

Source: lecture notes- mineralogy,

Légende: BO: number of Bridging Oxygens

b) La structure des minéraux argileux

La structure de ces minéraux silicatés est liée à l'agencement des ions oxygène groupés autour du Si sous forme de tétraèdres (SiO₄)⁴⁻ et autour de l'Al sous forme de tétraèdres et l'octaèdre. Les minéraux argileux correspondent à des silicates en feuillets (phyllosilicates). Ces feuillets sont de deux types : des couches tétraédriques (T) et des couches octaédriques (O) qui s'associent pour former des motifs. Deux motifs d'association sont possibles : le motif TO, qui lie une couche tétraédrique à une couche octaédrique, est un assemblage de type 1:1 et le motif TOT, qui lie une couche tétraédrique de part et d'autre d'une couche octaédrique, est un assemblage de type 2:1. Des substitutions peuvent affecter les cations des couches tétraédriques (remplacement de Si par Al) ou octaédriques. Ces remplacements pour l'assemblage de type 1:1 qui affectent une couche sont compensés par les effets d'autres substitutions dans d'autres couches. Par contre, ces substitutions dans les couches octaédriques pour les assemblages 2:1 créent un bilan négatif de charge qui sera compensé par l'incorporation de cations, de cations hydratés ou de molécules d'eau au sein d'un interfoliaire.

c) Formation des minéraux argileux

La composition et la structure des phyllosilicates dépendent essentiellement de l'importance des circulations au cours de l'hydrolyse.

- **Les produits de l'héritage** qui varient selon la nature de la roche mère. Pour les roches sédimentaires, le cortège argileux est identique à celui de la roche mère. Les roches cristallines dans les zones où les sols sont importants (zone orogéniques) donnent des micas et des chlorites.
- **Les transformations** de minéraux avec perte d'éléments chimiques et réorganisation de la structure silicatée sans destruction complète des minéraux parents. En fonction de l'hydrolyse, on distingue trois types de dégradations : bisiallisation, la monosiallisation et l'allitisation.
- **Les néoformations** correspondent à la formation de minéraux argileux à partir de solution concentrées en ions (il faut donc de l'aluminium, de la silice et du magnésium qui proviennent des zones d'altération). Les environnements sont liés à des périodes d'évaporation, aux milieux marins (formation de glauconies) ou à l'hydrothermalisme (smectite, cattaulgite).

3.1.3- Le silicium dans la solution du sol

Le silicium est présent dans la solution du sol sous forme d'acide silicique monomérique (H_4SiO_4) (Faure, 1991). Il dérive de la dissolution des minéraux silicatés du sol. L'acide silicique monomérique peut être transformé en acide silicique polymérique sous des conditions très alcalines et la formation de l'acide polysilicique (Dietzel, 2002).

La concentration du Si dans la solution du sol est fonction de la solubilité des minéraux primaires et secondaires du sol. Elle est fonction de la température, de la taille des particules et de leur composition chimique (Drees et al. 1989).

La solubilité de la silice amorphe ($SiO_2 \cdot nH_2O$ ou opal) est influencée par le pH du sol. Elle est essentiellement constante entre pH 2 et 8.5 mais augmente rapidement à pH 9 (fig.5). A l'équilibre, la concentration de l'acide silicique en contact avec la silice amorphe est de 1.8 mM. Mais les concentrations en acide silicique dans la solution du sol sont généralement comprises entre 0.1 et 0.6 mM (Epstein 1994).

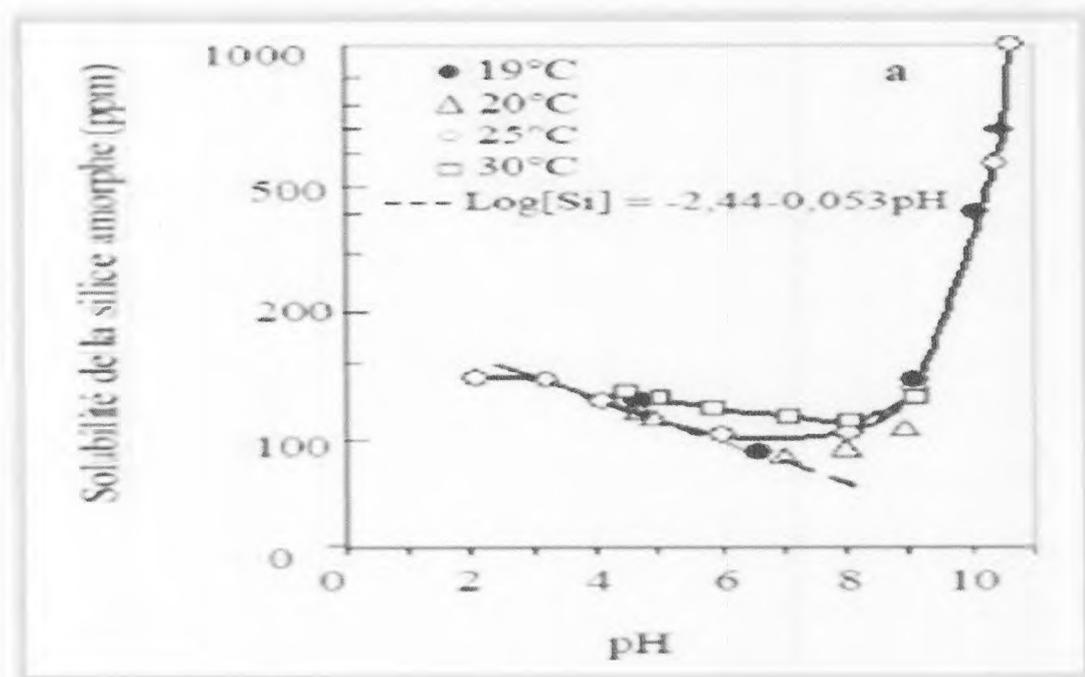


Fig.4: Solubilité de la silice amorphe en fonction de la température et du pH

Source : Elodie PRUD'HOMME, 2011

3.2- La silice chez la plante

3.2.1- Teneur en silice des plantes cultivées

Les organismes vivants, qu'ils appartiennent au règne animal ou végétal, présentent une quantité importante de silice dans leurs tissus. Les plantes supérieures contiennent

généralement entre 0,1 et 10 % de leur matière sèche sous forme de silice. Ces valeurs s'apparentent grandement à celles retrouvées pour plusieurs éléments essentiels tels que le calcium (0,1 à 0,6 %) et le soufre (0,1 à 1,5%). Chez certaines espèces présentant les plus fortes teneurs en silice, les concentrations rencontrées dépassent même de beaucoup celles des macroéléments. Même aux plus faibles concentrations de ces derniers, soit environ 0,1 %, la teneur en silice dans les tissus végétaux est similaire aux plus faibles concentrations parfois observées pour des éléments aussi essentiels que le phosphore et le magnésium. La teneur en silice des tissus végétaux varie énormément d'une espèce à l'autre comparativement à celle des autres éléments (Epstein 1999).

La variation peut également être importante entre les cultivars au sein d'une même espèce. Cette variation s'explique en partie par la plante elle-même, en raison de sa capacité intrinsèque à absorber la silice, mais également par l'environnement et la nature du sol dans lequel elle pousse (Ma et al. 2001b).

De façon générale, les monocotylédones présentent des concentrations en silice beaucoup plus élevées que les dicotylédones (tableau 8).

Tableau 8 : Classification des végétaux selon leurs teneurs en silice

Groupes	Teneurs en silice en % de la MS
Les graminées de terrains humides (riz, canne à sucre, sorgho, etc.)	Jusqu'à 15
Les graminées de terrains secs	1 à 3
Les dicotylédones (haricot, etc.)	Moins de 1

Source : Jones et Handreck (1967)

Remarque : Toutefois, il est essentiel de se rappeler que plusieurs exceptions existent pour chacun de ces groupes.

3.2.2- Mode d'absorption

Les variations importantes de la teneur en silice chez les plantes, et par conséquent de son efficacité prophylactique, sont principalement imputables aux variations de la capacité d'absorption de l'acide silicique par les racines. Initialement, trois modes d'absorption ont été décrits chez différentes espèces soit l'absorption active, passive et répressive (Ma et al. 2001) :

- ✓ **l'absorption active** : la silice est absorbée à un taux plus élevé que l'eau, indiquant la présence d'un mode de transport actif,
- ✓ **l'absorption passive** : la silice et l'eau sont absorbées en isotonicité,
- ✓ **l'absorption répressive** : la silice est absorbée à un taux moindre que celui auquel elle devrait l'être si elle diffusait simplement avec le passage de l'eau.

En 2001, Ma *et al* démontraient que l'absorption de la silice par le riz s'effectue au niveau des racines principales et latérales, mais non au niveau des poils absorbants. Par la suite, ils mirent en évidence la présence de deux transporteurs membranaires, Lsil et Lsi2, impliqués dans l'absorption de la silice (Ma *et al.* 2006; Ma *et al.* 2007). Les transporteurs Lsil et Lsi2 sont respectivement situés du côté distal et proximal de la membrane plasmique des cellules de l'exoderme et de l'endoderme, permettant ainsi le passage de la silice par-delà les bandes de caspari. Le transporteur Lsil est chargé de transporter l'acide silicique à l'intérieur des cellules de l'exoderme et de l'endoderme alors que Lsi2 est en charge de le relâcher à l'extérieur de la cellule. Après avoir traversé l'exoderme, l'acide silicique diffuse jusqu'à l'endoderme où l'action combinée des deux transporteurs permet son relâchement dans le xylème d'où il pourra atteindre les différentes parties de la plante.

La Figure 6 schématise le système d'absorption de la silice chez le riz tel que présenté par Ma *et coll.* en 2007.

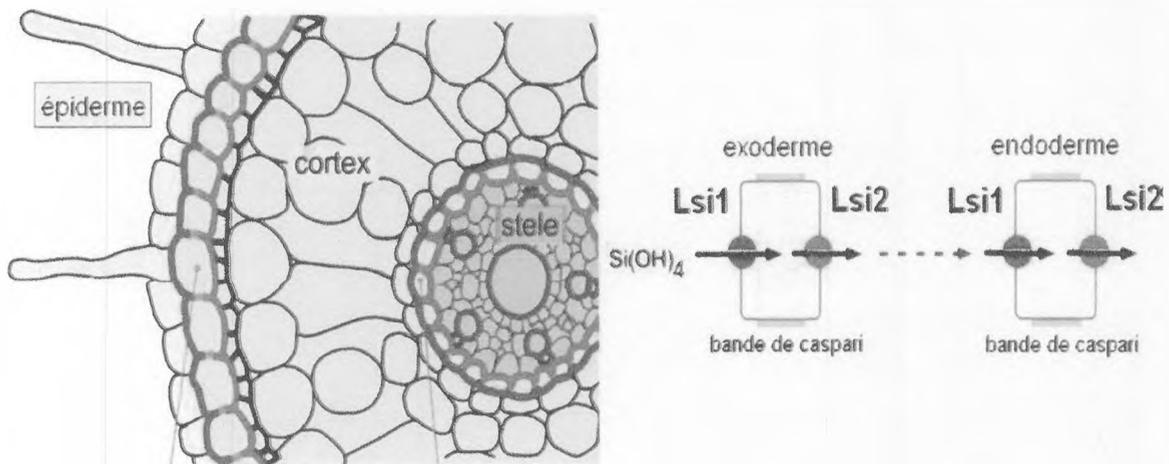


Fig.5 : Représentation schématique du système de transport de la silice chez le riz, présentant la localisation des deux transporteurs Lsil et Lsi2.

Source : Ma *et al.*, 2007

3.2.3- Rôles potentiels de la silice

Les expériences qui ont étudié les rôles de la silice ont été menées à partir de différents produits comme du gel de silicate de potassium ou des sels de silicate de sodium, calcium ou potassium. La fertilisation du riz à l'aide de silicate de sodium a montré des effets positifs sur la croissance de plants infectés (Winslow, 1992). D'autres formulations telles que le silicate de potassium ou le silicate de calcium ont montré certains effets positifs associés à la silice, comme notamment la prophylaxie (Bélangier et al, 2003 ; Rodrigues et al, 2003).

- Rôles prophylactique

La silice, sous ses différentes formes, suscite une attention croissante en raison de sa capacité à stimuler la résistance des plantes envers des stress biotiques et abiotiques (Epstein, 1994; Liang et al, 2003). De nombreuses expériences ont mis en évidence un lien entre l'apport de silice et la résistance envers des attaques fongiques causées par *Podosphaera xanthii* (*Sphaerotheca fuliginea*) (Menziès et al, 1991, 1992) et *Pythium* spp (Cherif et al, 1992a, 1992b, 1994) chez le concombre; *Erysiphe graminis* chez l'orge (Carver et al, 1987) ; *Pyricularia* chez le riz (Yoshida et al, 1962 ; Datnoff et al, 1997) et *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* chez le blé (Bélangier et al, 2003 ; Yang et al, 2003, Rémus-Borel et al, 2005). Deux hypothèses ont été émises à l'heure actuelle concernant le rôle prophylactique de la silice chez les plantes, attribuant à l'élément un rôle passif ou actif :

✓ **Rôle passif de la silice polymérisée** : Selon l'hypothèse du rôle passif, la silice créerait une barrière mécanique, en s'accumulant dans les apoplastes cellulaires, empêchant ainsi le champignon de pénétrer. (Ishiguro, 2001). Kunoh et Ishisaki (1975) ont ainsi démontré que la silice insoluble s'accumulerait au niveau des sites de pénétration de l'agent pathogène. Pourtant, ni leurs travaux, ni ceux de Carver et collaborateurs (1987) ne sont parvenus à montrer une relation directe entre la présence de silice insoluble et la résistance à la pénétration de l'agent pathogène. Kim et collaborateurs (2002) ont montré que la silice se déposait en abondance dans les feuilles de riz. L'association directe entre la déposition de silice et l'effet contre *Pyricularia oryzae* n'a pas été démontré.

✓ **Rôles actifs de la silice soluble** : les premiers indices fortuits montrant que la silice jouerait un rôle actif ont été obtenus par Samuels et collaborateurs (1991). Ils ont montré que, chez le concombre infecté par le blanc, lorsque l'application de silice était interrompue, les effets prophylactiques étaient perdus, en dépit de la déposition irréversible de la silice dans les feuilles. Cherif et collaborateurs (1992a) furent les premiers à tester l'hypothèse du rôle actif en montrant que, chez le concombre infecté par *Pythium ultimum*, sous certaines conditions d'humidité, lorsque la silice ne parvenait pas à s'accumuler aux sites

d'infection, la répression de la maladie se poursuivait tout de même. Par la suite, les travaux de Cherif (et collaborateurs) (1992a ; 1994) et Fawe (et collaborateurs) (1998), chez le concombre, ont montré que la silice induisait une production de composés de défense. Ils associèrent la présence de silice à l'augmentation de l'activité de la PAL (Phénylalanine Ammonia-Lyase), des chitinases, des peroxydases et de la polyphénoloxydase, des enzymes impliquées dans les mécanismes de défense des plantes, chez le concombre, contre *P. ultimum*. Ils conclurent que, chez le concombre, la résistance de la plante contre cet agent pathogène n'était pas due à l'accumulation de silice polymérisée à l'intérieur des tissus, mais plutôt à la silice soluble qui jouerait un rôle physiologique dans la plante en induisant des réactions de défense. La stimulation de production de molécules de défense par la silice chez les monocotylédones fut établie par Bélanger et collaborateurs en 2003 chez le blé, et plus tard par Rodrigues et collaborateurs (2003).

Chez le riz, l'accumulation de silice au niveau de la cuticule des panicules permet une diminution de la transpiration de l'ordre de 30%, favorisant une nette amélioration du rendement en grains (Ma *et al.* 2001b). La diminution de la transpiration est également favorable en présence d'une forte salinité puisqu'elle permet un meilleur stockage de l'eau à l'intérieur des tissus diminuant ainsi, par dilution, l'impact du sel (fonctions similaires au potassium) (Romero-Aranda *et al.* 2006).

Dans les sols agricoles pauvres en silice, ou dans les solutions hydroponiques utilisées en serre, un apport en silice adéquat peut permettre de réduire de façon substantielle les pertes causées par les attaques fongiques. Par exemple, un apport adéquat en silice dans les cultures de riz peut permettre une diminution du taux d'infection de la pyriculariose (*Magnaporthe grisea*), maladie de 1^{ère} importance en riziculture, de près de 80% (Datnoff *et al.* 1992; Seebold *et al.* 2001). Néanmoins, le mode d'action par lequel la silice protège la plante contre les attaques fongiques est encore **sujet de désaccord**.

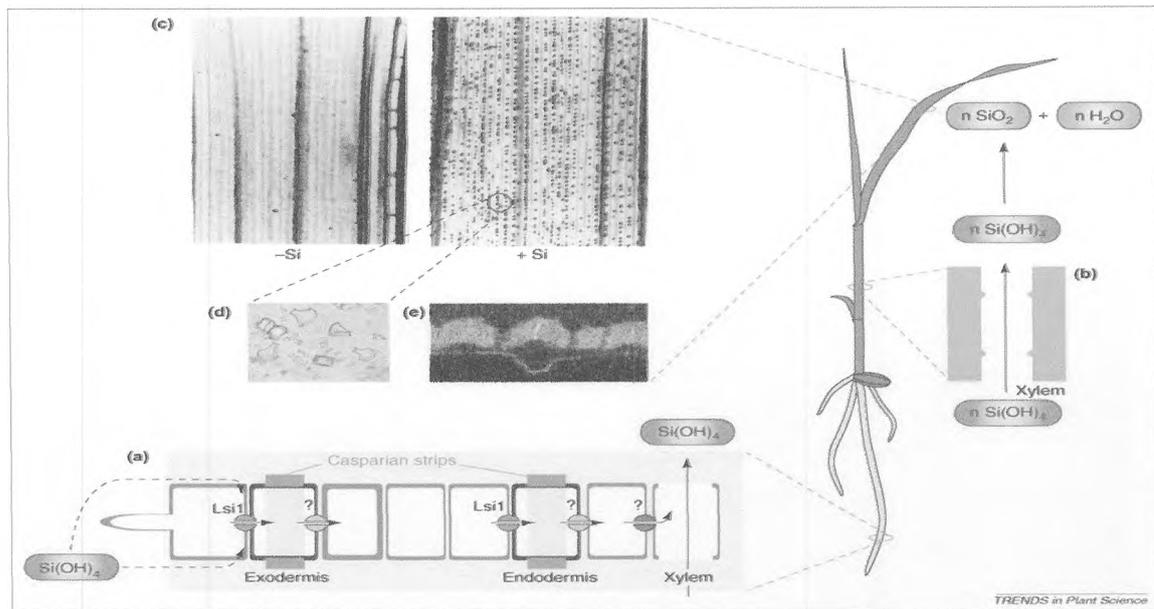


Fig.6: Prise, distribution et accumulation du silicium (silicium) en riz.

Source : Ma et al, 2007

Légende : (c): silicium détecté par le rayon X mou, et (e) : par SEM

Dans le cas du riz (Fig.7), le silicium est pris par l'intermédiaire des transporteurs sous forme d'acide silicique (a), puis il est transféré à la pousse de riz sous la même forme (b). Dans la pousse, le silicium est polymérisé et déposé dans les cellules de bulliforme (corps de silice) (c,d) et sous la cuticule (e).

3.3- Effets bénéfiques de la silice

3.3.1-Effets sur la croissance

La silice soluble améliore la croissance, le développement et le rendement de nombreuses plantes telles que le riz (*Oryza sativa* L.), la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.) et de nombreuses céréales (Jones et Handreck, 1967 ; Savant et al. 1999 ; Datnoff et al, 2001). Chez le riz, un apport du Si (1000kg/ha) permet une augmentation des rendements et de la qualité des grains (Ma et Takahashi 2002).

Elle agit de manière positive sur la croissance du riz en diminuant la transpiration excessive, un excès de transpiration entraînant la fermeture des stomates et une diminution de la photosynthèse. (Ma et Takahashi 2002). Tous ces effets positifs du Si sur la croissance des plantes sont dus au dépôt du silicium dans les parois cellulaires qui confère une meilleure solidité aux tissus. La Si favorise la stature, la pénétration du sol par les racines, l'exposition des feuilles à la lumière, la résistance à la verse de nombreuses plantes. Il stimule la photosynthèse en améliorant l'efficacité de l'utilisation de la lumière (Ma et Yamaji 2008).

La Si a certes de nombreux effets bénéfiques pour la plante, cependant, ils ne s'expriment mieux qu'en conditions de stress, et non en conditions optimales (Epstein 1994).

3.3.2- Résistance aux stress abiotiques et biotiques

La Si augmente la résistance des plantes aux typhons, radiations excessives, UV et au gel (Hodson et Sangster 2002). Elle réduit la disponibilité en éléments toxiques des racines des plantes telles que le riz et la canne à sucre (Savant et al. 1997). En effet, elle agit sur le pouvoir oxydant des racines, permettant ainsi à la plante de réduire le prélèvement des ions métalliques tels que le manganèse (Mn), le fer (Fe) et l'aluminium (Al). Cet élément favorise une meilleure distribution de ces ions dans les feuilles où leur stockage est sous une forme métaboliquement inactive (Ma et al. 2001).

De nombreuses études ont démontré l'effet positif du silicium sur la résistance des maladies et ravageurs chez plusieurs plantes telles que le riz, les cucurbitacées, le raisin, le blé, le maïs, le sorgho et le gazon (*turfgrass*). Les effets du traitement en Si se traduisent par une diminution du nombre de lésions, une réduction de la surface couverte par les agents pathogènes, une baisse de la germination de ces colonies, une diminution des symptômes de la maladie et donc une réduction du taux de mortalité des plantes et des pertes de rendement (Datnoff et al. 2007).

3.3.3- Apports de la silice et mécanisme de défense de la plante

Dans une étude menée à l'Est de la Colombie en 1995 et 1996, Seebold et al (2004) rapportent que la silice permet de supprimer les effets des maladies du riz tel que la pyriculariose quand il est apporté sur un sol déficient en cet élément. Un apport de 1000 kg/ha de silice a permis de protéger assez bien le riz pluvial et même mieux que l'utilisation de fongicides. Ils concluent alors que l'apport de silice peut être une alternative permettant de réduire l'utilisation de fongicides dans la lutte contre *M. oryzae*. Dans la même étude, il a été aussi observé que la silice a un effet résiduel, (tout en) évitant d'en apporter chaque année. L'apport de silice semble conduire à plusieurs changements dans la plante: une augmentation de la teneur en silice et une diminution de la teneur en azote, en phosphore, en manganèse et en fer. Tous ces effets conduisent à la fin à une augmentation du rendement (RAFENOMANANJATO, 2011). Ces dernières constatations peuvent s'expliquer par un dépôt de silice sous l'épiderme de la feuille créant une membrane de protection contre les insectes et les maladies.

DEUXIEME PARTIE:
PROBLEMATIQUE – CADRE DE L’ETUDE
ET MATERIELS – METHODES

CHAPITRE I : CONTEXTE GENERAL ET CADRE DE L'ETUDE

1.1-Contexte général et justification de l'étude

L'amélioration de la production de riz pluvial sur les Hautes Terres de Madagascar nécessite de pouvoir contrôler les effets néfastes des bioagresseurs. La pyriculariose, principale maladie des cultures de riz, est due au champignon *Magnaporthe oryzae*. Cette maladie peut causer des pertes de rendement allant jusqu'à 100 % dans les cas les plus graves. Le développement des épidémies de pyriculariose résulte d'interactions complexes entre l'agent pathogène, la plante et les facteurs environnementaux favorables au développement du pathogène ou modifiant la tolérance de la plante.

A Madagascar, la riziculture pluviale d'altitude subit une très forte pression de la pyriculariose. De plus, les paysans n'ont pas le moyen d'utiliser des traitements chimiques en cas de forte attaque. Les stratégies de lutte intégrée contre la maladie visent à réduire la sensibilité de la plante ou à limiter la propagation de l'épidémie dans une parcelle de façon à améliorer la durée de vie des variétés, face à un pathogène qui s'adapte très rapidement. La qualité des sols et notamment la disponibilité de la silice pour la plante semble jouer un rôle sur le niveau d'infestation du riz, pouvant être utilisée dans ces stratégies de lutte intégrée.

Le rôle de silicium en biologie végétale, son statut essentiel ou bénéfique, son effet direct ou indirect sur la croissance, et son mode d'action bioactif ou mécanique sont discutés depuis plusieurs décennies. Ces rôles éventuels nous mènent à vérifier les hypothèses qui sont déjà mentionnés dans l'introduction:

- **Les caractéristiques naturelles des sols (sols de Betafo ou Andranomanelatra) ou des apports riches en silice (cendre, résidus) modifient la teneur en silice labile (disponible) des sols ;**
- **L'augmentation de la teneur en silice labile dans le sol affecte la teneur en silice des plantes et contribue à améliorer la croissance de la culture de riz ;**
- **La fréquence et la sévérité de la pyriculariose décroît en fonction de la teneur de la silice labile dans le sol et la plante.**

1.2-Objectifs

Ce travail vise donc à suivre une expérimentation au champ, mise en place par le CIRAD et le FOFIFA à Antsirabe, afin de comparer diverses modalités d'apport de silice sur l'infestation du riz par la pyriculariose. Il aura comme objectifs de :

- i) déterminer la teneur en silice des pailles de riz prélevés à la récolte ;*
- ii) déterminer les teneurs de silice labile du sol ;*
- iii) évaluer les niveaux d'infestation du riz par la pyriculariose.*

Ces recherches constituent un préalable indispensable à l'identification de pratiques culturales visant à limiter les effets négatifs de cette maladie sur le riz.

L'organisation de ce travail requiert la répartition des activités en 5 grandes étapes pendant 6 mois de stage.

Tableau 9: Chronogramme des activités

Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
Collecte des sols et des plantes sur l'expérimentation	Mises au point méthodologiques	Analyses des sols et des plantes		Traitement et analyse des résultats	Rédaction du mémoire et présentation

1.3-Cadre général de l'étude

Dans le cadre du DP SPAD (Dispositif de recherche en Partenariat « Systèmes de Production d'Altitude et Durabilité » des recherches associant diverses institutions malgaches (Université d'Antananarive, Fofifa, Fifamanor) et françaises (CIRAD, IRD) s'intéresse au développement des systèmes de production des zones tropicales d'altitude avec les objectifs suivants :

- Etudier les conditions de la durabilité des productions pluviales, et notamment du riz, dans les zones d'altitude malgache.
- Etudier les conditions de la durabilité de la riziculture exondée de bas-fond dans les zones d'altitudes malgaches.
- Développer des systèmes de culture innovants, en particulier des systèmes AC (Agriculture de Conservation), permettant de gérer l'ensemble des ressources disponibles et d'assurer la durabilité de la production.
- Etudier la place de l'animal dans la conservation des nutriments dans des systèmes de production à bas niveaux d'intrants.

- Etudier les liens organisationnels (calendriers agricoles, mobilisation de ressources) des systèmes de culture pluviaux avec les autres activités de l'exploitation, notamment les autres systèmes de culture irrigués et arboricoles ou les activités d'élevage.
- Accompagner au sein des exploitations et des terroirs les processus d'innovation liés à ces nouveaux systèmes, en particulier dans leur interaction avec l'élevage, leur lien avec les filières et les ressources naturelles.
- Documenter aux échelles spatiales concernées les modifications (démographiques, productives, environnementales) accompagnant les dynamiques d'occupation des territoires agro pastoraux.
- Alimenter les acteurs du développement agricole avec des nouveaux systèmes et des méthodes d'accompagnement.

Depuis 2002, le collectif SCRiD (Systèmes de Culture et Rizicultures Durables), actuellement équipe centrale du DP SPAD, en collaboration avec l'UMR BGPI, a mené un programme de recherche pluridisciplinaire sur la protection intégrée du riz pluvial à Madagascar en intégrant des approches d'agronomie, d'amélioration des plantes, d'écophysiologie et d'épidémiologie. Des études sur la diversité et la structure des populations locales de *M. oryzae* ont été conduites. Le modèle *Oryza sativa* - *Magnaporthe oryzae* est choisi pour approfondir les mécanismes d'interaction entre systèmes de culture et expression de la résistance. Ce pathosystème est en effet le modèle le plus avancé pour l'étude des interactions plante-champignon parasite (Ebbole, 2007 ; Wilson et Talbot, 2009).

L'étude que j'ai conduite a été effectuée avec la participation de quatre organismes de recherches agronomiques: IRD, CIRAD, FOFIFA et LRI; dont chacun d'entre eux a joué des rôles prépondérants dans la réalisation de ce travail. Ce travail s'appuie sur une expérimentation au champ menée durant deux années culturales successives sur un dispositif agronomique qui a été mis en place par le CIRAD et le FOFIFA dans la commune d'Andranomanelatra. Lors de la seconde année de culture, un suivi des niveaux d'infestation ^{et} et de la croissance des plantes ont été réalisées, diverses analyses chimiques de sols et de plantes ont été réalisées au laboratoire d'analyse du LRI sous la surveillance scientifique de l'IRD et de CIRAD. Par conséquent, l'objectif de ce dispositif est de vérifier les arrière-effets des amendements silicatés réalisés les années précédentes et les comparer à des amendements récents.

1.4-Présentation de la zone d'étude

1.4.1- *Situation géographique*

Pour mieux cerner cette problématique à travers ces hypothèses, une étude a été effectuée dans la région du Vakinankaratra, dans la sous-préfecture d'Antsirabe I, très précisément dans les parcelles d'expérimentation du FOFIFA et du CIRAD au sein de la commune rurale d'Andranomanelatra (fig.8). Cette commune se trouve à 17 km au nord d'Antsirabe et à 152 km au sud d'Antananarivo, à une altitude de 1653 m et à une latitude de 19°46'45''S et une longitude de 47°6'25''E.

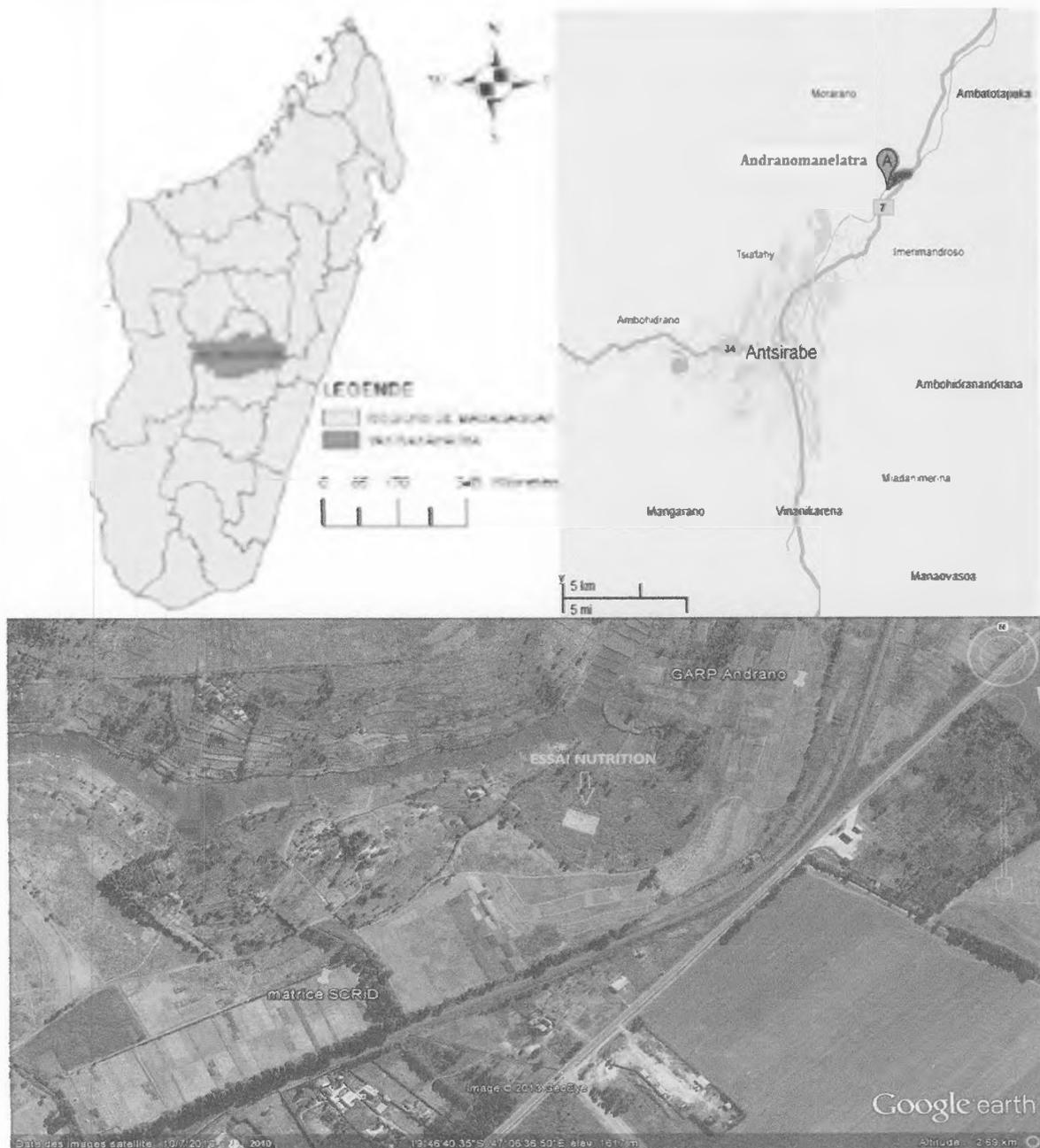


Fig.7 : Localisation de la commune d'Andranomanelatra, du site d'expérimentation agronomique FOFIFA- CIRAD et de l'essai « Nutrition 2012-2013 »

1.4.2- Conditions pédoclimatiques

La région du Vakinankaratra est composée en grande partie par des sols ferrallitiques où les paysans cultivent du maïs, du manioc, du riz pluvial...et des sols alluvionnaires où sont cultivés le riz irrigué et les cultures de contre-saison (UPDR, 2003).

Le climat de cette région est marqué par une saison sèche et froide qui se déroule du mois de Mai jusqu'au mois de Septembre et une saison humide qui débute au mois d'Octobre et se termine au mois d'Avril.

Notre étude a été effectuée durant la période pluvieuse, la seule saison qui permet la culture du riz pluvial dans cette région, mais qui est aussi favorable au développement de la pyriculariose. La figure 9 représente le diagramme ombrothermique de Gaussen correspondant à la moyenne des dix dernières années (2002-2012).

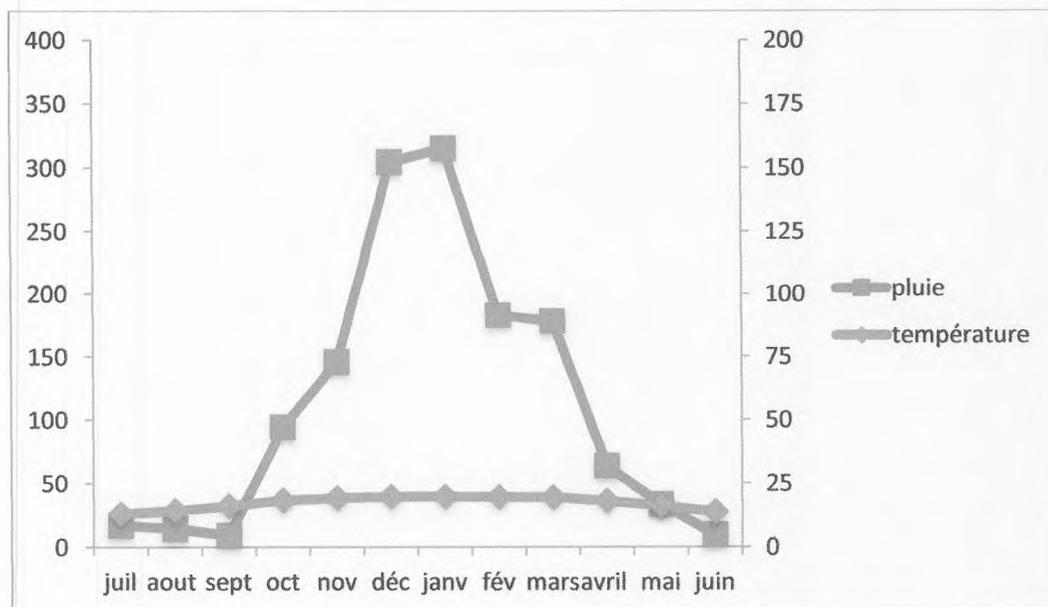


Fig.8 : Courbe ombrothermique de Gaussen d'Andranomanelatra (2002-2012)

Source : station météorologique CIMEL à Andranomanelatra

1.4.3- Description pédologique du site d'Andranomanelatra

En 1979, Zebrowski et Ratsimbazafy ont classé le sol d'Andranomanelatra comme un sol ferrallitique fortement désaturé, typique, rajeuni, humifère, sur matériau volcanique acide, et par Raunet (1981) comme un sol ferrallitique gibbsitique, fortement désaturé, rouge ou ocre, sur alluvions volcano-lacustres.

CHAPITRE II : MATERIELS

2.1 -Matériel végétal

La variété de riz pluvial F152 (variété sensible) et F172 (variété résistante) ont été cultivées sur une même parcelle d'expérimentation. La variété F152 (obtenue par le croisement entre Latsidahy et Fofifa 162) sensible à la pyriculariose, a été cultivée pour tester l'efficacité des divers amendements siliceux; tandis que la variété F172 (obtenue par le croisement entre Jumli Marshi et IRAT 265) qui bénéficie d'une forte résistance à cette maladie a été cultivée dans les zones de l'essai séparant les divers traitements (Photo 1). Il est à noter que ces deux variétés, qui ont été conçues spécifiquement pour être adaptées au climat d'altitude (froid), sont caractérisées par un cycle très court (variétés précoces).



Photo 1 : Variétés F152 et F172 en pleines maturités au champ d'expérimentation

2.2-Le sol

Avant l'analyse proprement dite, l'échantillon de sol doit passer par la phase de préparation.

Cette étape comprend :

- ✓ le séchage de l'échantillon à l'air libre dans une serre ;
- ✓ le tamisage sur un tamis de 2mm diamètre. Puis, une partie est broyée pour passer sur un tamis de 0,2mm de diamètre ;
- ✓ L'emballage de l'échantillon à 0,2mm de diamètre dans un sachet plastique préalablement préparé avec les indications concernant l'échantillon.

La détermination de l'humidité des échantillons séchés à l'air est ensuite réalisée après passage de ces derniers dans l'étuve à 105°C pendant 24 heures.

Tableau 10: Matériels de prélèvement et préparation des échantillons

Opérations	Matériels
Prélèvement de sol	Angady, sachets plastiques, sacs en polystyrène, marqueurs.
Préparation des échantillons	Tamis, pilon, sachet plastique, boîte à tare, étuve, dessiccateur, balance de précision, serre.

2. 3- Dispositif expérimental

Il s'agit d'un dispositif expérimental mis en place par le CIRAD et le FOFIFA pour déterminer les effets des amendements siliceux sur le comportement du riz pluvial (F152) face à la pyriculariose. La figure 9 représente le plan de ce dispositif.

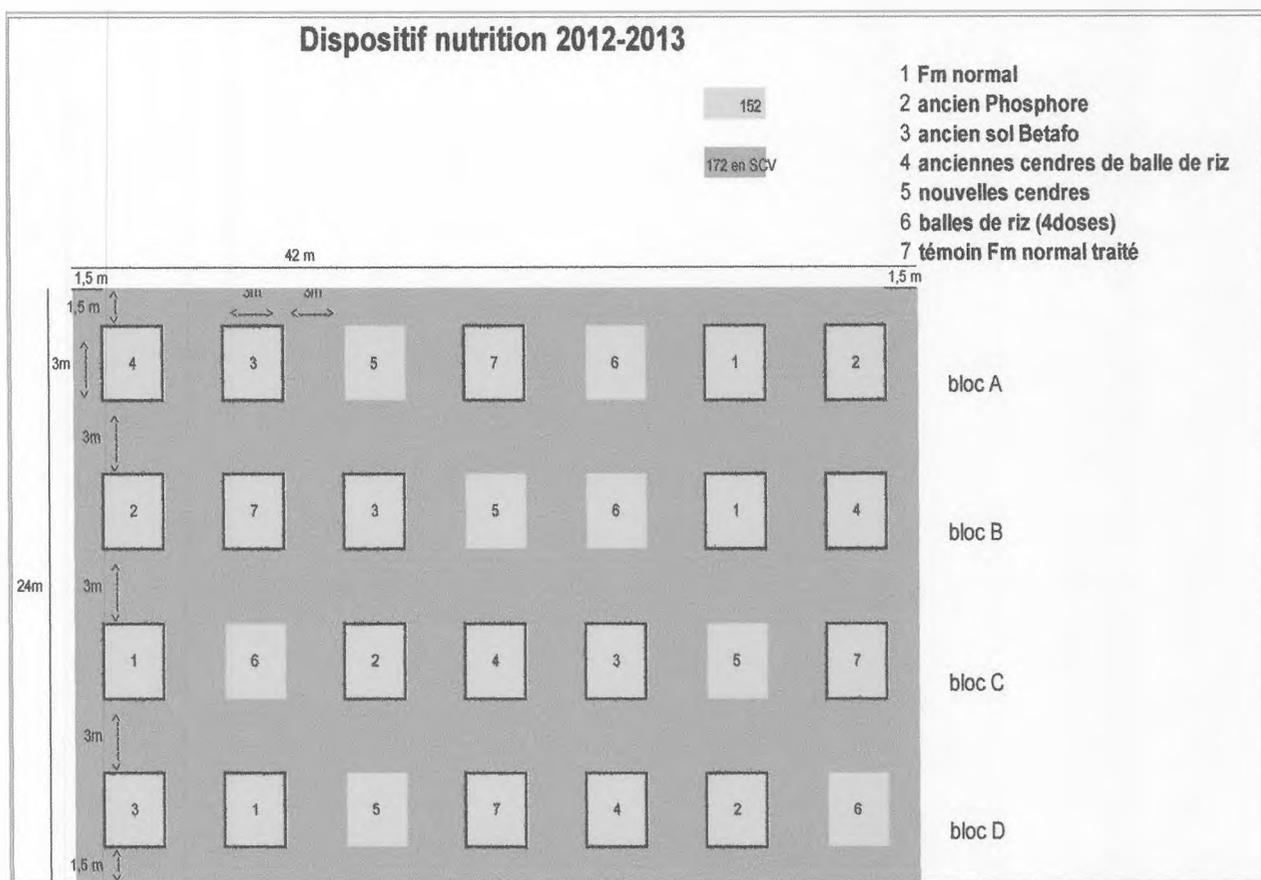


Fig.9 : Dispositif nutrition 2012-2013 d'Andranomanelatra. En jaune, les divers traitements avec la variété F152; en vert, les zones de remplissage entre les traitements avec la variété F172.

a) Système de culture

La variété F152 utilisée pour cette expérience, a été cultivée en système conventionnel (labour). Mais le remplissage de la parcelle par la variété F172 a été fait par système de conservation (SCV).

b) Description

Ce dispositif de nutrition couvre une surface de 1008 m^2 , constitué par quatre blocs (A, B, C, D), contenant chacun sept traitements, placés au hasard suivant les rangs des blocs (Fig.9). Toutes les parcelles (Photo 2) ont reçu une fertilisation "Fm" normale (témoin), c'est-à-dire un apport en 300 kg de NPK + 500 kg de dolomie + 5 t de fumier au moment du semis.

Les 7 traitements correspondent à des apports de silice sous formes :

- Le traitement 1 correspond à témoin "Fm" avec une dose de 300 kg NPK + 500 kg dolomie + 5 t de fumier apportés au poquet au moment du semis.
- Le traitement 2 correspond à l'ancien phosphore avec un apport supplémentaire en phosphore sous forme de superphosphate triple (88 unités au moment du semis, et 66 unités au début de tallage). *↳ lors du cycle précédent de présole on le*
- Le traitement 3 correspond au sol de Betafo apporté sur un carrée de $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ avec une dose de $0,16 \text{ m}^3/\text{m}^2$. En 1979, Zebrowski et Ratsimbazafy ont classé le sol de Betafo comme étant un andosol peu différencié, désaturé, mélanique sur matériaux pyroclastiques basiques. Et par Raunet (1981) comme andosol peu différencié humique sur matériau pyroclastique basique.
- Le traitement 4 correspond à l'ancienne cendre de balle de riz dont les cendres utilisées proviennent de four de brique, et ont été apportés (une dose $5,5 \text{ kg}/\text{m}^2$)
- Le traitement 5 correspond à nouvelle cendre avec une dose similaire au traitement 4 et mais qui n'est pas ^{etc} amendé avec la dolomie, puisque la cendre ayant déjà un fort pouvoir alcalinisant. *pas ici*
- Le traitement 6 correspond à l'apport de balle de riz; pour ce traitement (dose de base fois 4): l'objectif est d'arriver à améliorer la teneur en silice pour réduire l'impact de la pyriculariose. Pour apporter $1 \text{ t}/\text{ha}$ de silice, en prenant une estimation de $19,1 \%$ de SiO_2 dans les balles de riz, il faut ajouter 5235 kg de balles de riz/ha (dose de base calculée dans l'expérimentation de l'année 2011) soit environ $0,5 \text{ kg}/\text{m}^2$ (Antsa, 2011). Pour avoir une très forte dose, $2,2 \text{ kg}/\text{m}^2$ de balle de riz) ont été apportés. *↳*

- Et le traitement 7 correspond au témoin Fm normal traité caractérisé par aucun apport en élément supplémentaire mais deux traitements aux fongicides (Carbendazime et l'Antracol) sont effectués par semaine. Le Carbendazime : La matière active de ce produit est le carbendazime qui est un fongicide organique de la famille des carbamates. L'application de carbendazime se fait chaque Mardi avec une dose de 1 litre par hectare. L'Antracol : La matière active de ce produit est le propinèbe qui est un fongicide organique de la famille des dithiocarbamates. L'application de l'Antracol se fait chaque Vendredi avec une dose de 30 kg par hectare.

Parmi ces 7 traitements, nous avons analysé plus spécifiquement 5 traitements (T1, T3, T4, T5, T6), les deux autres traitements (T2, T7) ne sont pas suivis dans notre étude puisqu'ils ne correspondent pas à nos objectifs spécifiques de recherche et que leurs effets ont déjà été déterminés par d'autres études précédentes.



Photo 2 : Emplacement des parcelles d'expérimentations « Nutrition 2012-2013 »

CHAPITRE III : METHODES

3.1- Mesure du niveau d'infestation par la pyriculariose

L'évaluation de la pyriculariose foliaire doit permettre d'estimer l'ampleur de cette maladie à une date donnée et de détecter des différences entre les traitements au niveau des feuilles et des talles. Elle consiste à détecter les lésions foliaires facilement reconnaissables à l'œil nu. Une feuille est considérée malade lorsqu'elle présente une ou plusieurs tâches dues à la pyriculariose. Une talle est considérée infectée lorsqu'elle porte au moins une feuille malade. Habituellement, la notation se fait sur des poquets pris au hasard dans la parcelle. Sur chaque poquet, le pourcentage de talles infectées est nommé l'« incidence », et sur les talles infectées, le pourcentage de surface foliaire nécrosée représente la « sévérité ». D'où le « produit » (incidence x sévérité) reflète la moyenne de surface foliaire attaquée sur l'ensemble de la parcelle. Dans notre cas, seule la notation globale de pyriculariose a été utilisée.

Dans le dispositif « Nutrition 2012-2013 », quatre notations ont été effectuées correspondant à différents stades de la culture (tallage, floraison, montaison et maturation), réalisées sur 10 poquets représentatifs de chaque traitement.

3.1.1- Suivi de la pyriculariose foliaire

Sur chaque poquet, les talles saines ou malades (portant un ou des symptômes) ont été comptées. Sur 3 talles avec des symptômes, le pourcentage de surface foliaire attaquée par la pyriculariose a été estimé sur les 4 feuilles supérieures.

Par déduction, nous avons pu obtenir la sévérité par poquet ($sevPoq = \text{sévéritéMalades} \times \text{nb talles malades} / \text{nb total talles}$) après avoir calculé la moyenne des pourcentages sévérité par talle ($sevTalle$), la moyenne des sévérité par talle ($sevTalle$) du même poquet, donnant par la suite la sévérité des talles malades ($sevMalades$), ce qui représente la note synthétique de la sévérité x l'incidence à l'échelle d'un poquet (c'est-à-dire une estimation du % de surface foliaire attaqué sur l'ensemble du poquet).

Par conséquent, la valeur moyenne de sévérité par poquet de 10 poquets (moyenne de $sevPoq$ de 10 poquets) représente la valeur de pyriculariose d'une placette par l'extrapolation de cette dernière.

3.1.2- Suivi de la pyriculariose paniculaire

La mesure de la pyriculariose paniculaire permet de suivre l'évolution de la maladie dès l'apparition des panicules. En effet, quand les panicules apparaissent, les mesures foliaires n'ont plus beaucoup d'intérêt car certaines feuilles ont déjà commencé à se dessécher. En outre, c'est l'attaque sur les panicules qui a le plus d'influence sur le rendement car elle

touche directement le remplissage des grains. Dans ce cas, nous avons effectué une notation par placette de traitement, à savoir la notation du nombre de panicules et nombre de panicules attaquées, aboutissant par une estimation du pourcentage de grains attaqués sur 5 panicules malades.

Par la suite, la même procédure a été appliquée pour avoir la sévérité par poquet c'est-à-dire que la sévérité de la maladie est égale au moyenne des pourcentage des grains attaqués sur les 5 panicules malades. Et la sévérité par poquet est égale au rapport du produit de la sévérité de la maladie et le nombre de panicules malades sur le nombre total de panicules) (sévéritéMalades = moyenne des %grains attaqués sur les 5 panicules malades et sevpoq = sévéritéMalades x nb panicules malades / nb total panicules). Cette même méthode a été utilisée pour les quatre types de notations.

Le processus de prélèvement des échantillons du riz, consiste à choisir au hasard dans une surface de 1m^2 , les huit (8) poquets qui pourront bien représenter la totalité des plantes qui se trouvent dans chaque placette des traitements. Pour notre cas, nous avons analysé les échantillons de paille du riz. Cette opération, nous a permis également de déterminer les composantes du rendement qui sont caractérisés par le comptage : de plant / m^2 , de panicules/pieds ou plants, d'épillets/panicule et ensuite par l'évaluation de pourcentage de grain plein par panicule et enfin par la détermination du poids moyen d'un grain par pesée avec une balance de précision au centime de gramme, dont le poids moyen d'un grain est obtenu par le rapport poids / nombre de grains pleins (avant le pesage, les grains pleins comptés doivent être mis à l'étuve pendant au moins 48 heures à une température de 60°C).

A leur réception au laboratoire de FOFIFA, les échantillons de paille de riz ont été placés dans des boîtes en carton ou en bois et ont subi un séchage complémentaire à l'étuve afin d'uniformiser le taux d'humidité résiduelle et surtout de permettre un meilleur broyage. Une fois arrivé au laboratoire d'analyse au LRI, les échantillons déjà broyés ont été examinés pour assurer que leurs granulométries ne dépassent pas la norme acceptée selon la procédure n° POPV01 (1mm) (code interne CIRAD, 2004).

Les prélèvements de vingt échantillons du sol ont été effectués manuellement le 17 avril 2013, avec l'« angady » sur chaque placette amendée dans cette parcelle (espaces entre les plants du riz), dont la profondeur du sol est de 20 cm (la partie exploitable par les racines du riz), et d'une masse environ de 1 kg pour chaque échantillon. Biens équipés de certains matériels (Tableau 10), les échantillons ont été mélangés, emballés dans des sachets plastiques ligaturés et étiquetés avant de les transporter sur le lieu de préparation pour les diverses analyses au laboratoire.

3.2- Analyse au laboratoire

Les analyses réalisées sont décrites ci-dessous. Les matériels et les produits chimiques utilisés sont détaillés se trouvent dans l'annexe I.

3.2.1- Détermination du pH

Dans cette procédure, deux types de pH ont été déterminés :

- pH_{eau} : correspond à la concentration en protons $[\text{H}^+]$ de la solution du sol, c'est-à-dire le pH après il indique l'acidité active ou acidité réelle du sol.
- pH_{KCl} : est un pH permettant la détermination de l'acidité potentielle du sol, c'est-à-dire le pH après extractions des H^+ adsorbés sur les surfaces d'échange du sol après échange avec K^+

La méthode électrométrique a été employée pour déterminer les valeurs de pH de nos échantillons. Elle consiste à plonger une électrode de verre dans une suspension de sol dans un rapport sol : solution de 1 : 2,5 (masse : volume) après avoir étalonné le pH-mètre. La différence de potentiel E (volts) qui est fonction de la concentration en ions H^+ de la solution est ainsi déterminée. La lecture du pH de la solution est faite directement sur le pH-mètre (Pansu et al, 2003).

3.2.2- Détermination des teneurs en silice du sol

La détermination de la teneur en silice pseudo-totale (Si_{total}) est réalisée en deux phases : i) une solubilisation des échantillons de sol par H_2SO_4 concentré dilué au $\frac{1}{2}$, qui permet d'extraire Fe, Al, Ti, Mn et P ; ii) une attaque avec une solution d'hydroxyde de sodium (30%), pour solubiliser les silicates. Cette méthode permet de solubiliser les principaux minéraux des sols ferrallitiques (kaolinite, gibbsite, oxyde de fer), à l'exception des plus stables, notamment le quartz ; c'est pourquoi on parle de teneur « pseudo » totale et non totale de silice.

La première phase consiste en 1^{er} lieu, à peser $100\text{mg} \pm 2\text{mg}$ d'échantillons de sol broyés à $200\mu\text{m}$ sur la balance au $1/10^{\text{ème}}$ de mg et ensuite de les mettre dans des tubes en pyrex (diamètre 15mm, hauteur 20cm), auxquels on ajoute de 2ml d'acide sulfurique au $\frac{1}{2}$ dans chaque tube contenant ces échantillons de sol. En second lieu, les tubes sont recouverts par un mini-entonnoir en pyrex, avant de les mettre sur le bloc chauffant réglé à la température de 190°C durant 30mn à partir du début de l'ébullition. Ils sont ensuite laissés refroidir dans le bloc chauffant. En troisième lieu, les tubes sont placés sur un portoir plastique, et on leur ajoute de 5ml d'eau distillée. Ils sont ensuite soumis à une filtration lente sur un papier sans cendres vers une fiole jaugée de 50ml. Après la filtration, ils sont

transvasés à l'aide d'une pissette d'eau distillée (E.D). Tous les résidus solides sur le papier filtre sont récupérés puis ramenés à 50ml.

La seconde phase consiste à reprendre le résidu de l'attaque sulfurique, resté dans le tube ou sur le filtre (avec environ 15ml) d'eau distillée, récupéré par un jet de pissette. Une solution d'hydroxyde de sodium (30%) d'un volume de 400µl y sera ensuite ajoutée. Ensuite, ces tubes équipés des mini-entonnoirs seront replacés dans le bloc chauffant, chauffés jusqu'à un début d'ébullition et laissés refroidir avant de les transvaser dans une fiole jaugée de 50ml (compléter avec E.D.).

En fin, ces extraits seront filtrés lentement sur un papier sans cendres avec un entonnoir dans un tube plastique (la soude attaque le verre si contact prolongé). La silice totale sera dosée sur ces extraits par la méthode colorimétrie de la silice en solution aqueuse (*méthode bleu*).

3.2.3-Détermination des teneurs en silice labile du sol

La détermination de la teneur en silice labile a pour objectif de quantifier la concentration de la silice disponible pour la plante contenue dans les échantillons du sol par une analyse chimique. Dans ce cas, deux méthodes d'extraction de la silice labile ont été testées (Cornelis et al, 2011) :

La 1^{ère} méthode d'extraction: consiste à ajouter 50 ml de solution d'oxalate d'ammonium ((NH₄)₂C₂O₄), avec 1g de sol tamisé à 200µm, puis à agiter la suspension pendant 2 h à l'agitateur rotatif. Ensuite, les échantillons sont centrifugés pendant 5mn à 1000tours/minute pour décanter les résidus solides de ces extraits, puis filtrés sur un papier à filtration lente whatman 42.

La 2^{ème} méthode d'extraction : consiste à ajouter 20ml de solution de bicarbonate de sodium (Na₂CO₃) 0,1M à pH=11,2 et 1g d'échantillon de sol broyé à 200µm dans un tube à centrifuger Nalgène de 30 ml. Puis ces échantillons ont subi une agitation va –et –vient pendant 30mn à température constante. Avant la filtration, ils ont été centrifugés à 5000 tours/mn pendant 5mn. Le processus de filtration dépend de la nature de l'extrait (limpide ou coloré), s'il est limpide, il s'opère facilement avec le papier filtre Whatman 42, dans le cas contraire il faudrait y ajouter 0,2 g de charbon actif exempt de phosphore et de silice, et puis le laisser reposer une nuit avant la filtration (Olsen, 1954).

3.2.4-Dosage colorimétrique

L'objet et le domaine d'application de cette méthode consistent à doser des concentrations faibles à élevées de silice dans des eaux ou extraits de sol. Le principe de la mesure est la formation d'un complexe silicomolybdique $\text{Si}(\text{Mo}_{12}\text{O}_{40})$ en milieu acide, coloré en bleue qui a été mis en évidence par JOLIS et NEURATH en 1898 (Govett et al, 1961). Pour ce dosage, les réactifs utilisés sont : une solution d'acide sulfurique concentré à 1/2 H_2SO_4 , de l'heptamolybdate d'ammonium $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$, une solution d'acide ascorbique $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ à 3% et une solution d'acide tartrique ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$) à 28%. Ces réactifs peuvent être préparés en avance sauf l'acide ascorbique qui ne se conserve pas plus de 24h. Pour la préparation de la gamme d'étalon, la solution mère de silice de concentration de 1g/l (1000ppm), une solution fille (100ppm) sera préparé (ex : 2,5ml dans une fiole de 25ml, dilution 10). Dans une série de fiole jaugée de 50 ml, on introduit respectivement 50, 100, 200, 350 μl de solution à 100mg L^{-1} (solution fille) à fin d'obtenir des concentrations finales en silice de à 1, 0,2, 0,4, 0,7 et 1,0mg L^{-1} .

Le dosage de la silice des échantillons a été effectué comme suit : dans une fiole jaugée de 50 ml, on introduit un volume de 200 μl de l'extrait siliceux (adapter cette prise d'essai suivant les échantillons à doser) et on y ajoute environ 25ml d'E.D puis 1,25ml de solution de molybdate d'ammonium, ensuite 1,25ml d'acide tartrique à 28% et finalement après 10mn de 500 μl d'acide ascorbique à 3%. Le volume final de chaque fiole a été ajusté à 50ml. Après une heure d'attente environ une coloration bleue, correspondant au complexe silicomolybdique de la solution se développe. La lecture est réalisée à 695nm dans un spectromètre avec une cuve de verre de 10mm de diamètre. Les densités optiques (D.O) ou Absorbance en anglais (A) des échantillons obtenues ont été traitées directement par Excel pour en déduire les valeurs de la concentration en silice dans ces échantillons par l'application de la loi de Beer-Lambert : $\text{mg/l} = f(A)$.

3.2.5-Détermination de teneur en silice, en phosphore et en azote dans la plante

a) Extraction de silice et de phosphore par calcination

Cette méthode s'adresse à tout matériel végétal ou ligneux. Son principe stipule que le taux de cendre de matériel végétal est le résidu minéral après destruction de la matière organique par calcination. Pour chaque échantillon, une masse de 0,5g de poudre de paille de riz a été introduite dans une capsule en quartz. La capsule est placée dans un four dont la température est augmentée progressivement jusqu'à 500°C et qui est ainsi maintenue pendant 2 heures. Un pallier est effectué aux alentours de 200°C jusqu'à la fin du dégagement de fumées. Après refroidissement, les cendres sont humectées avec quelques gouttes d'eau puis

avec 2ml de HCl concentré au 1/2, puis posés sur la plaque chauffante jusqu'au début de vaporisation. Après avoir ajouté 2ml de HCl au 1/2, les extraits ont ensuite été filtrés dans des fioles jaugées de 50ml. Après ajustement au trait de jauge puis homogénéisation par agitation manuelle, les solutions sont transvasées dans des godets préalablement rincés avec la solution. A noter que pour chaque série de calcination, un échantillon de référence (poudre de téole) et un blanc ont été calcinés avec ces échantillons pour vérifier et contrôler le bon déroulement de différentes phases décrites ci-dessus.

b) Dosages de phosphore et de silice totaux dans la plante

Après la calcination de ces échantillons végétaux, la concentration de phosphore de l'échantillon a été mesurée en utilisant la méthode colorimétrique « au bleu » de Murphy et Riley : les ions orthophosphates en solution réagissent avec les ions molybdates en formant un complexe phosphomolybdate dans un milieu acide, qui se combine avec le bleu de molybdène et forme un complexe coloré mesuré à une longueur d'onde de 882nm au spectrophotomètre (Pansu et al, 2003).

Le dosage de la silice a été effectué selon la même méthodologie que celle utilisée pour les extraits de sol.

c) Extraction et dosage en azote total dans la paille du riz

La méthode utilisée est celle de la digestion des échantillons de plante par la méthode Kjeldalh, suivi d'une détermination colorimétrique de l'ammonium formé. La minéralisation selon la méthode « Kjeldalh » consiste en une attaque du matériel végétale par l'acide sulfurique bouillant en présence de sels et de catalyseurs (K_2SO_4 , $CuSO_4$, et Sélénium) ayant pour effet d'augmenter la vitesse d'oxydation de la matière organique. Cette attaque est améliorée pour les composés présentant des liaisons N-O ou N-N par addition d'acide salicylique.

Le dosage de l'azote NH_4^+ dans les échantillons de paille de riz a pour principe de la détermination de l'ammonium en utilisant la réaction de Berthelot modifié. Le NH_4^+ est coloré en monochloramine ; celle-ci réagit avec le salicylate pour former les 5-aminosalysilate. Après oxydation et couplage oxydant, il se forme un complexe coloré vert. L'intensité de sa coloration (mesurée à 660nm sur un skalar relié directement à un ordinateur équipé d'un logiciel Flow Acces), est en relation avec la concentration initiale en ammonium (en $mg L^{-1}$).

3.3-Analyse statistique des résultats

Après avoir arrangé et organisé les données brutes de l'analyse au laboratoire et au champ, tous les variables étudiées ont été soumises à l'analyse de la variance (ANOVA) selon un dispositif complètement randomisé et en blocs avec ces différents variables en facteur principal et les différents traitements en facteur secondaire.

Des matrices et des cercles des corrélations linéaires simples (par Analyses en Composantes Principales ACP) ont été établis entre les variables caractéristiques des sols (pHeau et pHKCl, teneurs en silice totale et labile), des pailles de riz (teneurs en azote et phosphore totales) et les composantes du rendement (en pailles, en grains non triés et en grains pleins) et la sévérité de l'infestation par la pyriculariose. Vingt données pour chacun de ces paramètres (5 traitements x 4 répétitions) ont servi pour établir les coefficients de corrélation entre ces valeurs. Cependant il nous a fallu établir une ACP excluant la variable silice total dans le sol à cause de ses propriétés chimiques (forme cristallisé). Les résultats obtenus par cette méthode serviront de base dans la partie discussions.

Le logiciel utilisé est XLSTAT PRO version 2013 avec un seuil de probabilité de 5%. Si la probabilité calculée est inférieure à 0,05, il existe au moins une différence significative dans les résultats.

TROISIEME PARTIE:
ANALYSE DES RESULTATS ET
DISCUSSION

CHAPITRE I : ANALYSES DES RESULTATS

1.1- Résultats des analyses des échantillons du sol

1.1.1- pH_{eau} et pH_{KCl}

Les valeurs du pH s'étalent du 4,4 à 5,6 (pH_{eau}) et de 3,9 à 4,8 (pH_{KCl}) suivant les types de traitement (Figure 10). L'analyse de variance simple (ANOVA), montre que les pH du dont les pH du sol de Betafo présentent des valeurs significativement supérieures à celles des autres traitements (p -value= 0,008). La corrélation entre les valeurs de pH_{eau} et pH_{KCl} est nettement significative avec une valeur de p -value bilatérale de 0,017.

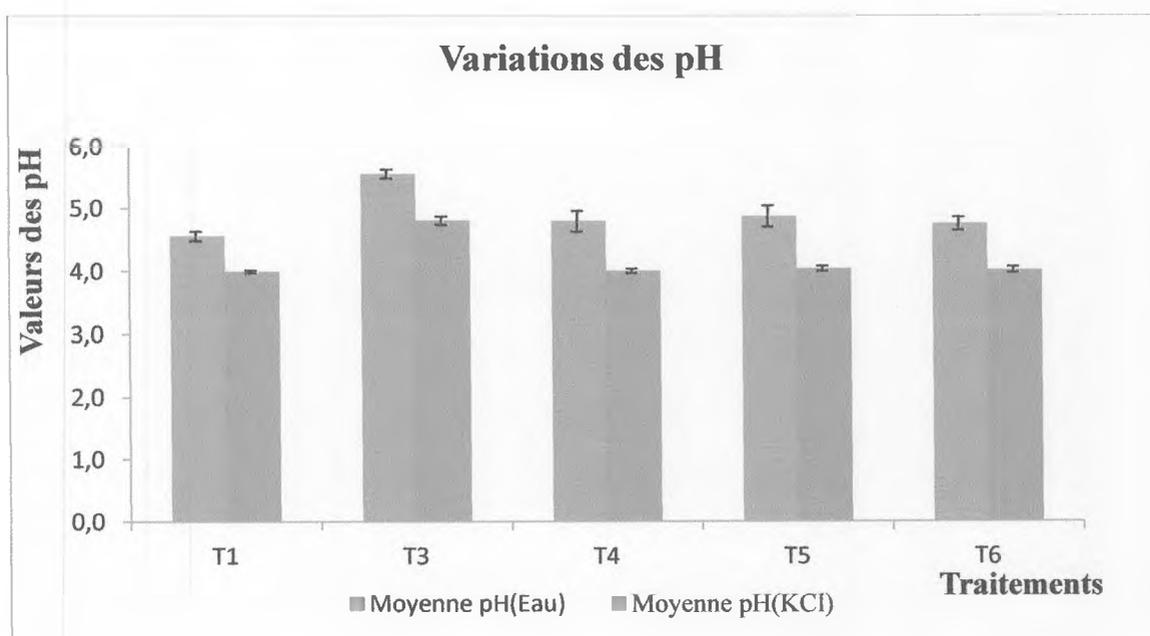


Fig.10 : Comparaison des pH_{eau} et pH_{KCl} du sol entre les divers traitements du dispositif nutrition

1.1.2- Teneurs en silice total

La figure 11 montre les moyennes des teneurs en silice total (mg/g) selon les différents types de traitement. Ces valeurs s'étalent du minimum de 19,3 mg/g (B3) à 110,6mg/g (D4) du maximum, dont leurs moyennes varient du 34,06 mg /g (T3) à 89,94 mg/g (T4). L'analyse de variance relève une différence hautement significative entre les 5 traitements (p -value $\leq 0,0001$). La teneur en silice total du sol de Betafo est significativement inférieure par rapport aux sols des autres.

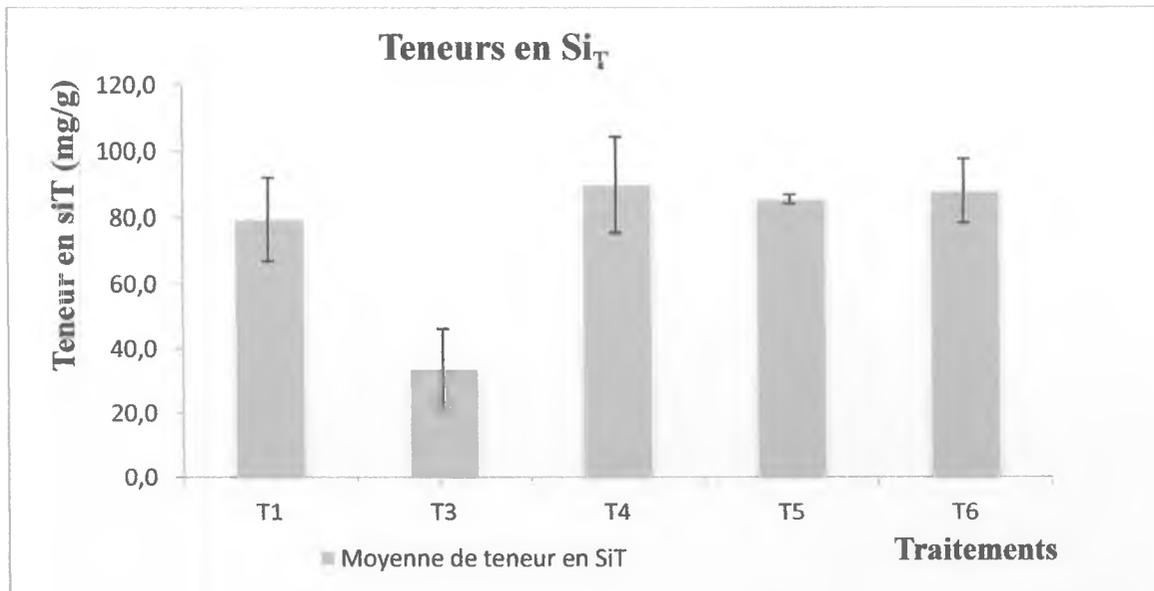


Fig.11: Comparaison des teneurs en silice total des échantillons des sols des divers traitements du dispositif

1.1.3-Teneurs en silice labile (Oxalate d'ammonium)

L'analyse de la variance entre les teneurs en silice labile obtenues par cette méthode montre une différence hautement significative les traitements ($p\text{-value} \leq 0,0001$). La comparaison de moyenne montre que la teneur en silice labile du sol de Betafo est supérieure à celle des autres traitements avec une teneur moyenne de 0,04mg/g contre 0,001mg/g pour les autres traitements (Fig.12). Ce résultat indique que le sol de Betafo est riche en silice disponible pour la plante et que les autres types d'amendements silicatés ne permettent pas suffisamment d'augmenter la teneur de silice sous cette forme.

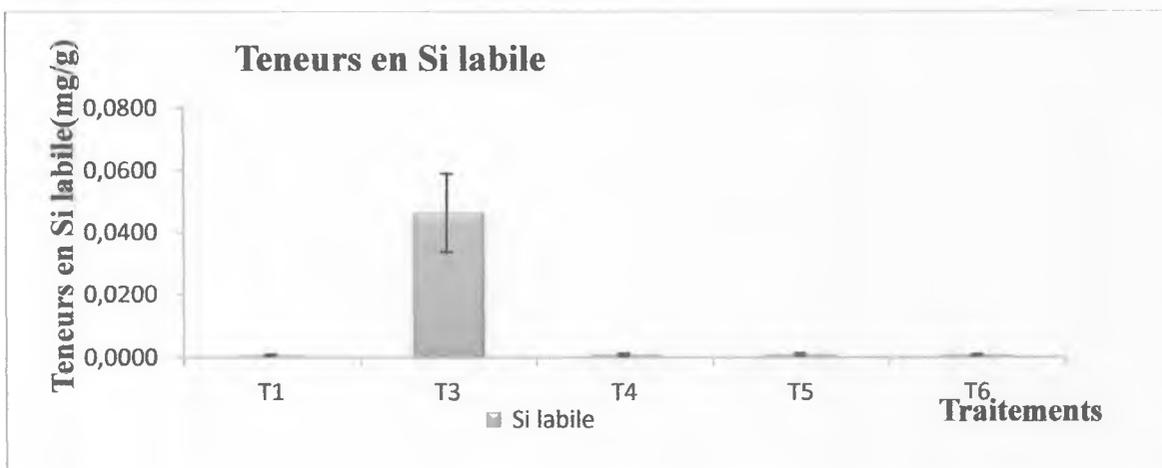


Fig.12 : Comparaison des teneurs en silice labile des échantillons des sols des divers traitements

1.1.4 Teneur en silice labile (Bicarbonate de Sodium)

Malheureusement pour cette méthode, nous n'avons pas pu doser les extraits de la silice labile, car il y avait des interférences chimiques entre les réactifs de l'extraction et ceux utilisés pour le dosage colorimétrique : la présence d'ion sodium induit la formation de complexe de silicate en ion sodium qui ne se colore pas en bleu par notre méthode colorimétrie. Donc les résultats obtenus par cette analyse ne sont donc pas utilisables.

1.2- Résultats des analyses des échantillons du riz

1.2.1- Teneurs en silice total

La figure 13 nous montre la distribution de ces teneurs en silice dans les pailles du riz en fonction des traitements. Elles varient de 0,005mg g⁻¹ (T3=sol de Betafo) à 0,008 mg g⁻¹ (T4=ancienne cendre). L'analyse de la variance montre qu'il n'y a aucune différence significative entre les traitements.

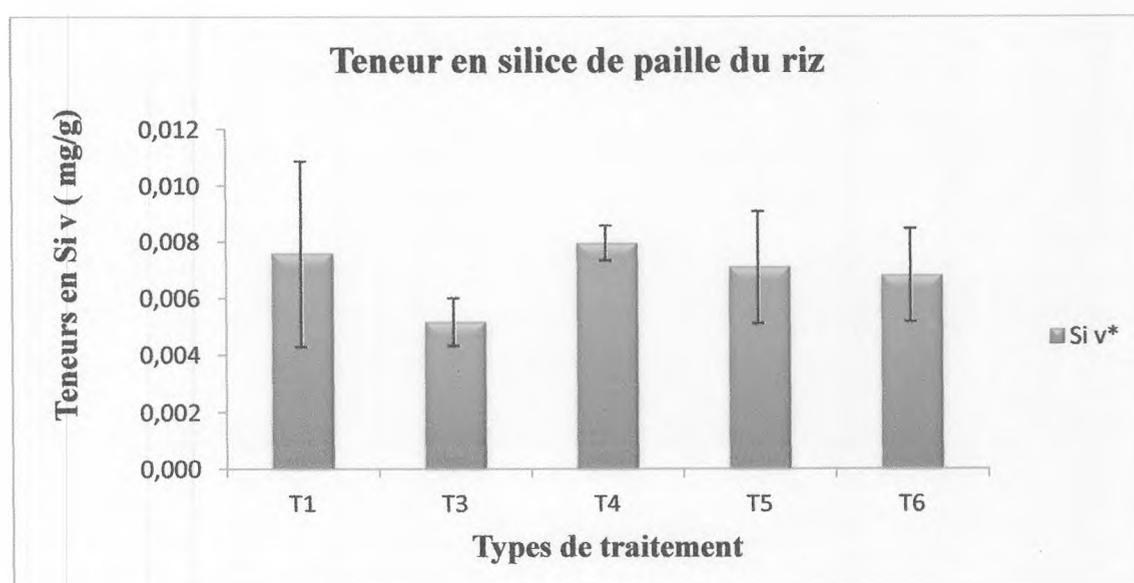


Fig.13 : Comparaison des teneurs en silice des échantillons des pailles de riz des divers traitements

1.2.2- Teneurs en phosphore total

Les teneurs en phosphore total des pailles varient entre 0,5mg/g (T1=Fm) et 1,0mg g⁻¹ (T5=Nouvelle cendre) (Fig.14). L'analyse de variance (ANOVA) montre qu'il y a une différence significative entre les traitements (nouvelle cendre et les trois traitements : Fm, balle de riz, et ancienne cendre) (p-value=0,04).

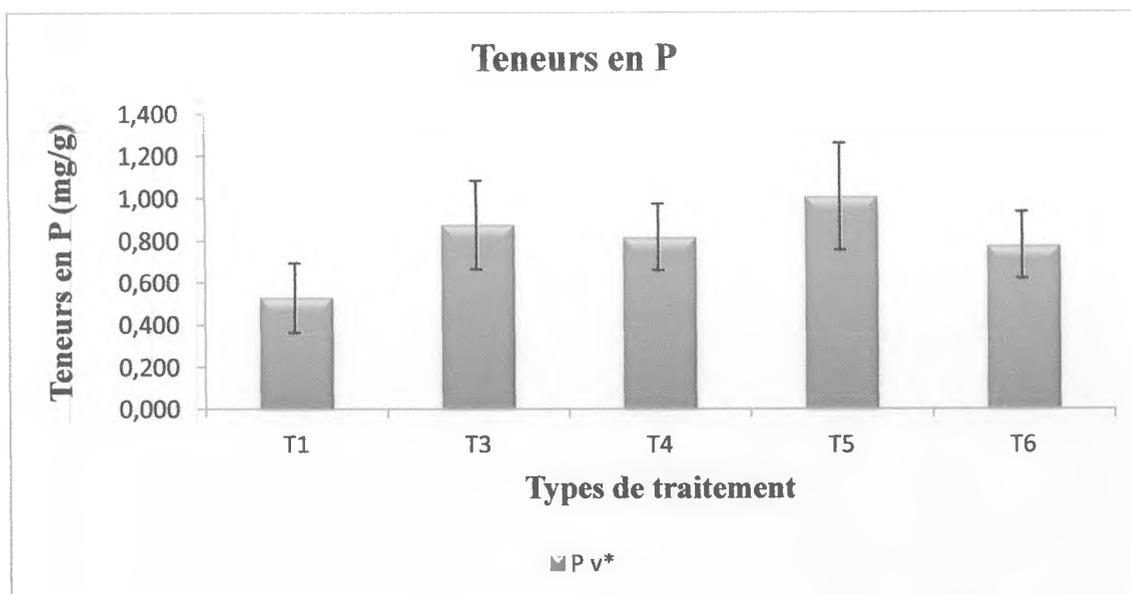


Fig.14 : Comparaison des teneurs en phosphore total dans la paille des échantillons de riz des divers traitements

1.2.3-Teneur en azote total

Les teneurs en azote totale des pailles varient entre 0,18mg g⁻¹(T3) et 0,24mg g⁻¹ (T5) (Fig.15). La figure 15 indique une faible teneur en azote ammoniacale sur le T3 par rapport aux autres traitements mais par ANOVA, cette différence n'est pas significative avec un p-value de 0,17. Cependant, le test de Fisher sur un intervalle de confiance de 95% montre qu'il y a une différence significative le traitement T3 (Sol de Betafo) et T5 (Nouvelle cendre) avec un p-value =0,013.

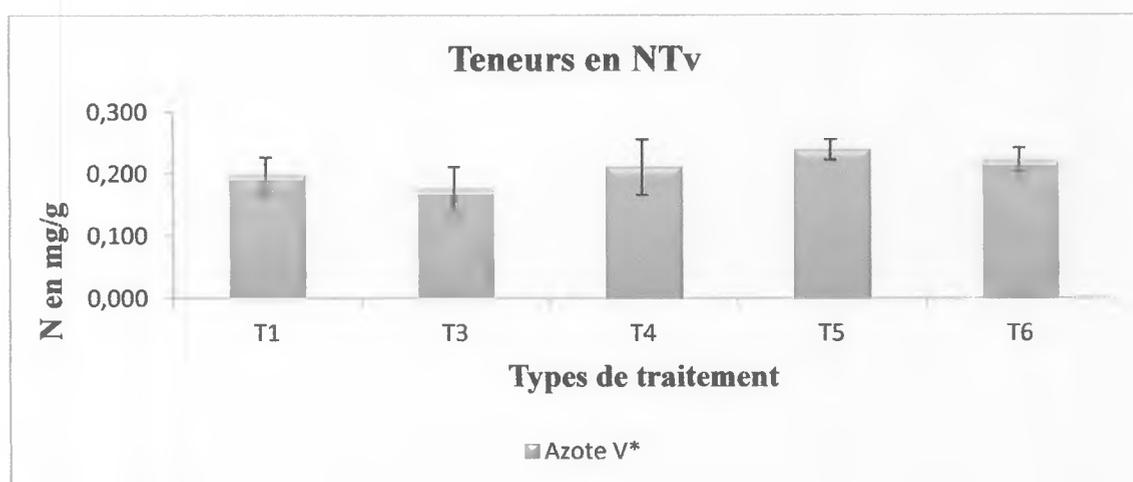


Fig.15 : Comparaison des teneurs en azote total des échantillons des pailles de riz des divers traitements

1.3-Résultats des composantes de rendement

1.3.1-Rendement de pailles par types de traitement

Les rendements des pailles varient entre la valeur minimale de 6,2t/ha (T7) et de maximale 10,2 t/ha (T3) (Fig.16). Les rendements ne présentent pas de différence significatives entre les traitements (p-value = 0,32).

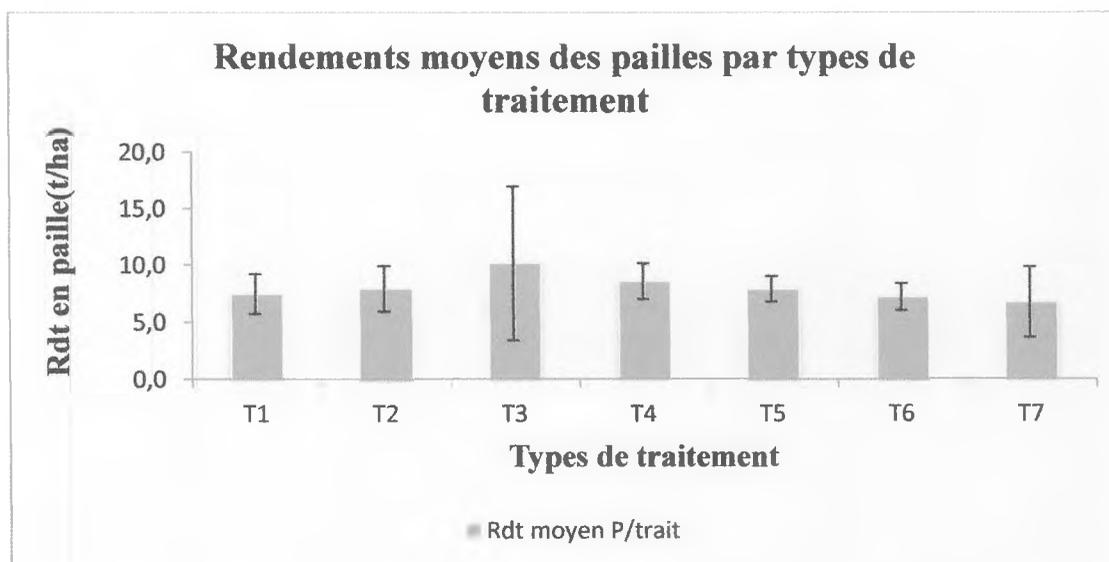


Fig.16 : Comparaison des rendements de paille de la variété de riz pluvial F152

1.3.2-Rendements moyens de graines non triés par traitement

La figure 17 présente les rendements moyens en grain non triés de la variété F152 en fonction des traitements. Ces valeurs varient entre 3,08t /ha (T1) et 6,6t/ha (T3). L'analyse de variance montre qu'il n'y a aucune différence significative entre ces traitements (p-value=0,194). Néanmoins, le test de Fisher montre une différence significative entre les moyennes de T3 (Sol de Betafo) et les deux autres traitements (T4=Ancien cendre, et T6=Balle de riz) avec ses valeurs de p-value respectives 0,044 et 0,048).

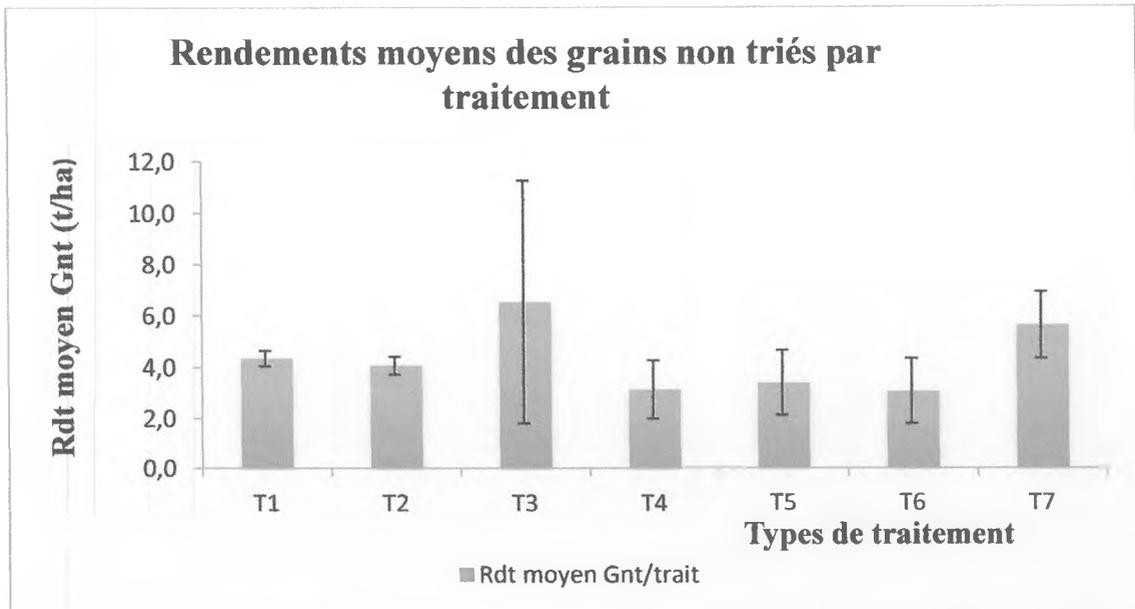


Fig.17 : Comparaison des rendements de graines non triés de la variété du riz pluvial F152 des divers traitements

1.3.3-Rendements moyens de grains pleins par traitement

La figure 18 montre que les rendements moyens de grains pleins s'étalent entre 1,7 t/ha (T5) et 5,2t/ha(T7). Sans tenir compte de T7 (Fm traité au fongicide), le traitement T3 (sol de Betafo) prédomine largement les autres types avec un rendement moyen de 4,96t/ha. L'analyse de variance montre qu'il n'y a aucune différence significative sur l'intervalle de confiance de 95% ($p\text{-value}=0,136$). Le test de Fisher au seuil de signification de 5% montre que les moyens entre le T3 (sol de Betafo) et les trois autres traitements (T4, T5, T6) sont significativement différents avec des valeurs de $p\text{-value}$ respectives 0,039, 0,014 et 0,025.

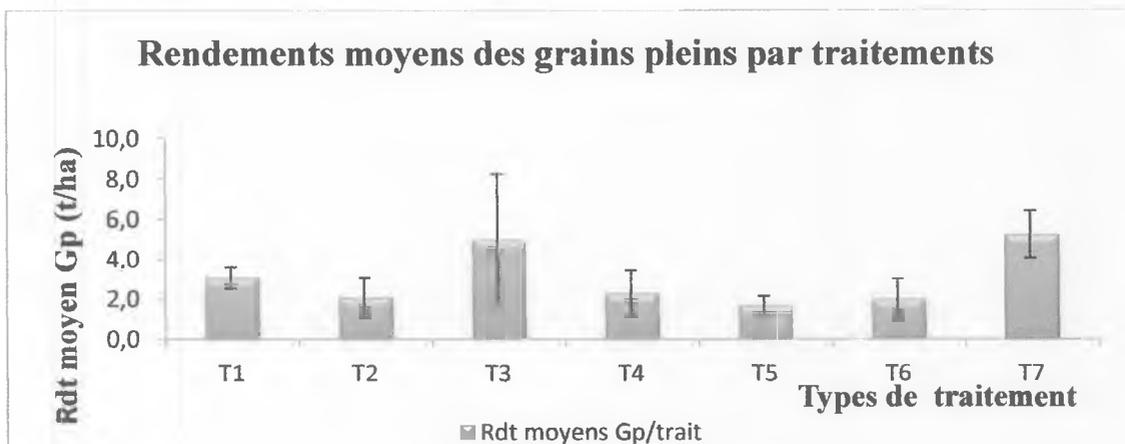


Fig.18 : Comparaison des rendements des grains pleins de la variété du riz pluvial F152 des divers traitements

1.4- Résultats sur la sévérité de pyriculariose

D'après les études et les analyses des résultats escomptés de l'état d'évolution de ce type d'infection, on constate qu'il existe des périodes ou des phases de développement de cette culture où les niveaux d'infestation sont très accentués pour ces types de traitement. Elles se focalisent généralement pendant la phase de floraison et du début de la phase de maturation. L'analyse de variance montre qu'il n'y a pas d'effet significatif des traitements pour aucun des dates de notation correspondant aux divers stades de développement de la variété F152 observés (tallage, floraison, fructification, et début de maturation). Durant ces 4 notations effectuées, le test de Fisher montre qu'il n'existe de différence significative qu'entre le T3 (Sol de Betafo) et T6 (Balle de riz) pendant le stade de floraison (11/02/2013) avec la valeur de p-value de 0,043. Cependant, durant cette campagne la variété F152 est marquée par un faible taux d'infestations en moyenne général de 5%.

Toutes les distributions sont dissymétriques et orientés vers les grandes valeurs. En effet, toutes les moyennes sont supérieures aux médianes (1,3%, 3,3%, 1,2%, 5,6% respectivement supérieures à 0,8%, 2,8%, 0,3% et 4,3%).

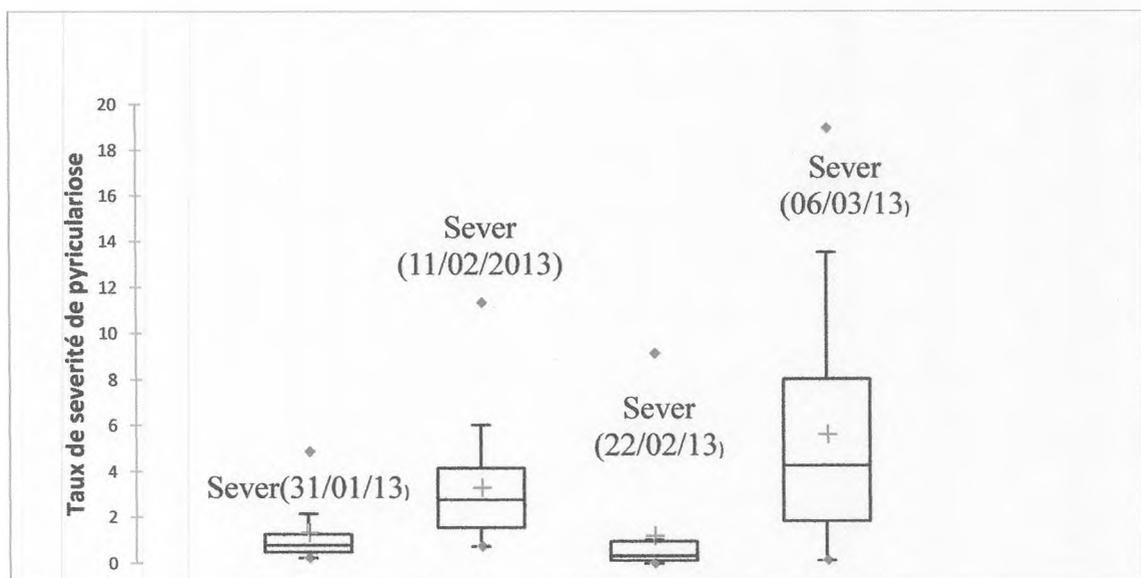


Fig.19 : Distribution des taux de sévérités de la variété F152 suivant les 4 stades de développement

1.5-Corrélation intra et inter caractéristiques

L'Analyse en Composante Principale (ACP) démontre que la corrélation entre les variables étudiés est très significative donnant comme valeur de p-value (p-value < 0,0001)

strictement inférieur au seuil de signification 0,05%. La figure 20 présente le cercle de corrélation expliquant 61,49% de l'interaction entre les composantes du rendement du riz pluvial, des propriétés chimiques des sols et des pailles du riz pluvial, et la sévérité de la pyriculariose. L'axe F1 et F2 expliquent respectivement 45,96% et 15,54% de la variabilité étudiée. L'axe F1 est influencé positivement par la teneur en phosphore total dans la plante dont ce dernier semble influencer aucun de ces variables. L'axe F2 est influencé positivement par la teneur en azote totale assimilée (NTv) qui est groupé avec les différents niveaux de sévérité. L'axe F2 est aussi influencé négativement par la teneur en silice labile (Sioxa), les pH (pH_{eau} et pH_{KCl}) et ils sont en corrélation positifs avec les composantes de rendements (poids des pailles, poids des Grains non triés et rendement en grains pleins). Les variables sévérités sont anticorrélés aux variables rendements.

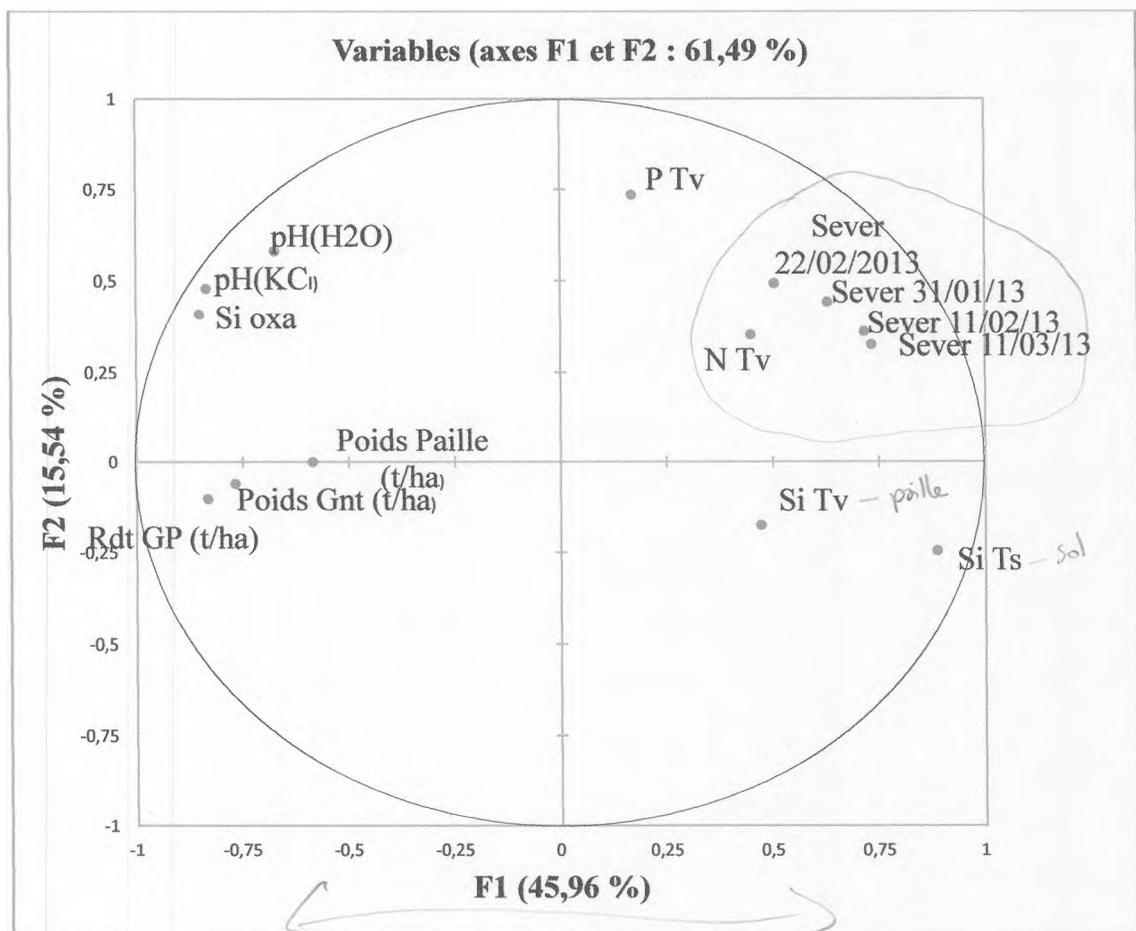


Fig.20 : Cercle de corrélation des variables étudiés

Après avoir analysé la contribution de ces variables dans cette étude, nous avons décidé d'exclure le traitement T3 (sol de Betafo) que nous pensons d'avoir des propriétés physico-chimiques assez spécifiques et très différents du sol d'Andranomanelatra, et le nouveau

cercle obtenu semble plus significative et logique à notre hypothèse de recherche et à nos études bibliographiques. La figure 21 montre que la teneur en silice labile(Sioxa) dans le sol et dans la plante est en corrélation positif avec les rendements en paille (Rdt paille) et un peu moins avec les rendements en grains non triés (Rdt Gnt). Et ces derniers sont anticorrélé aux sévérités. L'axe F1 et F2 expliquent respectivement 36,31% et 15,09% de l'ensemble des variables.

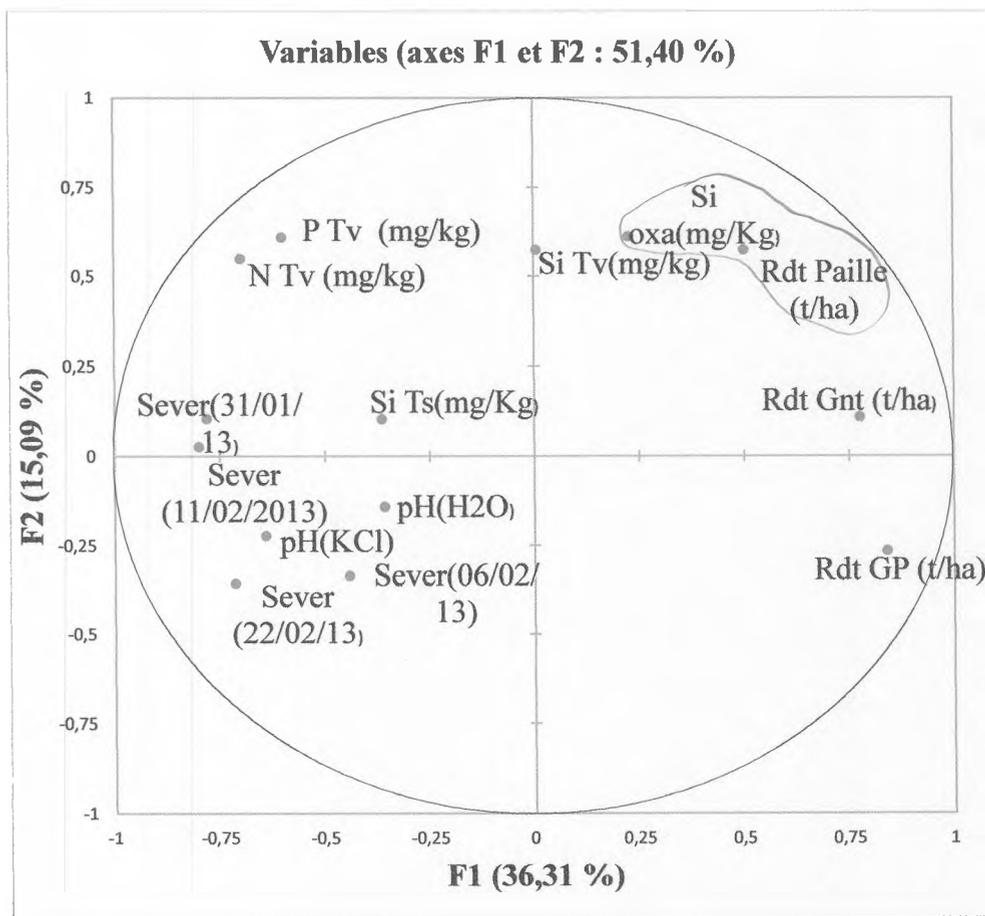


Fig.21: Cercle de corrélation sans le traitement sol Betafo (T3)

CHAPITRE II : DISCUSSION

2.1- A propos de la méthodologie

La riziculture pluviale se trouve confrontée à deux principaux problèmes qui sont la pauvreté des sols de *tanety* et la présence des bio-agresseurs. Dans ces conditions, cette culture est soumise naturellement à des stress abiotiques et biotiques. De ce fait, nous avons mené une recherche intégrant à la fois des données agronomique, pédologique et phytopathologique, pour tenter d'apporter une solution efficace et durable à ce problème.

Sur le dispositif « nutrition 2012-2013 », nous avons effectués des traitements basés sur des amendements silicatés que nous pensons pouvoir influencer la teneur en silice assimilable du sol d'Andranomanelatra. Cependant, les résultats obtenus montrent que les teneurs en silice labile obtenus après l'apport de cendres et de balles de riz restent très faibles. Seul le sol de Betafo contient naturellement de silice labile à un niveau élevé comparativement aux autres types d'apports. En outre, nos résultats d'analyse confirment que l'apport de cendre et de balles de riz a permis d'augmenter la teneur en silice totale du sol de culture. Malheureusement, la silice sous cette forme n'est pas assimilable par la plante donc il semble nécessaire de trouver d'autres alternatives qui permettent d'accroître la solubilité de cet élément contenus dans ces apports. D'ailleurs Velly (1965) a déjà affirmé que les balles de riz portées à haute température sont pratiquement inutilisables.

D'après nos synthèses bibliographiques, les idées des chercheurs semblent totalement divisées y à propos. D'un côté, y en a ceux qui soutiennent l'hypothèse indiquant la formation de barrière mécanique au niveau de l'épiderme de la plante (approche pédologique); et de l'autre côté, y en a ceux qui accordent plus d'intérêts sur l'effet inducteur lié au système de défense naturel de la plante (approche biochimique, et pédologique).

2.2-Effets de la fertilisation silicaté sur l'épidémie de la pyriculariose

L'analyse statistique en composantes principales montre qu'il n'y a une corrélation entre la teneur en silice dans le sol et dans la plante (Fig.20). Nous pouvons toujours imaginer que cet amendement silicaté a contribué à la maîtrise de cette maladie mais la contribution de cet élément reste toujours mal comprise. Il semble à priori augmenter la disponibilité de phosphore du sol et diminuer la capacité d'absorption d'azote par la variété choisie, la teneur en azote de la plante influençant positivement la sévérité de cette maladie. Les parcelles traitées par le sol de Betafo bénéficient d'une protection contre cette maladie (0,8% à 2,8 %)

comparée aux autres traitements (jusqu'à 9,84%). En particulier l'apport en balle de riz semble augmenter la sévérité de cette maladie, les balles ayant pu servir comme hôte intermédiaire de l'agent pathogène responsable de cette maladie et ainsi réinfester les parcelles.

2.3-Effets de la pyriculariose et des apports en silice sur le rendement de la variété F152

Comme d'autres types de maladies, la pyriculariose entraîne pratiquement une réduction de rendement mais ses effets dépendront toujours de sa gravité. Dans le cas de notre expérimentation, la variété sensible F152 semble être moins attaquée par cette maladie puisque le taux d'infestation ne dépasse pas encore le seuil de tolérance 10%. Belanger et al (1995) ont suggéré que l'augmentation de rendement chez les plantes suite à une application de silice est reliée à une meilleure répression de la maladie. Par ailleurs, le taux d'infestation est très modéré, même pour le témoin donc il est difficile de conclure sur ses effets sur le rendement. Des expérimentations menées par Seebold en 2004 a déjà permis de démontrer que l'apport de silice permet de diminuer l'attaque de la pyriculariose dans les sols pauvres en cet élément. Cependant, la silice apportée est en général des formes minérales solubles comme le silicate de calcium ou silicate de potassium ($K_2O_5Si_2$, $CaSiO_3$) qui ne sont pas disponibles à Madagascar. C'est pour cette raison que nous avons utilisé des cendres de balles de riz issues de four à brique qu'on trouve facilement dans les zones rizicoles. La balle de riz est reconnue pour être riche en silice et elle est d'ailleurs depuis longtemps utilisée par certains paysans dans l'amendement des champs mais la dose d'apport régulier doit être bien déterminée avant l'emploi.

2.4-Rélation entre la nutrition et le statut nutritionnel du riz

De nombreuses études démontrent que l'équilibre nutritionnel favorise une bonne protection des cultures. Au Brésil, des études sur des systèmes de riz pluvial en zone de savane montre qu'il y a une réduction significative du nombre de lésion par feuille pour un apport de phosphore à partir de 44 jusqu'à 66 Kg /ha malgré un fort développement végétatif qui d'habitude favorise le développement du pathogène. Dans la même expérimentation, il a été aussi observé que le phosphore affecte l'absorption du zinc, résultat d'une réaction chimique dans le sol ou d'un phénomène d'antagonisme entre ces deux éléments dans la plante (Prabhu, 2007). Au Cameroun, Ségué et al (1981) ont démontré que la nature du sol peut avoir une influence sur la sensibilité de la plante au pathogène. Ensuite, une

expérimentation, menée en 2008-2009 par l'URP SCRiD en utilisant le sol de Betafo sur des parcelles à Andranomanelatra a permis de réduire significativement la sévérité de la pyriculariose (Huot de Longchamp, 2009). C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé ce sol dans notre expérimentation.

Les résultats de nos analyses montrent que ces amendements ont permis d'augmenter la teneur en phosphore dans la paille du riz (Fig.14).

2.5-Verification des hypothèses

- ✓ **H1 : Les caractéristiques naturelles des sols (sols de Betafo ou Andranomanelatra) ou des apports riches en silice (cendre, résidus) modifient la teneur en silice labile (disponible) des sols ;**

D'après les analyses statistiques sur les diverses variables, on remarque une légère augmentation des teneurs en silice labile dans le sol d'Andranomanelatra mais la différence entre les trois traitements (T4, T5, T6) et le témoin (T1) n'est pas significative. Seul la teneur en silice labile du sol de Betafo présente une différence significative. Par contre, les divers apports riches en silice (cendre, résidus) n'ont pas modifiés la teneur en silice labile des sols. Donc notre 1^{ère} hypothèse est partiellement validée.

- ✓ **H2 : L'augmentation de la teneur en silice labile dans le sol affecte la teneur en silice des plantes et contribue à améliorer la croissance de la culture de riz ;**

L'analyse de variance a montré qu'il n'y a aucune différence significative entre ces traitements concernant les teneurs en silice total dans la plante. Par contre l'ACP montre que la silice labile dans le sol est corrélée positivement avec les rendements du riz pluvial (F152). A noter que seuls les rendements des parcelles traitées par le sol de Betafo présentent une différence significative par rapport autres types de traitements (T4, T5, T6) sauf avec le témoin (T1) d'après le test de Fisher. Donc notre 2^{ème} hypothèse est partiellement validée.

- ✓ **H3: La fréquence et la sévérité de la pyriculariose décroît en fonction de la teneur de la silice labile dans le sol et la plante.**

Le niveau de sévérité entre les témoins et les traitements, statistiquement ne présente aucune différence significative d'après l'analyse de variance. Pourtant le test de Fisher révèle qu'il y a une différence significative entre T3 (Sol de Betafo) et T6 (Balle de riz) mais avec le témoin(T1). Donc la 3^{ème} hypothèse n'est pas validée.

CONCLUSION ET PERSPECTIVE

L'axe central de cette recherche est de déterminer l'implication de la silice dans la lutte contre la pyriculariose, et en particulier de déterminer la teneur en silice labile dans le sol et celle de la teneur en silice total absorbés dans la plante. La silice, qui est un élément très abondant dans les sols n'intéressait pas vraiment les chercheurs en sciences du sol et semblait être méconnus par d'autres disciplines, ce qui a rendu assez difficile la recherche bibliographique concernant ce thème de recherche. Les analyses de silice dans les sols et les plantes ne sont pas réalisées en routine dans la plupart des laboratoires d'analyses comme le Laboratoire des RadioIsotopes. Il a donc été nécessaire de mettre au point les méthodologies de recherche utilisées pour développer cette recherche.

Les résultats de notre recherche semblent pouvoir expliquer la liaison entre la teneur en silice soluble et le niveau d'infestation de la pyriculariose et ainsi que le niveau de rendement du riz pluvial. Cependant nous ne sommes pas encore certains que les résultats obtenus reflètent effectivement la réalité pratique. Lors de la mise en place de cette d'expérimentation « Nutrition 2012-2013 », nous n'avons pas pu trouver d'autres types d'amendements silicatés minéraux plus solubles que ceux que nous avons testés. Les doses utilisées de cendres et de balles de riz n'ont pas permis d'augmenter la teneur en silice labile dans le sol d'Andranomanelatra. Ces teneurs sont peut-être insuffisantes ou les produits utilisés sont peu solubles et ne présentent donc pas d'intérêt agronomique. Pour les trois types de rendement (rendement de paille, rendement de grains non triés, rendement de grains pleins) l'analyse des variances (ANOVA) ne trouve aucune différence significative entre les 5 traitements mais le cercle de corrélation semble montrer une corrélation positif avec la silice labile (Sioxa). Ainsi, cette ligne de recherche mérite encore un approfondissement avant de confirmer ou infirmer les résultats obtenus par cette recherche. De plus, durant cette saison, le niveau d'infestation de cette maladie semble avoir été peu sévère, ce qui ne permet pas d'observer correctement les effets des divers traitements.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akintayo I., Cissé, B., Zadji, L.D., 2008. *Guide pratique de la culture des NERICA des plateaux*, 29pp, Centre du riz pour l'Afrique (ADRAO), Cotonou, Bénin.
- Bharwadjc.L, Singhb.M, 1986. *The stability of resistance to Pyricularia oryzae Cav. In Rice*. Indian Phytopathology 36: 422-426.
- Bélanger R. R., Benhamou N. et Menzies J. G., 2003. Cytological evidence of an active rôle of silicon in wheat résistance to powdery mildew (*Blumeria f. sp. tritici*). Phytopathology 93: 402-412.
- Bélanger, R.R., Bowen,P.A., Ehtret, D.L. et Menzies, J.G. 1995. Soluble silicon: its role in crop and disease management of greenhouse crops. 79:329-336.
- Carver T. L. W., Zeyen R. J. et Ahlstrand G. G., 1987. The realltionship between insoluble silicon and sucess or failure of attempted primary penetration by powdery mildew (*Erysiphe graminis*) germlings on barley. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 31: 133-148.
- CIRAD, 2004. Analyse des végétaux, laboratoire d'analyse, pp:77.
- Chérif M., Asselin A. et Bélanger R. R., 1994. Defense reponses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. *Phytopathology* 84: 236-242.
- Chérif M., Menzies J. G., Benhamou N. et Bélanger R. R., 1992a. Studies of silicon distribution in wounded and *Pythium ultimum* infected cucumber plants. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 41: 371-385.
- Chérif M., Benhamou N., Menzies J. G. et Bélanger R. R., 1992b. Silicon induced résistance in cucumber plants against *Pythium ultimum*. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 41: 411-425.
- Datnoff L.E et Alvarez J. (2001). *The economies of silicon for integrated management and sustainable production of rice and sugarcane*. Dans: Silicon in agriculture, (eds L.E.Datnoff, G.H.Snyder, & G.H.Korndôrfer), pp. 221-239. Elsevier, Amsterdam.
- Datnoff L.E., Snyder G.H., et Deren C.W. (1992). *Influence of Silicon Fertilizer Grades on Blast and Brown Spot Development and on Rice Yields*. Plant Disease, 76: 1011-1013.
- Epstein E. (1999) Silicon. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 750: 641-664.

- Fauteux F, Chain F., Belzile F, Menzies J.G, et Bélanger R.R. (2006). *The protective rôle of silicon in the Arabidopsis-powdery mildew pathosystem*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 103, 17554-17559.
- Fawe A., Abou-Zaid M., Menzies J. G. et Bélanger R. R., 1998. Silicon-mediated accumulation of flavonoid phytoalexins in cucumber. *Phytopathology* 88: 396-401.
- Govett, G.J.S. 1961. Critical factors in the determination of silica. *Anal.Chim. Acta.*25:69-80.
- 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. 54p.
- Ishiguro K., 2001. Review of research in Japan on the rôles of silicon in conferring resistance against rice blast. Dans: *Silicon in Agriculture*. Datnoff L. E., Snyder G. H. et Korndörfer G. H., editors. *Elsevier Science B. V*, Amsterdam. Pages 277-291.
- Jones L.H.P. et Handreck H.A. (1967). *Silica in soils, plants, and animal*. *Advances in Agronomy*, pp.19, 107-149.
- Kim S. G., Kim K. W., Park E. W., et Choi., 2002. Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: a possible mechanism of enhanced host résistance to blast. *Phytopathology* 92: 1095-1103.
- Lacharme, M, 2001. *Le plant de riz : données morphologiques et cycle de la plante*, 19pp, Ministère du développement rural et de l'environnement : direction de la recherche formation vulgarisation, France.
- Lacharme, M., 2001. *La fertilisation minérale du riz*, 15pp, Ministère du développement rural et de l'environnement : direction de la recherche formation vulgarisation, France.
- Liang Y.C, Sun W.C, Si J., et Romheld V. (2005). *Effects of foliar- and root-applied silicon on the enhancement of induced résistance to powdery mildew in Cucumis sativus*. *Plant Pathology* 54, 678-685.
- Ma J.F., Miyake Y., & Takahashi E. (2001b). *Silicon as a beneficiary élément for crop plants*. Dans: *Silicon in agriculture*, (eds L.E.Datnoff, G.H.Snyder, & G.H.Korndörfer). 17-41. Elsevier, Amsterdam.
- Ma J.F., Yamaji N., Mitani N., Tamai K., Konishi S., Fujiwara T., Katsuhara M., et Yano M. (2007). *An efflux transporter of silicon in rice*. *Nature* 448, 209-212.

- MBODJY, FAYEA, DEMAY G, COLY J.P, MALOUJ.P, 1989b. *La Pyriculariose du riz en Casamance, au Sénégal Criblage pluriannuel de variété de riz aquatique pour leurs résistances aux maladies*. Agronomie Tropicale 44(1) : 51-57.
- Menzies J. G., Bowen P., Ehret D. et Glass A. D. M., 1992. Foliar applications of potassium silicate reduce severity of powdery mildew on cucumber, muskmelon, and zucchini squash. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 112: 902-905.
- Ministère de l'agriculture, 2010. Ministère de l'agriculture, 2010. *Draft du document de la stratégie nationale du développement rizicole*, 30pp, CARD, Madagascar.
- Prabhu A.S., Nand K.F., Rodrigo F.B., Fabricio A.R.2007. Phosphorus and plant disease. Pages 45-53 in: Mineral nutrition and plant disease.
- PRUD'HOMME Elodie. *Rôles du cation alcalin et des renforts minéraux et végétaux sur les mécanismes de formation de géopolymères poreux ou denses* [En ligne]. Thèse de doctorat : Matériaux Céramiques et Traitements de Surface. Limoges : Université de Limoges, 2011. Disponible sur <<http://epublications.unilim.fr/theses/2011/prud-homme-elodie/prud-homme-elodie.pdf>> (consulté le 15/08/2013).
- Rodrigues FA, Datnoff LE, Korndörfer GH, Seebold KW, Rush MC. 2001. *Effect of silicon and host resistance on sheath blight development in rice*. Plant Dis 85:827-832.
- Raunet M., Seguy L. et Fovets Rabots C., 1998. *Semis direct sur couverture végétale permanente du sol: de la technique au concept*. In: Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture. Rasolo F. et Raunet M. (Eds). Antsirabe, Madagascar.
- Savant NK, Korndorfer GH, Datnoff LE, Snyder GH. 1999. *Silicon nutrition and sugarcane production. A review*. J. Plant Nutrition. 22:1853-1903.
- Seebold KW, Datnoff LE, Correa-Victoria FJ, Kucharek TA, Snyder G.2004. *Effects of silicon and fungicides on the control of leaf and neck blast in upland rice*. Plant Dis. 88: 253-258.
- Sommer et al, 2006): Sommer M, Kaczorek D, Kuzyakov Y, Breuer J. 2006. *Silicon pools and fluxes in soils and landscapes. A review*. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169:310–329.

- Sester M, Raveloson H, Tharreau D, Dusserre J, 2013 (in press). *Conservation agriculture cropping system to limit blast disease in upland rainfed rice*. Plant Pathology.
- Samuels A. L., Glass A. D. M., Ehret D. L. et Menzies J. G., 1991. Mobility and deposition of silicon in cucumber plants. *Plant, Cell and Environment* 14: 485-492.
- S.R.Olsen S.R., 1954-Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circ. 939. USDA, Washington, DC.
- Tantely Mamlnlalna RAZAFIMBELO.2005.*Stockage et protection du carbone dans un sol ferralitique sous-systèmes en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres Malgaches*. Thèse de doctorat, 156pp.
- Velly J. 1975. *La fertilisation en silice du riz à Madagascar*. Pages 305-324 dans *Agronomie tropicale*, n° 4 Octobre-Décembre 1975.
- VAN DER PLANK J.E., 1968. *Diseases resistance in plants*. Academic Press, New-York, Etats-Unis d'Amérique, 206 pp.
- Xavier Devleeschouwer, 2008-2009. Altération chimique ; [En ligne] : www.ulb.ac.be/sciences/.../Sedimento_alteration_chim_sols_2008-09.pdf in : cours de Sédimentologie (GEOL-F-204), ULB, pp : 73 (Consulté 5/06/13).
- Wollast et Mackenzie, 1983.*Cycle biogéochimique du silicium en milieu marin*, [En ligne] : www.com.univ-mrs.fr/~leblanc/wp-content/.../pdf/Chapitre%20I.pdf;in Chapitre I. Introduction – Etat de l'Art (Consulté 10/07/13).
- Winslow M. D., 1992. *Silicon, disease resistance, and yield of rice genotypes under upland cultural conditions*. *Crop Science* 32, 1208-1213.
- Zebrowski C. et Ratsimbazafy C; 1979 - *Carte pédologique de Madagascar au 1/100000*.Feuille Antsirabe. Paris, Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.

Annexe I: Matériels et produits d'analyse au laboratoire

Nom d'analyse	Matériels	Produits chimiques
pH(H₂O), pH(KCl)	Flacon en plastique, dispensette, agitateur rotatif, bécher, pissette, balance de précision, et pH-mètre.	Eau distillé, Chlorure de potassium (KCl).
Silice total (sol)	Balance de précision, béchers, fiole jaugée de 50ml, pipettes de précisions, tubes +mini entonnoirs en pyrex, grand entonnoir, portoir plastique, papier filtre, bloc chauffant et spectromètre.	Acide sulfurique technique et concentré, concentré, sodium hydroxyde, acide de molybdate d'ammonium, acide tartrique, acide ascorbique, solution mère préparé avec titrisol et eau distillé.
Silice total (végétaux)	Capsules en porcelaine, balance de précision, plaque chauffante, papier filtre sans cendre et spectromètre, fiole jaugée de 50ml.	Acide sulfurique technique, eau distillée, téole, acide de molybdate d'ammonium, acide tartrique, acide ascorbique.
Silice labile (1^{ère} méthode)	Balance de précision, fiole jaugée de 50ml, agitateur rotatif, pissette, centrifugeuse, boîte plastique et spectromètre.	Ammonium oxalate, acide oxalique, eau distillée, acide de molybdate d'ammonium, acide tartrique, acide ascorbique,
Silice labile (2^{ème} méthode)	Balance de précision, fiole jaugée de 50ml, pissette, pH-mètre, agitateur magnétique, centrifugeuse, papier filtre Whatman42, spectromètre et de pissette.	Bicarbonate de sodium, acide ascorbique, acide tartrique, acide molybdate d'ammonium et eau distillée.
Phosphore	Capsules en porcelaine, balance de	Molybdate d'ammonium,

total (végétaux)	précision, bloc chauffant, papier filtre sans cendre, flacon brun en pyrex, fiole jaugée, agitateur magnétique (vortex), et spectromètre.	acide ascorbique, acide sulfurique, téole et eau distillée.
Azote total (végétaux)	Balance de précision, tubes+ mini entonnoirs en pyrex, bloc chauffant, portoir en fer, fiole jaugée, pissette, agitateur magnétique (vortex), parafilm et scaler.	Catalyseurs, acide sulfurique concentré, solution azote 5000ppm, énergie (eau+ acide sulfurique) et eau distillé.



Mortiers



Tamis



Micropipettes



Agitateurs va et viens



Distillateur



pH-mètre



Balance de précision



Spectrophotomètre



Plaque chauffante



Dispensette

Annexe II : Matrice de corrélation du 1^{er} cercle de corrélation (avec sol de Betafo)

Variables	pH(H2O)	pH(KCl)	Si Ts(mg/g)	Si oxa(mg/g)	Si Tv(mg/g)	N Tv(mg/g)	P Tv(mg/g)	Rdt Paille (t/ha)	Rdt Gnt (t/ha)	Rdt GP (t/ha)	Sever 31/01/13	Sever 11/02/13	Sever 22/02/2013	Sever 11/03/13
pH(H2O)	1	0,835	-0,725	0,794	-0,519	-0,224	0,230	0,218	0,383	0,407	-0,236	-0,286	-0,184	-0,136
pH(KCl)	0,835	1	-0,890	0,962	-0,462	-0,469	0,128	0,367	0,543	0,602	-0,288	-0,433	-0,192	-0,234
Si Ts(mg/g)	-0,725	-0,890	1	-0,914	0,389	0,610	0,000	-0,414	-0,511	-0,581	0,500	0,639	0,330	0,279
Si oxa(mg/g)	0,794	0,962	-0,914	1	-0,472	-0,550	0,074	0,367	0,497	0,580	-0,311	-0,452	-0,238	-0,323
Si Tv(mg/g)	-0,519	-0,462	0,389	-0,472	1	0,389	0,197	0,054	-0,153	-0,239	0,284	0,331	0,018	0,124
N Tv(mg/g)	-0,224	-0,469	0,610	-0,550	0,389	1	0,597	-0,254	-0,435	-0,594	0,533	0,615	0,315	0,297
P Tv(mg/g)	0,230	0,128	0,000	0,074	0,197	0,597	1	0,165	-0,056	-0,197	0,364	0,198	0,233	0,266
Rdt Paille (t/ha)	0,218	0,367	-0,414	0,367	0,054	-0,254	0,165	1	0,806	0,778	-0,268	-0,324	-0,285	-0,231
Rdt Gnt (t/ha)	0,383	0,543	-0,511	0,497	-0,153	-0,435	-0,056	0,806	1	0,958	-0,417	-0,470	-0,318	-0,336
Rdt GP (t/ha)	0,407	0,602	-0,581	0,580	-0,239	-0,594	-0,197	0,778	0,958	1	-0,433	-0,496	-0,345	-0,362
Sever 31/01/13	-0,236	-0,288	0,500	-0,311	0,284	0,533	0,364	-0,268	-0,417	-0,433	1	0,783	0,514	0,164
Sever 11/02/13	-0,286	-0,433	0,639	-0,452	0,331	0,615	0,198	-0,324	-0,470	-0,496	0,783	1	0,537	0,275
Sever 22/02/2013	-0,184	-0,192	0,330	-0,238	0,018	0,315	0,233	-0,285	-0,318	-0,345	0,514	0,537	1	0,619
Sever 11/03/13	-0,136	-0,234	0,279	-0,323	0,124	0,297	0,266	-0,231	-0,336	-0,362	0,164	0,275	0,619	1

Annexe III : Matrice de corrélation du 2^{ème} cercle de corrélation (sans sol de Betafo)

Variables	pH(H2O)	pH(KCl)	Si Ts(mg/Kg)	Si oxa(mg/Kg)	Si Tv(mg/kg)	N Tv(mg/kg)	P Tv (mg/kg)	Rdt Paille (t/ha)	Rdt Gnt (t/ha)	Rdt GP (t/ha)	Sever(31/01/13)	Sever (11/02/2013)	Sevpoq (22/02/13)	Sevpoq(06/02/13)
pH(H2O)	1	0,440	0,079	-0,174	-0,297	0,380	0,252	-0,268	-0,106	-0,264	0,027	0,177	0,031	0,163
pH(KCl)	0,440	1	0,011	-0,075	-0,166	0,332	0,343	-0,346	-0,465	-0,605	0,149	0,272	0,542	0,531
Si Ts(mg/Kg)	0,079	0,011	1	-0,048	0,036	0,365	0,221	-0,198	-0,057	0,012	0,426	0,444	0,237	0,139
Si oxa(mg/Kg)	-0,174	-0,075	-0,048	1	-0,034	0,217	0,251	0,258	0,203	-0,088	-0,374	-0,248	-0,298	-0,407
Si Tv(mg/kg)	-0,297	-0,166	0,036	-0,034	1	0,163	0,243	0,430	0,099	-0,038	0,172	0,155	-0,107	-0,033
N Tv(mg/kg)	0,380	0,332	0,365	0,217	0,163	1	0,744	-0,119	-0,336	-0,693	0,513	0,559	0,266	0,088
P Tv (mg/kg)	0,252	0,343	0,221	0,251	0,243	0,744	1	0,113	-0,252	-0,646	0,453	0,290	0,288	0,283
Rdt Paille (t/ha)	-0,268	-0,346	-0,198	0,258	0,430	-0,119	0,113	1	0,401	0,221	-0,390	-0,484	-0,520	-0,051
Rdt Gnt (t/ha)	-0,106	-0,465	-0,057	0,203	0,099	-0,336	-0,252	0,401	1	0,827	-0,685	-0,648	-0,472	-0,218
Rdt GP (t/ha)	-0,264	-0,605	0,012	-0,088	-0,038	-0,693	-0,646	0,221	0,827	1	-0,593	-0,570	-0,453	-0,231
Sever(31/01/13)	0,027	0,149	0,426	-0,374	0,172	0,513	0,453	-0,390	-0,685	-0,593	1	0,761	0,477	0,084
Sever (11/02/2013)	0,177	0,272	0,444	-0,248	0,155	0,559	0,290	-0,484	-0,648	-0,570	0,761	1	0,492	0,176
Sevpoq (22/02/13)	0,031	0,542	0,237	-0,298	-0,107	0,266	0,288	-0,520	-0,472	-0,453	0,477	0,492	1	0,618
Sevpoq(06/02/13)	0,163	0,531	0,139	-0,407	-0,033	0,088	0,283	-0,051	-0,218	-0,231	0,084	0,176	0,618	1

Annexe IV : Tableau des données pour ACP

Traitement	pH(H2O)	pH(KCl)	Si Ts(mg/g)	%Oxa(mg/g)	Si Tv(mg/g)	N Tv(mg/g)	P Tv(mg/g)	dt Paille (t/ha)(mg/l)	Rdt Gnt (t/ha)	Rdt GP (t/ha)	Sever (11/02/2013)	Sever(31/01/13)	Sevpoq (22/02/13)	Sevpoq(06/01/13)
Fm	4,63	4,02	65,6127112	0,00051577	0,01232076	0,20599958	0,66681773	9,547125103	4,324311317	2,681413513	4,05	0,959770115	1,025127592	7,643199115
Sol Be	5,48	4,85	46,6870289	0,03939015	0,00545085	0,16234746	0,68222621	13,68218741	11,84140642	8,14601526	0,833333333	0,6875	0,028571429	1,082079115
Ancien C	4,55	3,95	86,9806542	0,00100674	0,00831253	0,19965293	0,60466973	9,607747289	3,659636053	2,973004927	1,741666667	0,716666667	0,008333333	3,286285115
Nouvel C	4,9	4,01	85,0497194	0,00114925	0,00602974	0,22842855	1,1234272	9,029527828	4,342197191	2,248542457	0,980555556	0,398550725	0,386111111	10,225961111
Balle de riz	4,75	4,02	75,7991817	0,0010132	0,00659946	0,19393023	0,66979437	7,491954948	2,643380137	1,491137513	1,810344828	0,360119048	0,238035714	3,077854115
Fm	5,52	4	81,6539894	0,00053421	0,00602853	0,2340638	0,72184505	6,839168911	4,490608317	2,812079965	4,458333333	1,083333333	0,347763348	4,721921111
Sol Be	5,65	4,87	19,3004697	0,05905661	0,00517017	0,16575535	0,97444089	17,80554933	9,163319946	7,413148132	0,74382716	0,25	0,162626263	0,439291111
Ancien C	4,85	4,03	77,873044	0,00054239	0,00716587	0,15392603	0,65629364	8,72931832	4,043868907	3,484459141	1,75	0,398809524	0,15	13,237091111
Nouvel C	4,7	4,02	84,0742311	0,00140594	0,01003625	0,25627216	1,28520072	8,57668069	4,576975893	1,834459276	3,419444444	1,836111111	2,368888889	4,755111111
Balle de riz	4,63	3,99	96,9329683	0,00053279	0,00917222	0,23952594	0,90219561	7,963324409	2,674443836	1,75022034	6,033333333	3,363888889	2,368888889	13,527111111
Fm	4,49	3,97	75,7300112	0,00099477	0,00487043	0,17961385	0,45599363	8,049815811	3,96150837	3,025848244	2,858333333	0,745833333	0,005	0,857291111
Sol Be	5,54	4,74	29,4121466	0,05459903	0,00402006	0,14848661	0,63708873	2,998330949	1,85052531	1,610233218	0,861111111	0,541666667	0,321818182	1,984170111
Ancien C	4,87	4,02	84,2154522	0,00134285	0,00773909	0,22737157	0,83798883	9,658834863	3,383647714	1,848075105	3,177777778	0,9	0,016666667	2,005170111
Nouvel C	4,8	4,03	87,1121467	0,0003541	0,00660078	0,21979033	0,92851438	6,627106961	1,988547631	1,41048146	4,778735632	4,883333333	4,318394661	4,711421111
Balle de riz	4,63	3,99	84,8391242	0,0008812	0,00602493	0,22221739	0,60466973	7,895034271	4,926675095	3,505208182	3,422222222	0,964285714	0,285552632	3,819071111
Fm	4,62	3,99	95,4844619	0,00100197	0,00711759	0,17561144	0,41509808	5,485055936	4,660222134	3,853969935	1,741666667	0,410714286	0,940897436	0,145291111
Sol Be	5,58	4,76	40,8286715	0,03221302	0,00603094	0,22653894	1,01977627	6,270513968	3,356675352	2,696507303	1,005555556	0,635802469	0,062698413	7,937791111
Ancien C	4,9	4,02	110,675956	0,00098471	0,00857623	0,25858054	0,96437102	6,328112489	1,497459849	0,8940992	11,34166667	4,261111111	0,751092437	1,356741111
Nouvel C	5,09	4,1	86,1759685	0,00101362	0,00572412	0,24601233	0,81011146	7,336727669	2,700736691	1,186167476	2,675	0,848765432	0,806699346	8,313741111
Balle de riz	4,88	4,09	94,3294358	0,00072412	0,00542811	0,23020242	0,83432658	5,503318584	2,059872468	1,199543872	8,091666667	2,148148148	9,134047064	18,953111111

Annexe V: Résultats statistiques de l'analyse de la variance (ANOVA)

	Effectif	pH(Eau)	pH(KCl)	Si Ts	SiTv(mg/g)	Si Car Na(mg/g)	Si oxa(mg/g)	P Tv(mg/g)	N Tv(mg/g)	Poid P(t/ha)	Poids Gnt(t/ha)	Rdt Gp(t/ha)	Sever Tal (%)	Sever Flor(%)	Sever Fruc(%)	Sever Matu(%)
Moyenne	20	4,95	4,87	75,43	0,007	n.d	0,009	0,78	0,20	8,27	4,10	2,80	3,28	1,32	1,18	5,60
Pr		0,008	<0,0001	<0,0001	0,39	n.d	<0,0001	0,04	0,17	0,32	0,19	0,14	0,3	0,68	0,39	0,36
Fm	4	4,81 (0,09) b	3,99 (0,03) b	79,62 (6,88) a	0,008 (0,001) a	n.d	0,0007 (0,004) b	0,56 (0,10) c	0,19 (0,021) ab	7,48 (2,08) a	4,35 (1,54) ab	3,09 (1,15) ab	3,27 (1,76) ab	0,80 (1,006) a	0,58 (1,48) a	3,34 (3,48) a
Sol de Betafo	4	5,56 (0,84) a	4,80 (0,03) a	34,05 (6,88) b	0,005 (0,001) a	n.d	0,046 (0,004) a	0,82 (0,11) bc	0,17 (0,021) b	10,18 (2,08) a	6,55 (1,54) a	4,96 (1,15) a	0,86 (1,76) b	0,52 (1,006) a	0,14 (1,48) a	2,86 (3,48) a
Ancien C	4	4,79 (0,07) b	4,04 (0,03) b	89,93 (6,88) a	0,008 (0,001) a	n.d	0,0009 (0,004) b	0,76 (0,11) bc	0,21 (0,021) ab	8,58 (2,08) a	3,14 (1,54) b	2,30 (1,15) b	4,50 (1,76) ab	1,56 (1,006) a	0,23 (1,48) a	4,97 (3,48) a
Nouvel C	4	4,87 (0,15) b	4,00 (0,03) b	85,60 (6,88) a	0,007 (0,001) a	n.d	0,0009 (0,004) b	0,03 (0,11) a	0,23 (0,021) a	7,88 (2,08) a	3,40 (1,54) ab	1,67 (1,15) b	2,96 (1,76) ab	1,99 (1,006) a	1,97 (1,48) a	7,00 (3,48) a
Bal de riz	4	4,72 (0,00) b	4,02 (0,00) b	87,97 (0,00) a	0,007 (0,000) a	n.d	0,0007 (0,000) b	0,75 (0,00) bc	0,22 (0,000) ab	7,21 (0,08) a	3,07 (0,00) b	1,98 (0,00) b	4,83 (0,00) a	1,70 (0,000) a	3,00 (0,00) a	9,84 (0,00) a