



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES



ONG TAFA



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR AGRONOME
SPECIALISATION AGRICULTURE



ESSAIS AGRONOMIQUES EN VUE DE SUIVRE
LES EFFETS DE LA FERTILISATION ET DE LA DENSITE
SUR LA PHYSIOLOGIE ET LE STATUT AZOTE
DU RIZ PLUVIAL

PCP SCRID

Présenté par :

RAKOTOSON Laingotiana Raelihanta
Promotion INTSA
(1998 – 2003)



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES



ONG TAFA



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR AGRONOME
SPECIALISATION AGRICULTURE



**ESSAIS AGRONOMIQUES EN VUE DE SUIVRE LES EFFETS
DE LA FERTILISATION ET DE LA DENSITE SUR
LA PHYSIOLOGIE ET LE STATUT AZOTE
DU RIZ PLUVIAL**

JURY

Mr R. RANDRIAMIHARISOA
Mme J. DUSSERRE
Mr J.C. RAKOTONDRAVELO
Mr A. RAMANANTSOANIRINA

Président
Jury
Jury
Jury

Ce mémoire de fin d'études n'aurait pu être réalisé sans la Bonté Divine qui nous a inculqué Sa force et a permis les interactions inestimables de plusieurs entités. Nous rendons grâce à notre SEIGNEUR DIEU.

Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements à tous ceux, qui, de près ou de loin, ont contribué à la finalisation de ce travail.

Permettez- nous de citer en particulier :

Monsieur Robert P. RANDRIAMIHARISOA, Docteur ès Sciences, Chef du Département « Agriculture » à l'ESSA, Professeur titulaire à l'Université d'Antananarivo, notre tuteur, *vous ne vous êtes pas ménagés pour nous donner des conseils et pour l'honneur que vous nous faites en présidant cette séance de soutenance .*

Madame Julie DUSSERE, Docteur en Ecophysiologie, Chercheur Ecophysiologiste au CIRAD Antsirabe, notre maître de stage, *pour les efforts que vous avez déployés pour le bon déroulement de ce stage. Les directives pour la mise au point de ce mémoire et les conseils que vous ne cessez de nous donner nous sont bénéfiques.*

Monsieur Jean Chrysostôme RAKOTONDRAVELO, Docteur en Agro-économie, Maître de conférence, Enseignant chercheur à l'ESSA, *qui a bien voulu accepter de siéger à notre jury de soutenance, malgré ses nombreuses responsabilités.*

Monsieur Alain RAMANANTSOANIRINA, PhD, Sélectionneur Riz au FOFIFA Antsirabe, *qui n'a pas hésité à nous consacrer une partie de son temps précieux, pour siéger parmi les membres du Jury.*

Nous remercions chaleureusement :

- **Monsieur Bertrand MULLER**, Docteur, Agronome, chercheur du CIRAD Antsirabe, représentant du projet FFEM à Madagascar, *sans qui, nous n'aurions pas pu effectuer ce stage de mémoire.*
- **Monsieur Frédéric GAY**, Ingénieur Agronome au CIRAD, en mission à Antsirabe, *qui a toujours témoigné un vif intérêt pour notre travail. Nous le remercions vivement pour ses conseils et son aide inestimables.*
- **Le CIRAD**, *en tant que premier responsable dans la mise en œuvre de notre travail, qui nous a soutenu financièrement permettant ainsi sa réalisation.*
- **Tout le staff de FOFIFA Antsirabe**, *pour la franche collaboration et la bonne entente tout au long du stage.*
- **Tous les stagiaires**, *pour l'ambiance sympathique et inoubliable vécue chaque jour à Antsirabe.*
- **L'ESSA**, *avec les professeurs prodiguant directives et conseils, ainsi que les personnels administratif et financier, sans qui, notre formation, au cours de ces cinq années n'est pas ce qu'elle est.*

Sans oublier tous les membres de ma famille, amis et connaissances, *pour leur présence à notre soutenance.*

*Au Seigneur Dieu, à tous, recevez
notre profonde gratitude,*

Laingo

SOMMAIRE

Liste des abréviations	
Liste des clichés	
Liste des cartes	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des annexes	
Lexique	

0 INTRODUCTION.....	1
1 PREMIERE PARTIE : CONTEXTE RIZICOLE DANS LA REGION DU VAKINANKARATRA ET PRESENTATION DE L'ETUDE.....	3
1.1. APERÇU SUR LA PRODUCTION, LA CONSOMMATION ET LES SURFACES CULTIVEES EN RIZ.....	4
1.1.1. <i>Evolution démographique galopante.....</i>	4
1.1.2. <i>Place du riz dans l'économie malgache</i>	4
1.1.3. <i>Importation de riz.....</i>	4
1.1.4. <i>Mise en valeur des tanety : solution pour satisfaire les besoins en riz.....</i>	5
1.2. PROBLEMES ACTUELS DES TYPES DE RIZICULTURE A MADAGASCAR.....	5
1.3. PRESENTATION DE LA REGION DE VAKINANKARATRA ET DES ZONES D'ETUDE.....	6
1.3.1. <i>Situation géographique.....</i>	6
1.3.1.1. <i>Situation géographique de la région d'Antsirabe.....</i>	6
1.3.1.2. <i>Situation géographique des zones d'étude.....</i>	6
1.3.2. <i>Facteurs climatiques.....</i>	6
1.3.2.1. <i>Climat général de la région de Vakinankaratra.....</i>	6
1.3.2.2. <i>Climat des zones d'étude.....</i>	7
1.3.3. <i>Géologie de la région d'Antsirabe.....</i>	9
1.3.4. <i>Facteurs édaphiques.....</i>	9
1.3.4.1. <i>Types de sol dans la région de Vakinankaratra.....</i>	9
1.3.4.2. <i>Caractéristiques des zones d'étude.....</i>	10
1.3.5. <i>Facteurs socio-économiques.....</i>	12
1.3.5.1. <i>Facteurs humains.....</i>	12
1.3.5.2. <i>Superficies agricoles.....</i>	12
1.3.5.3. <i>Cultures vivrières sèches.....</i>	12
1.4. ACTIONS DE RECHERCHE ET DE DEVELOPPEMENT EN RIZICULTURE PLUVIAL D'ALTIITUDE.....	14
1.4.1. <i>Présentation des organismes impliqués.....</i>	14
1.4.2. <i>Historiques des recherches.....</i>	15
1.4.2.1. <i>PRA.....</i>	15
1.4.2.1.1. <i>Présentation du PRA.....</i>	15

1.4.2.1.2. Activités du PRA.....	15
1.4.2.2. PCP SCRID.....	16
1.4.2.3. Activités agrotechnie SRR- FOFIFA.....	16
1.4.2.3.1. Test variétal de riz pluvial en milieu paysan.....	16
1.4.2.3.2. Recherche d'une formule de fertilisation adaptée.....	17
1.4.2.3.3. Etude de l'effet du zezi-daro sur les variétés de riz	17
2. DEUXIEME PARTIE : CONNAISSANCES THEORIQUES ET OUTILS DE DIAGNOSTIC A LA COMPREHENSION DE LA NUTRITION AZOTEE DU RIZ.....	18
2.1. L'AZOTE DANS LE SYSTEME SOL – PLANTE.....	19
2.1.1. <i>Azote dans le sol</i>	19
2.1.1.1. Origines de l'azote du sol.....	19
2.1.1.1.1. Source atmosphérique.....	19
2.1.1.1.2. Source organique.....	19
2.1.1.1.3. Source minérale.....	19
2.1.1.2. Dynamiques de l'azote dans le sol.....	20
2.1.1.2.1. Ammonification.....	20
2.1.1.2.2. Nitrification.....	20
2.1.1.2.3. Devenir de l'azote ammoniacal et nitrique.....	21
2.1.2. <i>Cycle de l'azote dans la plante</i>	23
2.1.2.1. Différentes formes d'azote dans la plante.....	23
2.1.2.2. Flux de l'azote dans la plante.....	23
2.1.2.2.1. Absorption de l'azote.....	23
2.1.2.2.2. Assimilation de l'azote.....	24
2.1.2.2.3. Accumulation de l'azote dans la plante	24
2.1.2.2.4. Remobilisation.....	25
2.1.3. <i>Relation entre croissance et teneur en azote</i>	25
2.1.4. <i>Conclusion partielle</i>	26
2.2. FERTILISATION ET GESTION DE LA FERTILITE.....	27
2.2.1. <i>Fertilisation</i>	27
2.2.1.1. Principes pour le succès d'une bonne fertilisation.....	27
2.2.1.2. Modes d'apport des engrais.....	27
2.2.1.3. Méthodes d'épandage.....	27
2.2.1.4. Engrais azotés	28
2.2.1.4.1. Engrais azotés organiques.....	29
2.2.1.4.2. Engrais minéraux azotés.....	30
2.2.1.5. Engrais composés.....	31
2.2.1.6. Amendements calciques.....	31
2.2.2. <i>Gestion de la fertilité</i>	32
2.2.3. <i>Conclusion partielle</i>	32
2.3. CYCLE CULTURAL ET BESOIN DU RIZ.....	33
2.3.1. <i>Cycle du riz et les différents schémas de croissance</i>	33
2.3.1.1. Cycle du riz.....	33

2.3.1.1.1. Phase végétative.....	33
2.3.1.1.2. Phase reproductive.....	34
2.3.1.1.3. Maturation.....	36
2.3.1.2. Différents schémas de croissance.....	37
2.3.2. <i>Influences des mauvaises herbes, des insectes et des maladies sur le riz pluvial</i>	39
2.3.2.1. Influences des mauvaises herbes.....	39
2.3.2.2. Influence des insectes.....	39
2.3.2.3. Maladies du riz pluvial.....	39
2.3.3. <i>Besoins du riz au cours de son cycle</i>	39
2.3.3.1. Besoins physiologiques du riz au cours de son cycle.....	39
2.3.3.1.1. Influence de la température.....	39
2.3.3.1.2. Influence de la lumière.....	40
2.3.3.1.3. Action de l'eau.....	40
2.3.3.1.4. Action du vent.....	41
2.3.3.2. Besoins nutritionnels du riz au cours de son cycle.....	41
2.3.3.2.1. Notion de « source-puits ».....	41
2.3.3.2.2. Nutrition du riz.....	41
2.3.4. <i>Conclusion partielle</i>	43
2.4. IMPACTS DE LA NUTRITION AZOTEE SUR LA PHYSIOLOGIE DU RIZ.....	43
2.4.1. <i>Rôle de l'azote</i>	43
2.4.2. <i>Périodes propices aux apports d'azote</i>	44
2.4.3. <i>Facteurs influençant l'absorption de l'azote par le riz</i>	44
2.4.4. <i>Conclusion partielle</i>	45
2.5. OUTILS DE DIAGNOSTIC DE LA NUTRITION AZOTEE DES CULTURES.....	45
2.5.1. <i>Caractérisation de la nutrition azotée</i>	45
2.5.1.1. Diagnostic visuel de la végétation sur place.....	45
2.5.1.2. Indicateurs de stress fondés sur la biomasse ou le rendement.....	46
2.5.1.3. Analyse de la plante.....	47
2.5.1.3.1. Teneur en nitrate.....	47
2.5.1.3.2. Mesure de l'azote total.....	47
2.5.1.4. Analyse du sol.....	47
2.5.2. <i>Indicateur de la teneur en chlorophylle</i>	47
2.5.2.1. Charte de couleur des feuilles.....	47
2.5.2.2. Chlorophyl meter.....	48
2.5.2.2.1. Mode d'utilisation.....	48
2.5.2.2.2. Méthodes d'échantillonnage.....	48
2.5.3. <i>Conclusion partielle</i>	49
3. TROISIEME PARTIE : OBJECTIFS DE L'ETUDE, MATERIELS ET METHODES UTILISES	50
3.1. OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	51
3.1.1. <i>Champ général de l'étude</i>	51
3.1.2. <i>Problématique de l'étude</i>	51

3.1.3. Objectifs de l'étude.....	51
3.1.4. Méthodologies de travail.....	51
3.1.4.1. Limite de l'étude.....	51
3.1.4.2. Bibliographie.....	51
3.1.4.3. Expérimentation.....	52
3.2. MATERIELS UTILISES.....	52
3.2.1. Dispositif principal : site d'Andranomanelatra.....	52
3.2.1.1. But de l'essai.....	52
3.2.1.2. Mise en place du dispositif.....	52
3.2.2. Dispositifs complémentaires.....	53
3.2.2.1. Objectif.....	53
3.2.2.2. Mise en place des sites.....	53
3.2.2.2.1. Sites d'Andranomanelatra et d'Ibity.....	53
3.2.2.2.2. Site d'Ivory.....	53
3.2.3. Caractéristiques de la variété utilisée.....	54
3.2.4. Appareil utilisé.....	54
3.3. MESURES.....	55
3.3.1. Mesures des composantes du rendement sur le dispositif principal.....	55
3.3.1. 1. Mesures effectuées durant la phase végétative du riz.....	55
3.3.1. 2. Mesures effectuées durant la phase reproductive du riz.....	55
3.3.1. 3. Mesures effectuées à la récolte.....	55
3.3.2. Mesures sur les dispositifs complémentaires.....	56
3.4. CONCLUSION PARTIELLE.....	56
4. QUATRIEME PARTIE : INTERPRETATIONS ET SYNTHESES DES RESULTATS.....	57
4.1. RESULTATS SUR LE DISPOSITIF PRINCIPAL.....	58
4.1.1. Effets des traitements sur le statut azoté du peuplement.....	58
4.1.2. Effets des traitements sur la croissance du peuplement.....	60
4.1.3. Effets des traitements sur le développement du riz.....	64
4.1.3.1. Evolution des tallages en fonction des traitements.....	64
4.1.3.2. Tallage fertile.....	67
4.1.4. Effets sur les composants du rendement.....	69
4.2. RESULTATS SUR LES DISPOSITIFS COMPLEMENTAIRES.....	70
4.2.5. Evolution des valeurs Spad pour les trois sites.....	70
4.2.6. Evolution du nombre de talles par plante pour les trois sites.....	71
4.2.7. Composantes du rendement.....	71
CONCLUSION.....	73

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

LISTE DES ABREVIATIONS

%GP :	Pourcentage de grains pleins	pF :	Point de flétrissement
Ca :	Calcium	PMG :	Poids de mille grains
CENRADERU :	Centre National de la Recherche Appliquée au Développement Rural	PRA :	Programme Riz d'Altitude
CIRAD :	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement	SCV :	Semis sous couverture végétale
CO₂ :	Gaz carbonique	Spad :	Soil plant analyses development
E :	Energie	T° min :	Température minimum
ESSA :	Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques	T° max :	Température maximum
FIFAMANOR :	FIompiana sy FAmbolena Malagasy NORveziana	TAFA :	TAny sy FAmpandrosoana
FOFIFA :	FOibem-pirenena momba ny FIkarohana ampiarina ho Fampandrosoana ny Ambanivohitra	T :	Tonne
G :	Gramme	u :	Unité
H₂O :	Eau		
Ha :	Hectare		
HI :	Harvest Index		
JAS :	Jour Après Semis		
K :	Potassium		
Kg :	Kilogramme		
KOBAMA :	KOba MAlagasy		
Lcc :	Leaf chart color		
meq :	Milli équivalent		
Mg :	Magnésium		
MSA :	Matière Sèche Aérienne		
N :	Azote		
Nepts/Pa :	Nombre d'épillets par panicule		
NH₄ :	Azote ammoniacal		
NO₂ :	Nitrite		
NO₃ :	Azote nitrique		
NO₅ :	Nitrate		
NP/m² :	Nombre de plants par m ²		
Npa/ m² :	Nombre de panicules par m ²		
NPa/P :	Nombre de panicules par pied		
O₂ :	Oxygène		
Opt :	Optimum		
PCP SCRID :	Pôle de Compétence en Partenariat Système de Culture et Riziculture Durable		

LISTE DES CLICHES

N°	Intitulés	
1	Paysage de riziculture pluviale (couverture)	
2	Station cimel.....	7
3	Variété FOFIFA 154 en pleine floraison.....	35
4	Parcelle de riz carencé en azote.....	46
5	Pied de riz carencé en azote.....	46
6	Chlorophyl meter	49
7	Panicule de la variété FOFIFA 154.....	54

LISTE DES CARTES

N°	Intitulés	
1	Pédologie de la région de Vakinankaratra	11
2	Superficie des <i>tanety</i> cultivés par rapport aux <i>tanety</i> cultivables.....	13

LISTE DES TABLEAUX

N° Intitulés

1	Proportion de chaque forme d'azote dans la plante.....	23
2	Concentration des éléments dans les tissus	29
3	Concentrations « suffisantes / normales » en azote de quelques organes.....	29
4	Températures des différentes cycles du riz.....	40
5	Exportation du riz en éléments fertilisant sur les Hautes Terres malgaches.....	43
6	Effets des traitements sur les valeurs Spad jusqu'à la floraison	59
7	Effets des traitements sur la quantité de MSA.....	62
8	Effets des traitements sur le tallage par plante.....	66
9	Effets des traitements sur le tallage fertile par plante.....	68
10	Effets des traitements sur les composantes du rendement.....	69
11	Comparaison des valeurs Spad sur les trois sites complémentaires.....	70
12	Composantes du tallage par plante, par site et par mode de gestion du sol.....	71
13	Composantes du rendement par plante, par site et par mode de gestion du sol.....	71

LISTE DES FIGURES

N°	Intitulés	
1	Courbe ombrothermique de la région d'Antsirabe.....	7
2	Conditions climatiques durant le cycle cultural.....	8
3	Evolution des températures moyennes sur les trois autres sites d'expérimentation.....	9
4	Différentes formes d'azote dans le sol et leur évolution possible.....	22
5	Devenir de l'azote dans la plante.....	25
6	Elaboration du rendement	33
7	Structure d'une panicule à la floraison.....	35
8	Principaux stades de la phase reproductive et élaboration des composantes.....	36
9	Les trois types de cycle.....	37
10	Différents schémas de croissance.....	38
11	Evolution de la quantité d'azote dans chaque organe.....	44
12	Plan du dispositif principal.....	53
13 et 14	Evolution des valeurs Spad par traitement de fumure et de densité	58
15 et 16	Evolution de la MSA par plante par traitement de fumure et de densité.....	60
17 et 18	Taux de croissance par plante par traitement de fumure et de densité.....	61
19 et 20	Evolution du tallage par plante par traitement de fumure et de densité.....	64
21 et 22	Taux de tallage par plante par traitement de fumure et de densité	65
23 et 24	Evolution du nombre de panicules par plante par traitement de fumure et de densité.....	67

LISTE DES ANNEXES

N°	Intitulés
1	Quelques données sur la production rizicole à Madagascar
2	Données climatiques
3	Intérêt du PCP pour le Cirad, le Fofifa et l' ESSA
4	Systematiques du riz
5	Conséquences d'une lumière diffuse et d'une forte insolation au cours du cycle du riz
6	Mesure de l'azote total (principes des méthodes de <i>Kjeldhal</i> et <i>Dumas</i>)
7	Définition et qualités d'un indicateur de nutrition azotée
8	Itinéraires techniques sur le dispositif principal
9a	Dynamique de croissance
9b	Dynamique de tallage

LEXIQUE

Amendement humique : source de matières organiques susceptibles de donner de l'humus stable qui contribue, d'une manière durable, à l'amélioration de la structure physique du sol, et parfois à l'accroissement de sa fertilité par un apport d'éléments fertilisants, notamment l'azote.

Besoins d'une culture : ensemble de conditions qui permettent d'atteindre le potentiel de la variété utilisée.

Chlorophylle : pigment présent dans la plante qui capte la lumière utilisée lors de la photosynthèse.

Coefficient de transpiration : quantité d'eau transpirée par la plante au cours de son développement pour fabriquer 1 g de matière sèche.

Engrais vert : plante améliorante qui accélère la reconstitution de la fertilité du sol.

Gluteline : fraction protéinique formant 70 à 93% des protéines de réserves du grain.

Peuplement végétal : population de plantes soumises à des conditions de milieu identique et concourant à un objectif de production.

Qualité d'une graine : aptitude de la plante à recouvrir les besoins nutritionnels (valeur biologique). Parmi les céréales les protéines du riz sont les plus nutritives car relativement riche en lysine (3-4%).

« TSY MISY MAFY TSY LAITRAN' NY ZOTO »

« A cœur vaillant, rien d'impossible »

A DADA, NENY, BODO, MAMY,

Pour tant de joies , tant d'épreuves

et tant d'amour partagés.

**ESSAIS AGRONOMIQUES EN VUE DE SUIVRE LES
EFFETS DE LA FERTILISATION ET DE LA DENSITE
SUR LA PHYSIOLOGIE ET LE STATUT AZOTE
DU RIZ PLUVIAL**

INTRODUCTION

Le paddy avec une production de plus de 450 millions de tonnes est la deuxième céréale du monde. A Madagascar la riziculture est d'une grande importance. En effet, le riz occupe sans conteste le premier rang parmi les productions agricoles car plus de la moitié de la superficie dévolue à l'agriculture est rizicole.

Compte tenu de la croissance démographique, la production issue des rizières est devenue insuffisante. Aussi l'extension de la riziculture sur *tanety* cultivable est-elle incontournable. En effet, il n'est pratiquement plus possible d'accroître les surfaces rizicoles des bas fonds déjà étroites. Le riz pluvial offre ainsi une opportunité pour les paysans ; le riz pouvant être utilisé soit pour l'alimentation soit gardé et/ou vendu comme semences.

Le riz pluvial représente 13% des surfaces rizicoles mondiales. Il ne nécessite pas d'aménagements importants et s'intègre bien dans un système de limitation des ressources en eau. A Madagascar, la pratique de la riziculture pluviale est en plein essor. Mais dans la région de Vakinankaratra, le riz pluvial est assez récent car par manque d'information sa diffusion plus large est limitée.

Cette étude est une composante d'un programme de recherches du PCP SCRID dont les objectifs sont d'analyser les effets des conditions de culture et des techniques culturales sur le fonctionnement des peuplements végétaux pour identifier les facteurs limitant la production ainsi que leurs modes d'action et de définir les caractères adaptatifs des variétés aux conditions et systèmes de culture.

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons à la **nutrition azotée**. En effet, l'azote est l'un des principaux facteurs qui contrôle le rendement. Ce facteur a déjà été largement étudié, même dans nos conditions d'expérimentation (les Hautes Terres). Toutefois aucune étude n'a cherché à l'analyser de façon dynamique, c'est à dire tout au long du cycle cultural, ni à utiliser un indicateur d'état de culture qui peut donner un pronostic sur l'état de nutrition azotée. A partir de ce constat, sont partis deux objectifs, primo, tester un indicateur du statut azoté de la culture : le *chlorophyl meter*, et secundo mettre en relation un état de nutrition azotée du peuplement avec l'élaboration du rendement en jouant sur la fertilisation azotée et la densité du peuplement. Deux types de

densités ont été testées (simple et double) avec trois niveaux de fumure. Le premier site choisi, à Andranomanelatra, est représentatif de la région de Vakinankaratra.

Parallèlement à cette étude nous avons effectué une comparaison avec trois autres sites (Andranomanelatra, Ivory et Ibity) où la variété que nous avons suivie était présente.

L'étude a été organisée de la manière suivante :

- La première partie permettra de présenter la région de Vakinankaratra et de situer le contexte rizicole.
- La deuxième partie fera état des connaissances théoriques et outils de diagnostic des cultures à la compréhension de la nutrition du riz.
- Dans la troisième partie seront exposés les objectifs de l'étude ainsi que les matériels et méthodes utilisés.
- Dans la dernière partie seront interprétés les résultats et les analyses y afférant.

Première partie :

Présentation de la région de Vakinankaratra
et contexte rizicole

1.1. APERCU SUR LA PRODUCTION, LA CONSOMMATION ET LES SURFACES CULTIVEES EN RIZ

1.1.1. EVOLUTION DEMOGRAPHIQUE GALOPANTE

Le taux d'accroissement annuel est estimé à 2.8%. La population rurale représente 78% de la population totale dont les 94% constituent la population agricole (Instat, 2002). L'augmentation des membres de la famille paysanne entraîne une division des parcelles, la production n'est plus suffisante pour satisfaire leurs besoins alimentaires et autres. Elle est freinée d'une part par une difficile extension des surfaces irrigables : les rizières sont déjà occupées, coûtent chères ou sont l'objet d'un conflit foncier. D'autre part, les moyens matériels et financiers sont insuffisants pour accroître le rendement, et il n'y a pas de stock de sécurité d'intrants agricoles (engrais, pesticides).

1.1.2. PLACE DU RIZ DANS L'ECONOMIE MALGACHE

Les cultures vivrières constituent 71% de la production agricole nationale. La production rizicole représente les 70% des cultures vivrières. Entre 1999 et 2001, la production rizicole est passée de 2 483 634 T à 2 571 666 T à cause des nouvelles techniques, un climat favorable et une augmentation de la superficie rizicole qui est passée de 1 207 500 Ha à 1 212 650 Ha. La riziculture pluviale occupe une superficie de 600 000 Ha (Instat, 2002). Le taux de croissance de la production rizicole estimé à 1.8% ne couvre pas la totalité des besoins des consommateurs. D'où recours aux importations.

1.1 3. IMPORTATION DE RIZ

Madagascar dans le temps a été exportateur de riz de luxe très apprécié sur le marché extérieur. Entre 1999 et 2001, la quantité de riz importée a presque doublé de 83 000T à 149 000T (Instat, 2002). L'importation de riz constitue une sortie de devises importantes et serait un frein au développement économique de Madagascar. En effet, le riz importé coûtant moins cher que le riz local, les paysans n'auraient pas intérêt à produire au-delà de ce qui leur était nécessaire à leur subsistance car produire sans profit est néfaste à la trésorerie des paysans. Et leur économie, par contrecoup, s'en trouve affectée. Faut-il encore rappeler que les paysans constituent la base du développement ; s'ils ne produisent pas de riz en quantité suffisante (pour leurs besoins et pour la vente) il n'y aura pas échanges et/ou circulations de monnaies (argent contre produits) et le développement ne peut se faire sans eux.

1.1.4. MISE EN VALEUR DES *TANETY* : SOLUTION POUR SATISFAIRE LES BESOINS EN RIZ

Madagascar dispose de 63% de terres cultivables, 6% sont exploitées et 2/5 de ces dernières sont aménagés en rizières (Rabezandrina, 2001). Les *tanety* représentent 50% de la superficie totale. Avec des techniques adéquates le riz pluvial est un potentiel important et peut être une solution pour satisfaire à la fois la demande intérieure et les demandes extérieures.

Annexe 1 : Quelques données sur la production rizicole à Madagascar

1.2. PROBLEMES ACTUELS DES TYPES DE RIZICULTURES A MADAGASCAR

A Madagascar, il y a deux types de rizicultures :

- La **riziculture irriguée** ou **aquatique**,
- La **riziculture pluviale**.

La riziculture irriguée comprend :

- ◆ La *riziculture irriguée en altitude* qui est très sensible aux attaques de maladies (brunissure de gaine, pyriculariose).
- ◆ La *riziculture irriguée sur bas fonds en submersion* qui est exposée aux problèmes de limitation de rendement, d'envasement, d'ensablement (phénomène d'*atsanga* dans la région du Lac Alaotra), de gestion de l'eau entre usagers et surtout d'extension des surfaces.

La riziculture pluviale peut se pratiquer soit sur *tanety* soit sur bas de pente. Les principaux facteurs limitant du riz pluvial sont la lutte contre les adventices et la concurrence avec le calendrier cultural du riz irrigué en début de cycle.

A cause de leur nature essentiellement ferrallitique, les sols des *tanety* des hautes terres malgaches sont fragiles, vulnérables à l'érosion et ont un niveau de fertilité très bas. Les autres raisons de la non exploitation du riz pluvial peuvent être l'éloignement des champs et les problèmes juridico-financiers.

Le riz pluvial sur *tavy* a aussi un effet dépressif sur le sol : la déforestation expose le sol à des problèmes environnementaux graves comme l'érosion sur les pentes raides.

1.3. PRESENTATION DE LA REGION DE VAKINANKARATRA ET DES ZONES D'ETUDES

1.3.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

1.3.1.1. Situation géographique de la région d'Antsirabe

La région d'Antsirabe également dénommée "Vakinankaratra", du nom des massifs montagneux qu'elle englobe en partie, est située sur les Hautes terres centrales de Madagascar. Elle s'étend sur 16583 km². Elle est limitée entre 19° 12' et 20° 16' de latitude Sud, et entre 45° 52' et 47° 52' de longitude Est.

Elle est délimitée au Nord par la grande rivière de l'Onive, à l'Est par le bassin entre les Hauts Plateaux du centre et de la côte Est, à l'Ouest par les bords des grandes plaines vallonnées et au Sud par les cours de la Mania et de la Manandona.

1.3.1.2. Situation géographique des zones d'étude

- ❑ *Le site d'Andranomanelatra* se trouve sur la RN7 à 16 km d'Antsirabe sur la route d'Antananarivo. Le site a une altitude comprise entre 1653 m et 1646 m et est limité entre 19°46.756' de latitude Sud et 47°6.411' de longitude Est.
- ❑ *Le site d'Ibity* se trouve sur la RN7 à 18 km d'Antsirabe vers l'axe Ambositra-Fianarantsoa. Le site a une altitude de 1540 m et s'étend entre : 19°59.711' de latitude Sud et 47°2.433' de longitude Est.
- ❑ *Le site d'Ivory* se trouve à 100 km d'Antsirabe sur la RN34 vers l'axe Antsirabe-Betafo-Miandrivazo. Le site a une altitude de 950 m et s'étend entre 19°33.459' de latitude Sud et 46°24.841' de longitude Est.

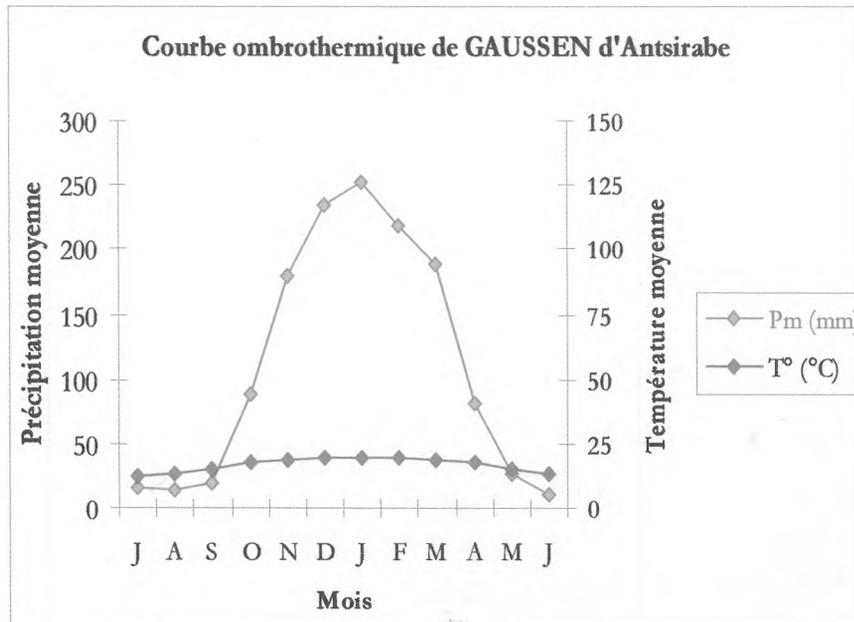
1.3.2. FACTEURS CLIMATIQUES

1.3.2.1. Climat général de la région de Vakinankaratra

La région de Vakinankaratra est pourvue d'un climat humide tempéré et est marqué par deux saisons:

- Une saison sèche et fraîche de mars à septembre,
- Une saison humide d'octobre en mars : la pluviométrie dépend de l'altitude, de l'orientation de la région et de la proximité par rapport à des hauts reliefs (Raveromihaja, 1996).

Figure 1 : Courbe ombrothermique de la région d'Antsirabe
 (source : Station météorologique de Nanisana)

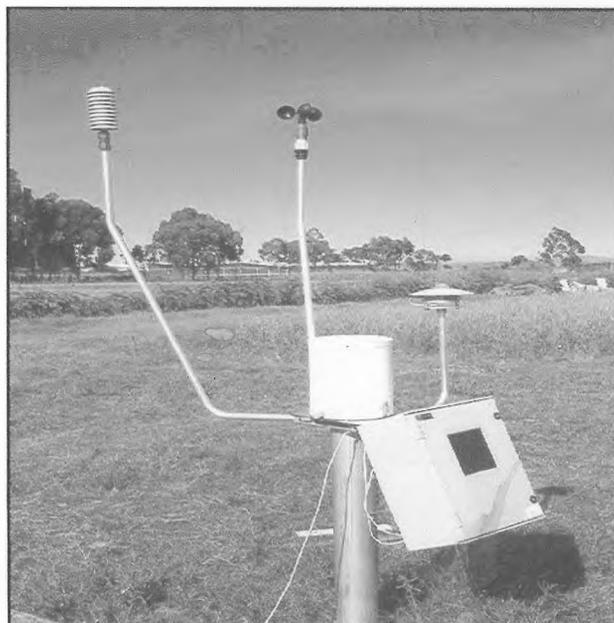


1.3.2.2. Climat des zones d'étude

Les stations météorologiques cimel (cliché 2) installées sur les sites permettent d'avoir les conditions climatiques affectant l'expérimentation c'est à dire la température, l'humidité de l'air, la pluviométrie, le vent et la durée d'ensoleillement.

Annexe 2 : Données climatiques

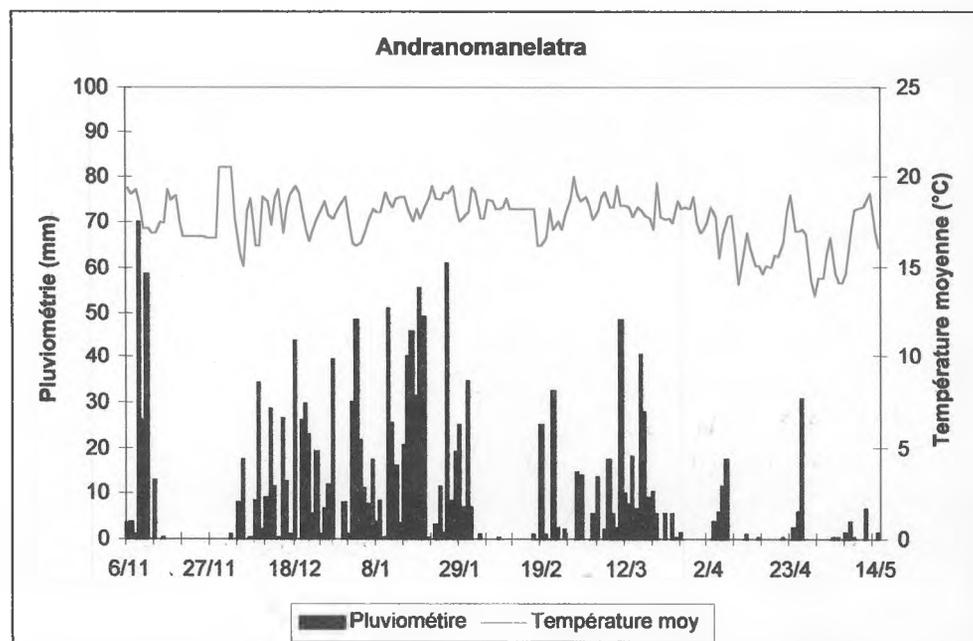
Cliché 2 : Station cimel (Source : auteur, 2002)



□ **Conditions climatiques durant le cycle cultural sur le dispositif principal à Andranomanelatra**

Cette année il n'y avait pas d'événements climatiques exceptionnels susceptibles de perturber la croissance et le développement du riz. La saison humide a débuté vers novembre, c'est également le mois le plus chaud (température moyenne : 20°C). Une petite période de sécheresse a été observée jusqu'en début décembre. Les précipitations mensuelles ont débuté début décembre jusqu'en fin janvier (pic de 68mm vers mi-janvier) ; cette période correspond à la saison chaude. Vers fin janvier, il y avait un trou pluviométrique puis une reprise entre mi-février et fin mars. La saison sèche et fraîche a commencé à partir du mois d'avril, la fréquence des pluies a diminué, une période relativement froide s'observe également (début avril : moment le plus froid avec 4°C).

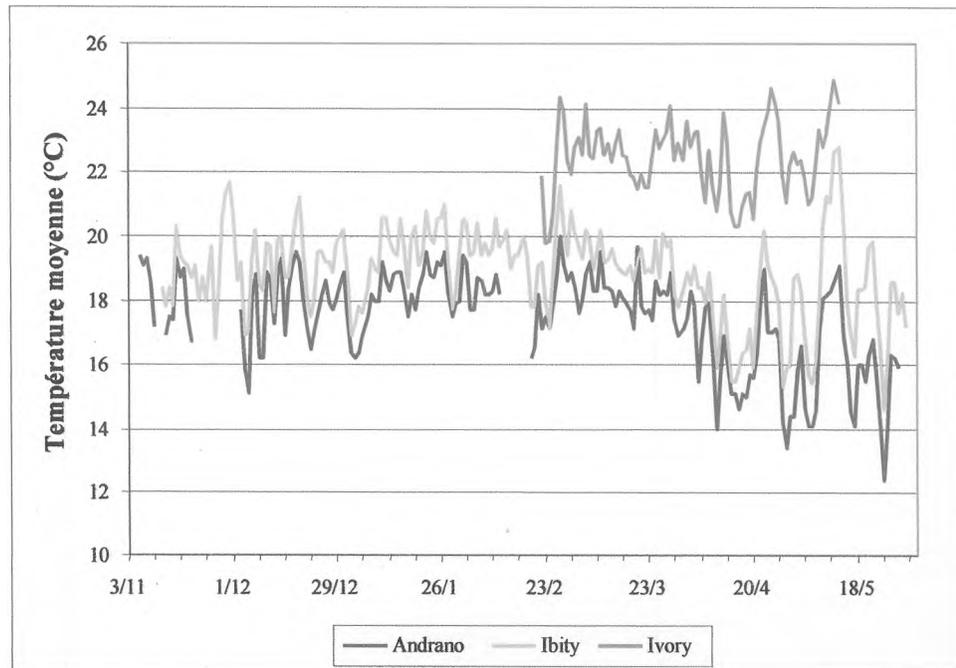
Figure 2 : Conditions climatiques durant le cycle cultural
(source : CIRAD, 2002-2003)



□ **Conditions climatiques pour les autres sites**

D'après l'évolution des températures moyennes sur les trois sites il apparaît, associé à l'altitude, que le site d'Andranomanelatra est le plus froid et celui d'Ivory le plus chaud.

Figure 3 : Evolution des températures moyennes sur les trois autres sites d'expérimentation (source : CIRAD, 2002-2003)



1.3.3. GEOLOGIE DE LA REGION D'ANTSIRABE

La région d'Antsirabe est bâtie sur des coulées volcaniques basaltiques recouvrant, en maints endroits, des sédiments lacustres. Elle comporte les formations suivantes : un *vieux socle migmatisé* avec des intercalations granitiques, des *granites des Vavavato* résultant en partie de la granitisation d'une ancienne formation basaltique et renfermant des zircons, des *pegmatites uranifères* à béryl, des *granites intrusifs*, des *pegmatites sodolithiques à gemmes* et du *système lacustro-volcanique* donnant un sol riche se prêtant favorablement à la culture des légumes et des arbres fruitiers ainsi qu'à l'élevage des bovins (Raveropihaja, 1996).

1.3.4. FACTEURS EDAPHIQUES

1.3.4.1. Types de sols dans la région de Vakinankaratra

D'après la Classification Française, fondée sur les conditions et le processus d'évolution des sols, les sols de la région de Vakinankaratra peuvent être repartis en trois classes :

- Classe I : Sols à minéraux bruts d'érosion ou squelettiques. Il s'agit d'éboulis ou de roches mères mis à nu par l'érosion. La roche mère subit plus ou moins un début d'altération physico-chimique sans qu'un horizon humifère ait eu le temps de se former.
- Classe VIII : Sols à sesquioxydes et à matières organiques rapidement minéralisées.

- ❑ Classe X : Sols hydromorphes. Ce sont des sols dont la genèse est dominée par un engorgement temporaire ou permanent par l'eau en surface ou en profondeur, ou par suite de la présence ou de la remontée d'une nappe phréatique.

1.3.4.2. Caractéristiques des sols des zones d'études

Les zones d'études appartiennent à la Classe VIII, sous-classe 3 (sols ferrallitiques). Les sols **ferrallitiques** rencontrés sous forme de *tanety* résultent de la décomposition, très poussée, des minéraux primaires qui existaient dans la roche mère originelle (mica, feldspath...). Cette décomposition s'accompagne d'une perte de silice par lessivage, et aboutit à une libération et individualisation d'une quantité élevée de sesquioxydes de fer, qui confère la couleur rouge caractéristique, et de sesquioxydes d'aluminium. Les minéraux sont essentiellement constitués par de la kaolinite (Raveromihaja, 1996).

- ❑ Le sol d'Ibity appartient au classe VIII, sous classe 3, groupe B : c'est un *sol ferrallitique typique* très riche en sesquioxydes de fer et d'aluminium et très pauvre en minéraux altérables ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1.7$).
- ❑ Le sol d'Andranomanelatra appartient au classe VIII, sous classe 3, groupe C : c'est un *sol ferrallitique lessivé*, très désaturé qui présente une réaction plus acide en surface qu'en profondeur.
- ❑ Le sol d'Ivory appartient au classe VIII, sous classe 3, groupe D : c'est un *sol ferrallitique humifère*, très riches en humus (plus de 7 à 8% de matières organiques bien évoluées sur au moins 20 cm).

1.3.5. FACTEURS SOCIO-ECONOMIQUES

1.3.5.1. Facteurs humains

En 1995, la région de Vakinankaratra compte 1048455 habitants (8.06% de celle de Madagascar). Pour une superficie de 16583 km² la densité moyenne est donc de 63.22 habitants au km². La proportion de la population active est moyennement importante : 37 à 67% seulement. La population est jeune. Le point caractérisant le Vakinankaratra est la grande proportion de la population rurale (75%) d'où son appellation : «Capitale rurale de Madagascar ».

1.3.5.2. Superficies agricoles

□ Superficies rizicoles cultivées

Il y a 60691 Ha de surfaces de rizières cultivables dans le Vakinankaratra, dont les 80% sont des rizières irriguées. Un exploitant agricole de six personnes a en moyenne 0.43 Ha de rizières. Plus la région est à forte pression démographique, plus la superficie par exploitant est faible. Avec un rendement à l'hectare de 1.5T la production de riz est en général suffisante pour la population de Vakinankaratra.

□ Superficies des tanety

Les superficies des *tanety* cultivés sont le double de celles des *tanimbary*. En moyenne chaque exploitant agricole cultive une superficie de *tanety* de 0.83 Ha. Ce taux est variable d'une région à une autre : dans la région de la Manandona, la surface moyenne en *tanety* par exploitant est de 1.5 Ha. Actuellement, la dégradation des *tanety* cultivables atteint 5.54% au total. La superficie des *tanety* cultivables par rapport aux *tanety* cultivés est représenté sur la carte 2 (p13).

1.3.5.3. Cultures vivrières sèches

Parmi les cultures vivrières sèches le riz pluvial occupe une superficie de 10716 Ha pour une totalité de 124124.13 Ha soit 8.6% de la superficie totale. Le riz pluvial ne convient pas aux altitudes supérieures à 1600 m et les variétés sont différentes d'une zone à une autre. La pratique de la riziculture pluviale est prometteuse dans la région de Vakinankaratra parce qu'on y trouve encore une grande superficie de *tanety* non exploitée. Cependant, le manque d'information et la non maîtrise des techniques culturales limitent sa large diffusion. A partir de ce constat sont enclenchées les recherches effectuées par divers organismes.

1.4. ACTIONS DE RECHERCHE ET DE DEVELOPPEMENT EN RIZICULTURE PLUVIALE D'ALTITUDE

1.4.1. PRESENTATION DES ORGANISMES IMPLIQUES

- Le **CIRAD** est un organisme scientifique français. Ses activités recouvrent les domaines de l'Agriculture, l'Elevage, la Foresterie, la Gestion des ressources naturelles et l'Agroalimentaire. En ce qui concerne la riziculture, ses objectifs sont de produire plus pour répondre à des besoins alimentaires sans cesse croissants, de préserver les ressources naturelles de la planète et de mettre en place une riziculture durable. Pour ce faire il crée des variétés plus productives et adaptées à des régions écologiquement défavorables en diversifiant les systèmes de culture et propose des techniques qui sécurisent la production, réduisant par conséquent la pénibilité de la tâche de l'agriculteur tout en préservant l'environnement.

- Le **FOFIFA** ou **CENRADERU** créé en 1974 est une institution de recherche agricole. Il a pour mission de mettre en œuvre la politique nationale de recherches agricoles en matière de développement rural. Ses domaines recouvrent l'Agriculture (riziculture, cultures d'exportation traditionnelles, machinisme agricole ...), l'Elevage (production animale, pisciculture), la Foresterie, l'Hydraulique, et les Etudes socio-économiques. Il préconise l'approche participative : les chercheurs se sont familiarisés aux conditions réelles de leur domaine, les vulgarisateurs élaborent avec la recherche les programmes de diffusion des nouvelles technologies à tester et les agriculteurs prennent part à la définition des programmes de recherche et aux expérimentations.

- Le **TAFA** a été créé en 1994 par quatre institutions (KOBAMA, FIFAMANOR, FOFIFA et CIRAD). Il diffuse au niveau des paysans les techniques de gestion agrobiologique des sols en faisant des essais de couverture permanente sur systèmes pluviaux. Il met ainsi en place des sites de références qui recourent la variabilité pédo-climatique de la région de Vakinankaratra. Ces sites constituent un support de formation permanente pour tous les partenaires de la région. Les cadres et les techniciens sont formés et les paysans, adoptant les techniques tout autour des sites de références sur un rayon de cinq km, sont encadrés.

1.4.2. HISTORIQUES DES RECHERCHES EN RIZ PLUVIAL

1.4.2.1. PRA

1.4.2.1.1. Présentation du PRA

Le PRA est un projet commun unissant le FOFIFA et le CIRAD. Il a été créé en 1983 dans le but de fournir à la vulgarisation des variétés de riz performantes en condition de haute altitude avec les techniques culturales adaptées à ces variétés. Le PRA a pris fin en septembre 2001 et est remplacé par le PCP SCRID.

1.4.2.1.2. Activités du PRA

□ Recherche de variétés de riz pluvial

Contrairement à la riziculture irriguée, la culture de riz pluvial n'est pas du tout entrée dans les mœurs sur les Hauts Plateaux malgaches ; d'ailleurs les paysans ne disposent pas de variétés capables de se développer au dessus de 1400 m d'altitude. Ils rencontrent très souvent des déboires en utilisant le *botramaitso* car les cycles sont plus tardifs pour avoir les grains suffisamment fertiles.

Le PRA a trouvé la solution à cet handicap et a pu vulgariser neuf variétés de riz pluvial d'altitude (FOFIFA 62, 64, 116, 133, 134, 151, 152, 153 et 154) entièrement créées à Madagascar. Ces variétés exclusives sont les premières mondiales qui peuvent s'adapter dans ces conditions d'altitude et de plus, elles présentent une alternative particulièrement intéressante pour les bas fonds. En effet, elles y étaient aussi productives, voire plus, que les variétés irriguées utilisées auparavant, tout en demandant moins de travail, en particulier en irrigation. La tolérance de ces variétés aux deux principales maladies du riz : la pyriculariose et la brunissure des gaines est un atout décisif pour assurer la pérennité du riz pluvial en altitude.

□ Autres innovations techniques

Il y avait également d'autres innovations techniques comme le traitement de semences et du sol, le sarclage précoce, l'emploi d'herbicide, l'emploi d'engrais minéral et le semis en poquet. Le traitement des semences est l'innovation technique la plus importante car c'est une garantie pour la culture en terme de rendement et de production.

1.4.2.2. PCP SCRID

Le PCP SCRID crée en septembre 2001 unit le Fofifa, le Cirad et l'ESSA. Il a pour objectif de développer les systèmes de cultures, à base de semis direct sur couverture végétale, et de rizicultures durables (une production de qualité respectueuse de l'environnement, dans des conditions économiques intéressantes pour les producteurs). Il s'agit de trouver les systèmes de culture sur couverture végétale qui permettent de reconstituer la fertilité du sol, d'atténuer le parasitisme et les effets des aléas climatiques. Le but étant d'obtenir des rendements plus élevés.

Annexe 3 : Intérêts du PCP pour le Cirad, le Fofifa et l' ESSA

☆ *Avantages de l'adoption de SCV avec la riziculture pluviale*

Le riz pluvial sous couverture végétale vive ou morte permet de :

- *Lutter contre les mauvaises herbes et contre l'érosion* : un des facteurs restrictifs les plus importants à la riziculture pluviale étant justement la lutte contre les adventices, surtout sur sols volcaniques.
- *Maintenir l'humidité*, ce qui permet au riz de mieux résister aux stress hydriques spécialement en fin de saison, avec, un effet tampon sur la température qui va diminuer l'impact du froid de fin de cycle (le froid étant un facteur important de stérilité des grains).
- *Diminuer les attaques de maladies*, car les plants de riz se développent sur un substratum plus équilibré.
- *Atténuer les effets nocifs des insectes terricoles*. En effet, ces insectes trouvent à manger dans les couvertures végétales installées, et la faune évolue avec l'apparition de prédateurs de ces insectes et d'autres espèces plus inféodées aux débris organiques qui occupent en partie l'espace vital des insectes ravageurs et qui contribuent ainsi à la diminution de leur population.
- *Diminuer le coût de travail*, en particulier la préparation du sol et le sarclage.

1.4.2.3. Activités agrotechnie « riz » de SRR-FOFIFA

1.4.2.3.1. Test variétal de riz pluvial en milieu paysan dans le Moyen-Ouest de Vakinankaratra

L'objectif est de montrer aux paysans l'intérêt des semences améliorées comparativement à celles communément utilisées pour qu'ils aient une gamme de variétés qui leur conviennent.

1.4.2.3.2. Recherche d'une formule de fertilisation adaptée

Il s'agit de trouver la formule de fertilisation adéquate qui peut valoriser au mieux les nouvelles variétés de riz pluvial diffusées et qui tient compte des conditions socio-économiques et pédo-climatiques qui prévalent dans la région du Moyen Ouest.

Le résultat des essais effectués affirme que la formule : 200kg/Ha de NPK 11-22-16 + fumier 5T/ Ha+ 20kg/Ha d'urée en couverture avec ou sans dolomie (250kg/Ha) pourrait être conseillée pour le Moyen-Ouest d'Antsirabe.

1.4.2.3.3. Etude de l'effet de l'utilisation du zezi-daro sur les variétés de riz

Le riz pluvial nécessite l'utilisation combinée des engrais minéraux et organiques. Or les intrants sont chers. Aussi, l'effet du *zezi-daro* (déchets issus de la fabrication du savon) sur les sols du type ferrallitique issus du volcanisme ancien a-t-il été effectué.

Les essais ont montré que le *zezi-daro* n'est pas rentable par rapport au fumier seul. De plus, il est moins pourvu en éléments alcalino-terreux (7.65méq/100g pour le Ca et 37.5 méq/100 g pour le Mg) et alcalins (43.5méq/100g pour le K), ce qui lui confère un pH basique (11.7). La formule : 150kg/Ha de NPK11-22-16+ fumier5 T/ Ha+ 32.5kg/Ha d'urée 46% en couverture semble être la mieux adaptée sur les sols rouges ferrallitiques issus des volcanismes anciens de la région de Vakinankaratra.

Deuxième partie :

Connaissances théoriques et outils de
diagnostic des cultures à la compréhension
de la nutrition azotée du riz

2.1. L'AZOTE DANS LE SYSTEME SOL - PLANTE

Ethymologiquement « azote » provient du mot grec zôe : vie, et le préfixe a- signifie sans, donc azote veut dire « sans vie ». C'est une contradiction apparente car l'azote est un élément chimique indispensable qui peut donner la vie aux organismes vivants : il favorise la croissance végétative des plantes.

2.1.1. AZOTE DANS LE SOL

La plupart des plantes cultivées trouvent l'élément azoté dont elles ont besoin dans le sol. En général, le sol a une teneur en azote total variant de 0.1 pour mille à 5 pour mille, ce taux se maintient à 10 pour mille sur sol cultivé (Arrauudeau, 1985).

2.1.1.1. Origines de l'azote du sol

L'azote du sol peut provenir de trois sources : source atmosphérique, source organique et source minérale (Atanasiu, 1984).

2.1.1.1.1. Source atmosphérique

La source atmosphérique constitue la première source en azote. L'azote gazeux constitue les 4/5 de l'atmosphère d'azote du sol. Les orages synthétisent à partir de ce gaz le nitrate d'ammoniaque que l'eau de pluie entraîne dans le sol. Les microorganismes terrestres ou aquatiques, libres ou associés à des plantes (bactéries symbiotiques) l'utilisent aussi pour la synthèse de leurs protéines.

2.1.1.1.2. Source organique

Le sol renferme une proportion importante d'azote organique facilement biodégradable (34 à 50% de protéines, 3 à 10% d'acides aminés, 5 à 10 % d'amino sucres). L'azote organique provient de la décomposition de la matière organique par des microorganismes humificateurs (bactéries, champignons aérobie et anaérobie) par le processus d'**humification**. Les réserves en azote du sol se trouvent sous forme organique et la plante souffrirait d'une carence en azote si la minéralisation de cet azote organique se fait mal (cas de la tourbe, terrain trop acide ou mal aéré).

2.1.1.1.3. Source minérale

L'azote minéral peut provenir soit à partir d'un apport d'engrais minéraux, soit à la suite de la minéralisation de l'azote organique. L'azote minéral du sol peut se trouver sous deux formes : la forme ammoniacale et la forme nitrique.

2.1.1.2. Dynamiques de l'azote dans le sol

Il y a deux processus biologiques :

- La **minéralisation** ou transformation de l'azote organique en azote minéral
- La **réorganisation** ou la transformation de l'azote minéral en azote organique

Ces processus dépendent de l'activité microbienne. En condition normale (population microbienne en présence d'un support énergétique favorable) les deux processus durent deux à trois mois. La **minéralisation** s'effectue en deux phases : l'**ammonification** et la **nitrification**. Le taux annuel de minéralisation est de 1.5 à 2% sous climat tempéré et en augmentation en milieu tropical.

2.1.1.2.1. Ammonification

L'ammonification est le processus durant laquelle l'azote organique se transforme en azote ammoniacal. L'azote ammoniacal est une forme transitoire, soluble dans la solution du sol et retenu par le complexe absorbant. L'ammonification comporte deux réactions biochimiques qui sont : l'**aminisation** et l'**ammonification**.

- L'aminisation donne l'azote amine : Protéine \longrightarrow R- NH₂ + CO₂ + E + autres produits.
- L'ammonification donne l'azote ammoniacal. Elle est sous l'action de bactéries, de champignons et d'actinomycètes. L'ammonification se produit dans des conditions écologiques très variables (gamme de pH, température, humidité).



La quantité d'azote ammoniacal libérée est fonction de la quantité d'azote organique à métaboliser et de la quantité de substances hydrocarbonées.

2.1.1.2.2. Nitrification

La nitrification est le processus durant laquelle l'azote ammoniacal libéré par ammonification ou apporté par les engrais minéraux sont oxydés sous forme nitrique par l'action des bactéries nitrifiantes. La teneur en nitrate sur sol normal est de 2 à 20 mg par kg de terre.

- **Les deux types de nitrification suivant les types de microorganismes**
- La nitrification hétérotrophe effectuée par les microorganismes incapables d'utiliser la réaction d'oxydation de l'azote comme source d'énergie pour leur synthèse cellulaire.
- La nitrification autotrophe élaborée par les microorganismes dont la seule source d'énergie est la réaction d'oxydation de l'azote.

Deux groupes de microorganismes régissent la nitrification autotrophe :

- Groupe des nitrosomonas qui oxyde l'azote ammoniacal en azote nitreux par la réaction de nitrification ou nitrosation : $2\text{NH}_4^+ + 3\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{NO}_2^- + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{H}^+$
- Groupe des nitrobactas qui oxyde l'azote nitreux en azote nitrique par la réaction de nitrification : $2\text{NO}_2^- + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{NO}_3^-$

□ **Les facteurs qui influent l'activité des bactéries nitrifiantes**

Plus il y a de bactéries nitrifiantes, plus il y a de nitrates produites et utilisées par la plante. Ces transformations dépendent :

- De la teneur en azote ammoniacal du sol : un excès d'azote ammoniacal (par apport massif d'engrais ammoniacaux) inhibe les deux chaînons de la nitrification ou seulement de la nitrification par accumulation du nitrate dans le sol.
- Du pH : la nitrification est optimum quand le pH est voisin de la neutralité. La nitrification est inhibée lorsque le pH est inférieur à 5 ou supérieur à 10.0.
- De la composition de l'atmosphère du sol : la nitrification est un processus aérobie mais moins exigeant en O_2 , c'est la teneur en CO_2 qui peut devenir un facteur limitant.
- De l'humidité du sol : avec une forte humidité les échanges gazeux sont réduites. Le pF optimum est de 1.0 à 2.0.
- De la température : la nitrification est optimum à 25°C , elle s'arrête lorsque la température est inférieure à 5°C ou supérieure à 40°C .

2.1.1.2.3. Devenir de l'azote ammoniacal et nitrique

□ **Devenir de l'azote ammoniacal**

L'azote ammoniacal peut être :

- Assimilé directement par la plante.
- Immobilisé par la microflore du sol, utilisé pour sa synthèse cellulaire selon le processus de réorganisation.
- Retenu dans les feuillets des argiles, il évolue alors vers une forme insoluble et inassimilable surtout sur sol tourbeux.
- Perdu par volatilisation sous forme de gaz ammoniacal , perte aggravée sur sol sec et à pH acide.
- Perdu par lessivage ; cependant il est moins sensible au lessivage que l'azote nitrique.

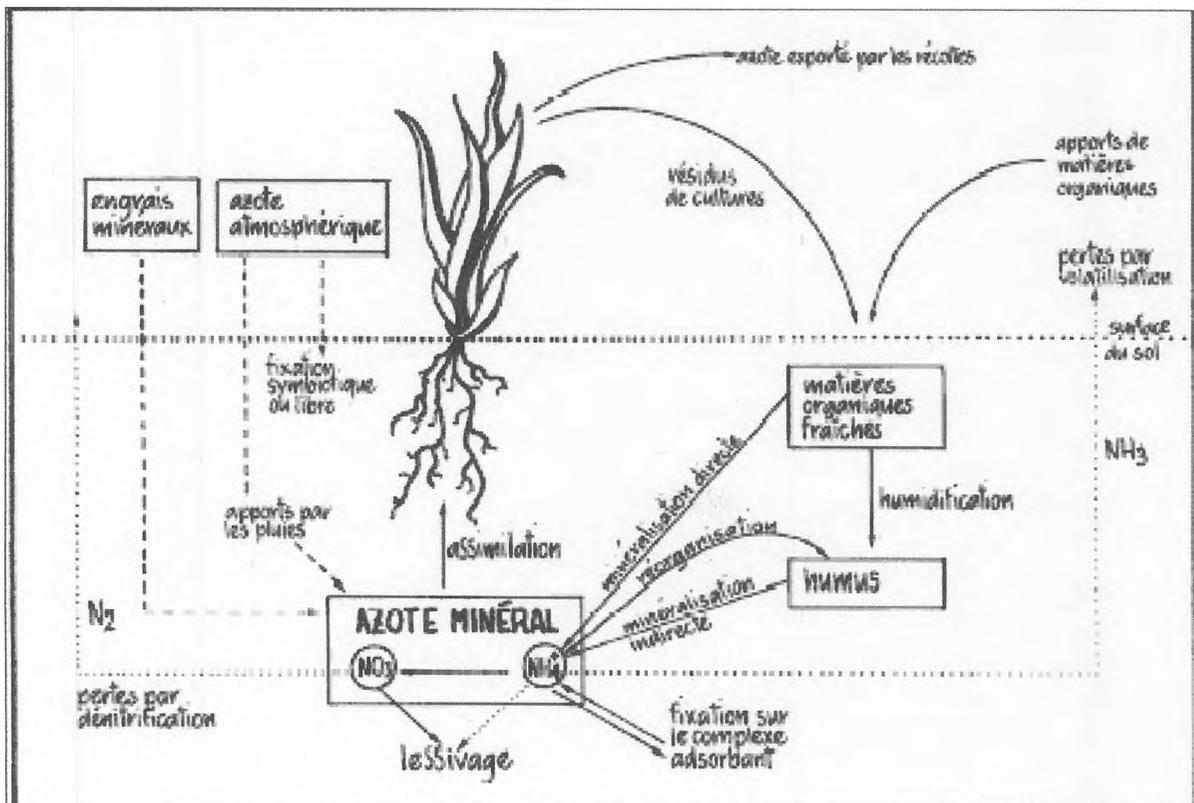
❑ Devenir de l'azote nitrique

L'azote nitrique peut être absorbé par la plante mais étant très mobile, il peut être perdu par :

- Le processus chimique de la dénitrification. La dénitrification est en stricte anaérobiose et est effectuée par les *Bacilles* et les *Pseudomonas*. L'azote gazeux est reparti dans l'atmosphère par volatilisation.
- Le processus physique par lessivage : NO_3^- étant très soluble dans l'eau il n'est pas retenu par le complexe absorbant et peut être entraîné en profondeur. A la mort des microorganismes, l'azote est libéré dans le sol.
- Le processus biologique par suite de l'immobilisation de l'azote nitrique par les microorganismes.

L'azote nitrique est la source de plusieurs types de pollution en particulier les nitrates dans les nappes phréatiques, le N_2O , gaz à effet de serre, qui séjourne longtemps dans l'atmosphère et qui interfère avec l'ozone et enfin le NH_3 et NO_x (NO , NO_2 ...) qui séjournent pendant un certain temps dans l'atmosphère puis retombent sur le sol. Chaque année, les pertes d'azote se chiffrent à 10 kg par ha. Les pertes sont aggravées sur sol sec et mal aéré.

Figure 4 : Différentes formes d'azote dans le sol et leur évolution possible
(source : Memento de l'agronome)



2.1.2. CYCLE DE L'AZOTE DANS LA PLANTE

L'azote est un élément important dans la constitution de la plante : 1 à 4% du poids sec de la plante sont constitués par l'azote. Cette teneur, faible par rapport aux taux d'oxygène, de carbone et d'hydrogène, varie suivant *les organes de la plante* (les feuilles sont les plus riches en azote), *le stade de développement* (les tissus jeunes ont un taux d'azote plus élevé, jusqu'à 5 à 6%) et *l'espèce végétale* (IRRI, 1981).

2.1.2.1. Différentes formes d'azote dans la plante

L'azote se trouve dans la plante sous trois formes : la **forme minérale**, la **forme protidique insoluble** et la **forme organique soluble**.

- La forme minérale surtout sous la forme nitrique est l'état transitoire en attendant la biosynthèse sous forme organique. La forme minérale se trouve dans la sève brute.
- La forme protidique insoluble se trouve essentiellement dans les chloroplastes des jeunes feuilles, dans les graines. Ces protéines représentent 10 à 15% du poids sec.
- La forme organique soluble est accumulée dans les organes de réserve à l'état des composés aminés et amides (asparagine et glutamine). La forme organique est abondante dans les organes de réserves (tubercules, bulbes, racines et fruits).

Ces différentes formes d'azote ne se présentent pas sous la même proportion dans la plante. Les protéines représentent une part majoritaire (cf tableau 1).

Tableau 1 : Proportion de chaque forme d'azote dans la plante

(Source: Mengel et al., 1987)

Formes d'azote		Part de la quantité d'azote totale de la plante (%)
Azote minéral	Nitrate, nitrite, ammonium	5
Azote organique	Acides aminés	5
	Protéines	80
	Acides nucléiques	10

2.1.2.2. Flux de l'azote dans la plante

Ces flux comportent quatre étapes qui sont : l'**absorption**, l'**assimilation**, l'**accumulation** et la **remobilisation** de l'azote dans la plante (Atanasiu, 1984).

2.1.2.2.1. Absorption de l'azote

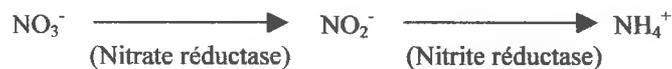
L'azote minéral est absorbé au niveau des poils absorbants. Cette absorption dépend des besoins créés par les parties aériennes, de la concentration en éléments minéraux du sol en contact avec la racine et des différentes conditions du milieu (pH, température, aération).

La forme d'absorption par excellence est le nitrate mais aussi dans une moindre mesure l'ion ammonium. Les cellules végétales sont très perméables à ces ions (ion ammonium et ion nitrique) par conséquent, ces derniers sont les plus absorbés par la plante : cinq fois plus que l'ion phosphate et dix fois plus que l'ion sulfate.

2.1.2.2.2. Assimilation de l'azote

L'assimilation se décompose en deux phases successives qui sont la **réduction de NO_3^- en NH_4^+** et le **passage de l'azote minéral en azote organique**.

La forme nitrique nécessite une réduction préalable avant de réagir avec les acides cétoniques. Le nitrate est réduit en nitrite par l'intervention d'une enzyme la nitrate réductase au niveau du cytoplasme. Le nitrite est rapidement converti en ammonium par une autre enzyme, la nitrite réductase, présente essentiellement dans les chloroplastes.



L'ion ammonium est ensuite fixé à un acide alpha cétonique issu de la dégradation des glucides. Il participe à la synthèse des formes organiques azotées. Les **acides aminés** obtenus s'associent ensuite pour former les **protéines**, telles les enzymes, les protéines de structure ou les protéines de réserves. Les acides aminés et les protéines sont des molécules complexes insolubles.

Parallèlement, l'ammonium intervient dans la synthèse des **acides nucléiques**.

2.1.2.2.3. Accumulation de l'azote dans la plante

Lorsque l'azote n'est pas un facteur limitant, l'absorption d'ions nitrates est en excès et la quantité de nitrate réductase n'est pas suffisante pour réduire la quantité d'ion nitrique. Le nitrate s'accumule alors dans les vacuoles de la plante. Cependant le nitrate n'est pas la seule forme d'azote accumulée dans la plante, il y a aussi les acides aminés et les protéines qui sont stockés dans les organes de réserves (troncs, racines, grains, fruits).

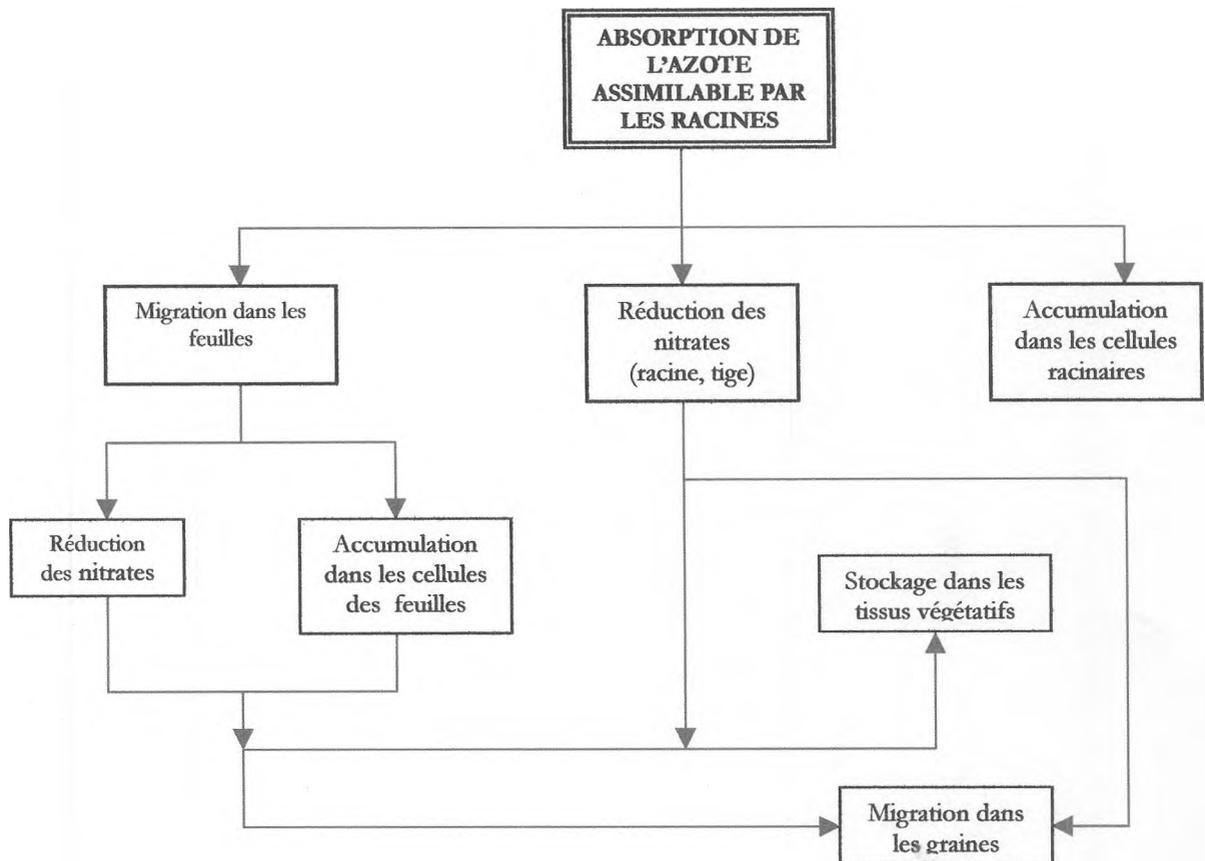
L'accumulation de l'azote varie suivant le stade de croissance de la plante :

- Au cours de la phase végétative, l'azote s'accumule au niveau des organes végétatifs (tiges, limbes). La tige et la gaine contiennent d'avantage de nitrates que les feuilles et cette concentration décroît de la base de la tige jusqu'au sommet.
- A partir de la floraison, l'azote migre vers les graines (70 à 75 % de l'azote total de la tige).

2.1.2.2.4. Remobilisation

Au cours de la vie d'une plante à graines, l'azote absorbé au niveau des racines est assimilé pour alimenter les organes végétatifs. Une partie de cet azote, provenant de la sénescence des feuilles les plus âgées et de la tige, est redistribuée vers les organes en croissance et les organes reproducteurs. Cette remobilisation de l'azote suffit à satisfaire les besoins de la plante.

Figure 5 : Devenir de l'azote dans la plante (Source : Egmond Van, 1979)



2.1.3. RELATION ENTRE CROISSANCE ET TENEUR EN AZOTE

Plus la plante croît, plus sa teneur en azote diminue.

La diminution de la teneur en azote s'explique par :

- Le **phénomène d'auto-ombrage des feuilles** : quand la plante croît, la proportion des feuilles à l'ombre augmente ; alors la quantité de protéines chlorophylliennes, et donc d'azote total, par unité de biomasse, diminue.
- Le **changement du ratio feuilles/ tiges** : l'azote est surtout contenu dans les feuilles, la diminution du ratio feuilles / tige entraîne la diminution de la quantité d'azote par unité de biomasse . De plus , les feuilles âgées ont moins d'azote que les feuilles jeunes car

celles-ci sont plus riches en protéines enzymatiques, alors que les premières sont plus riches en constituants des parois cellulaires, donc ont moins de protéines.

- La **sénescence des grandes feuilles** qui se traduit par une remobilisation de l'azote vers les organes en croissance. L'absorption devient faible. L'azote total contenu dans la plante ne varie plus tandis que la matière sèche aérienne continue de croître, si bien que la proportion d'azote dans la plante diminue.

2.1.4. CONCLUSION PARTIELLE

L'azote est un élément chimique indispensable à la croissance et au développement des organismes vivants.

L'azote du sol peut provenir soit d'une source atmosphérique, soit d'une source organique, soit d'une source minérale. La matière organique se décompose et donne de l'azote organique, qui, par le processus de minéralisation se transforme en azote minéral. La forme organique est la seule forme de stockage possible dans le sol, elle permet d'observer un arrière effet de l'azote chez les cultures ultérieures. La forme minérale représente la forme assimilable, elle est en grande partie perdue par lessivage.

L'azote dans la plante peut se trouver sous forme minérale, sous forme protidique insoluble ou sous forme organique soluble. L'azote une fois absorbé est assimilé, il peut s'accumuler et peut aussi être remobilisé. Il y a une relation entre l'absorption de l'azote, la production de matières sèches et la croissance : plus la plante croît et plus la teneur en azote diminue. Du point de vue agronomique, le poids de matière sèche produite est le fruit de l'activité photosynthétique. L'azote exerce ainsi une grande influence sur cette production de biomasse végétale.

2.2. FERTILISATION ET GESTION DE LA FERTILITE

Fertiliser un sol c'est le rendre potentiellement apte à produire une meilleure récolte tant au point de vue quantitatif que qualitatif. Un sol fertile a de bonnes propriétés physiques (structure) et chimiques (teneur en éléments fertilisants, assimilables...). Aussi faut-il entretenir et améliorer le sol chimiquement par des apports d'engrais minéraux et physiquement par des amendements calcaires et humiques.

2.2.1. FERTILISATION

2.2.1.1. Principes pour le succès d'une bonne fertilisation

Une bonne fertilisation nécessite la connaissance de l'espèce de plante à cultiver et de ses besoins tout au long de son développement, de la nature et de la capacité du sol à fournir ces éléments nutritifs assimilables, du précédent cultural et enfin de la composition, de l'efficacité et de la caractéristique de l'engrais utilisé.

2.2.1.2. Modes d'apport des engrais

Il y a deux modes d'apport d'engrais. A savoir : la *fumure équilibrée* qui évite de tomber dans la loi du facteur limitant et la *fumure de fond* qui pouvait satisfaire toutes les carences des éléments nutritifs du sol, et créer ainsi une bonne base de teneur en éléments nutritifs.

2.2.1.3. Méthodes d'épandage

Il y a quatre méthodes d'épandage :

- *Epandage à la volée* : c' est le mode d'épandage le plus ancien et le plus fréquemment utilisé. Il consiste à épandre l'engrais à la surface du sol suivi ou non d'une incorporation dans le sol.
- *Epandage sur ligne* : il consiste à appliquer l'engrais sous le pied des plantes en ligne ou en poquet.
- *Enfouissement* : il consiste à enfouir l'engrais dans le sol sans tenir compte de l'emplacement des semences ou des jeunes plants.
- *Pulvérisation* : l'application se fait directement sur la plante (pulvérisation foliaire) ou dans le sol.

2.2.1.4. Engrais azotés

L'azote est le pivot de la fumure. Il exerce sur la plante une action énergétique rapide qui se traduit par une belle végétation d'un vert foncé avec un grand développement des feuilles et des tiges. Cependant, son emploi nécessite certaines précautions car un excès d'azote ou une carence sont néfastes pour la plante.

- **Conséquences d'une forte fumure minérale azotée**

Une trop forte fumure azotée peut entraîner :

- Une attaque de maladies chez les tissus végétaux qui restent tendres trop longtemps.
- Une grande fragilité de l'appareil végétatif qui peut entraîner la verse chez les céréales.
- Un développement foliaire trop important pendant la période de sécheresse, il peut y avoir phénomène de flétrissement.
- Un retard dans la maturité des récoltes : la plante semblerait perdre du temps à fabriquer des tiges et des feuilles aux dépens de la fabrication des fruits ou aux dépens de l'accumulation des réserves.

Ces accidents sont atténués ou même évités si l'alimentation de la plante est équilibrée. C'est à dire à côté d'un excès d'azote, celle-ci doit trouver en quantité suffisante du K_2O et P_2O_5 ainsi qu'un ensoleillement correct pour la photosynthèse.

- **Conséquences d'une carence en fumure minérale azotée**

Les maladies de carence sont dues à l'insuffisance d'un élément minéral. On peut soit faire disparaître les symptômes par l'apport de l'élément sur la culture en place, soit empêcher les symptômes d'apparaître par l'apport précoce de cet élément.

Une carence en azote se manifeste généralement chez la plante par :

- Un développement de l'appareil végétatif réduit : la taille et la vigueur de la plante sont faibles.
- Une coloration des feuilles moins vertes : verte jaunâtre et qui évolue vers une pigmentation pourpre sur les bords des feuilles.
- Une accélération de la fructification et de la maturation.

Tableau 2 : Concentration des éléments dans les tissus

(Source : Atanasiu et Samy, 1984 et de Datta, 1981)

Concentration dans les tissus	Statut nutritionnel	Comportement de la plante	observation
Carence	Carence aiguë	Symptômes visuels et effet direct de la fertilité et des limbes	Limite des symptômes visuels
Déficiência basse	Carence diffuse, déficiencia latente	Pas de signes extérieures mais accroissement du rendement par application d'engrais	
Intermédiaire suffisante adéquate	Optimale	Bonne croissance et généralement bonne quantité de récoltes	Limites de rendement
Elevée	Consommation de luxe	Bonne croissance mais début d'une baisse de rendement	
Très élevée	Excessif ou toxicité	Baisse de rendement avec possibilité de symptômes visuels	Niveau de départ de la toxicité

La concentration « suffisante/ normale » en azote de quelques plantes se résumant dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Concentration « suffisante/ normale » en azote de quelques plantes

(Source : Cours Ecophysiologie Végétale)

Plantes cultivées et organes	N (% de MS)
Arachide : floraison, jeunes feuilles complètes	3.5 – 4.5
Carotte : milieu de croissance, partie aérienne	2 – 3.5
Coton : floraison, jeunes feuilles complètes	3.6 – 4.7
Haricot vert : début floraison, jeunes feuilles complètes	3 – 6
Pomme de terre : début floraison, jeunes feuilles complètes	5 – 6.5
Riz : jeunes feuilles complètes avant floraison	2.9 – 4.2
Tomate : début fructification, jeunes feuilles complètes	4 – 5.5

2.2.1.4.1. Engrais azotés organiques

Les engrais azotés organiques ont une action lente et progressive sur la plante au fur et à mesure de leur minéralisation. Donc, ils sont intéressants car ils échappent aux pertes par lessivage. Seuls les produits végétaux avec cellulose et lignine donnent de l'humus. L'humus a trois principaux rôles : il améliore et stabilise la structure du sol, stimule l'activité biologique, et contribue à la nutrition de la plante par les produits de minéralisation ou les molécules organiques directement assimilables.

Lors de notre expérimentation, nous avons utilisé du fumier de ferme. Le fumier de ferme est constitué d'un mélange de litière d'origine végétale, qui fournit par sa décomposition l'humus, et de déjections animales ayant subi des fermentations.

2.2.1.4.2. Engrais minéraux azotés

Il y a trois catégories d'engrais minéraux azotés : la forme ammoniacale, la forme nitrique et la forme ammoniacale nitrique.

❑ Forme ammoniacale

Parmi la forme ammoniacale il y a : les engrais ammoniacaux et les engrais amidiques

• Engrais ammoniacaux

Ce sont les engrais les plus couramment utilisés. L'action des engrais ammoniacaux est plus rapide par rapport à celle des engrais organiques. Ils ont une action plus lente et sont moins sensibles au lessivage en comparaison avec les engrais nitriques. L'ion ammonium en déplaçant les ions Ca^{++} et les ions Mg^{++} du complexe argilo humique entraîne sa décalcification suivie de son acidification. Les engrais ammoniacaux comprennent le sulfate d'ammonium, le chlorure d'ammonium et les phosphates d'ammonium.

• Engrais amidiques

Les engrais amidiques ne sont pas assimilés directement par la plante. Il faut qu'ils soient hydrolysés pour produire des ions ammoniacaux. Les engrais amidiques sont composés du cyanamide calcique et de l'urée

*Lors de notre expérimentation, nous avons utilisé de l'urée. L'urée contient 46% d'azote ammoniacal. Elle doit être hydrolysée préalablement par les microorganismes (qui produisent de l'uréase) avant de passer à l'état ammoniacal qui est la forme assimilée par la plante. Cette hydrolyse est plus ou moins rapide (2 à 3 jours) si les conditions de température et la teneur en matière organique du sol sont satisfaisantes. Ainsi en hiver sur les Hauts plateaux Malgaches, l'action de l'urée est ralentie due à une diminution de l'activité des microorganismes. L'urée est très soluble tant qu'elle n'est pas hydrolysée et elle peut descendre en profondeur dans le sol. Dans ce cas, son efficacité est à craindre. Quoiqu'il en soit, l'urée est l'engrais par excellence des *tanety* parce qu'elle est alcalinisante.*

❑ Forme nitrique

Chaque fois que l'on veut obtenir une action rapide sur la végétation, il faut envisager un apport d'engrais nitrique. En effet, ils sont facilement absorbés par la plante. Etant très mobiles, ils ne sont pas retenus par le complexe absorbant donc ils sont exposés au lessivage. En milieu inondé et anaérobi, les microorganismes réduisent l'ion nitrique en azote nitreux (toxique pour la plante) puis en azote moléculaire qui s'échappe dans l'air. Les

engrais nitriques peuvent être employés tardivement en couverture sur riz de *tanety* à sec. Les engrais nitriques sont le nitrate de chaux, le nitrate de soude et le nitrate de potasse.

□ **Forme ammoniacale nitrique**

Les engrais azotés sous cette forme possèdent à la fois les propriétés des engrais ammoniacaux (fixation par le complexe, action plus durable) et les propriétés des engrais nitriques (action rapide et lessivage possible). Les engrais ammoniacaux nitriques sont le nitrate d'ammoniaque et les ammonitrates.

2.2.1.5. Engrais composés

Les engrais composés sont composés de deux corps différents qui apportent au moins deux des éléments fertilisants principaux. Ils sont toujours désignés par trois chiffres indiquant les quantités respectives d'azote, de phosphore et de potassium. Il faut les apporter à l'époque optimum d'épandage de l'azote (l'azote risquerait d'être perdu si son apport se fait trop tôt). Parmi les engrais composés il y a : les engrais de mélange, les engrais organiques dissous et les engrais complexes.

Lors de notre expérimentation, nous avons utilisé de l'NPK.

2.2.1.6. Amendements calciques

Les sols ferrallitiques acides ont besoin d'être chaulés. Le calcium a quatre rôles principaux : physique, chimique, biologique et physiologique.

- **Rôles physiques** : le Ca intervient dans la structure du sol en favorisant la coagulation des colloïdes humiques et les colloïdes argileux, qui formeront les agrégats. Sinon, les colloïdes humiques dispersés maintiennent l'argile en suspension et facilitent son entraînement en profondeur.
- **Rôles chimiques** : le Ca augmente le pH et facilite la décomposition des matières organiques en saturant les acides organiques qui en résultent et il empêche la rétrogradation des phosphates monocalciques qui redeviendraient insolubles.
- **Rôles physiologiques** : le Ca participe dans la nutrition de la plante et dans les phénomènes d'antagonisme d'ions. En effet, l'absorption du Ca empêche celle de certains éléments (Al, Mn) qui, en quantité trop élevée sont toxiques pour la plante.
- **Rôles biologiques** : le Ca favorise certains phénomènes microbiens tels que la nitrification et la fixation de l'azote par les azotobacters.

Lors de notre expérimentation, nous avons utilisé comme chaulage d'entretien de la dolomie.

2.2.2. GESTION DE LA FERTILITE DU SOL

La gestion de la fertilité du sol consiste à préserver son potentiel productif.

La monoculture va entraîner la fatigue du sol, elle favorise un appauvrissement des éléments nutritifs de l'horizon exploité par les racines et une accumulation des substances sécrétées par les racines (toxines). La fatigue du sol se répercute sur le rendement. Pour y remédier, les paysans pratiquent la rotation, l'assolement et la jachère.

- ❑ La **rotation** se traduit par la succession de différentes cultures sur un champ d'une année à une autre.
- ❑ L'**assolement** se traduit par la division de la surface cultivée en sites ou parcelles.
- ❑ La **jachère** est une méthode extensive, peu coûteuse pour la reconstitution de la fertilité du sol. Il y a la jachère couverte et la jachère nue. En agriculture intensive, il y a aussi la jachère cultivée par utilisation des engrais verts. La jachère cultivée laisse dans le sol beaucoup de matières organiques, un système racinaire profond amène les éléments du sous-sol vers la couche arable.

Sur le dispositif principal la rotation existante sur dix années se résume ainsi : durant les cinq premières années, il y avait surtout du blé, ensuite quatre années de jachère nue et durant la dernière année, il y avait de la plante de *bracharia*, herbe à pâtûrage pourvu d'un système racinaire puissant.

2.2.3. CONCLUSION PARTIELLE

L'azote est le pivot de la fumure. Pour une bonne efficacité de la fumure azotée il faut approvisionner la plante au moment opportun, en plusieurs épandages échelonnés et cet apport doit couvrir les besoins de la plante. Cependant, il faut tenir compte de la quantité que la plante peut absorber. La présence des mauvaises herbes nuit au développement des plantes. Aussi, faut-il les éliminer afin que l'emploi des fumures soit rentable. Chaque catégorie d'engrais a un effet particulier : l'engrais azoté exerce sur la plante une action énergétique rapide qui se traduit par une belle végétation d'un vert foncé avec un grand développement des feuilles et des tiges, l'engrais phosphaté donne de la force et de la rigidité aux plantes tandis que l'engrais potassique agit sur les graines, les racines et les tubercules car il contribue à l'augmentation du poids, à l'enrichissement qui en amidon, qui en huile, qui en sucre.

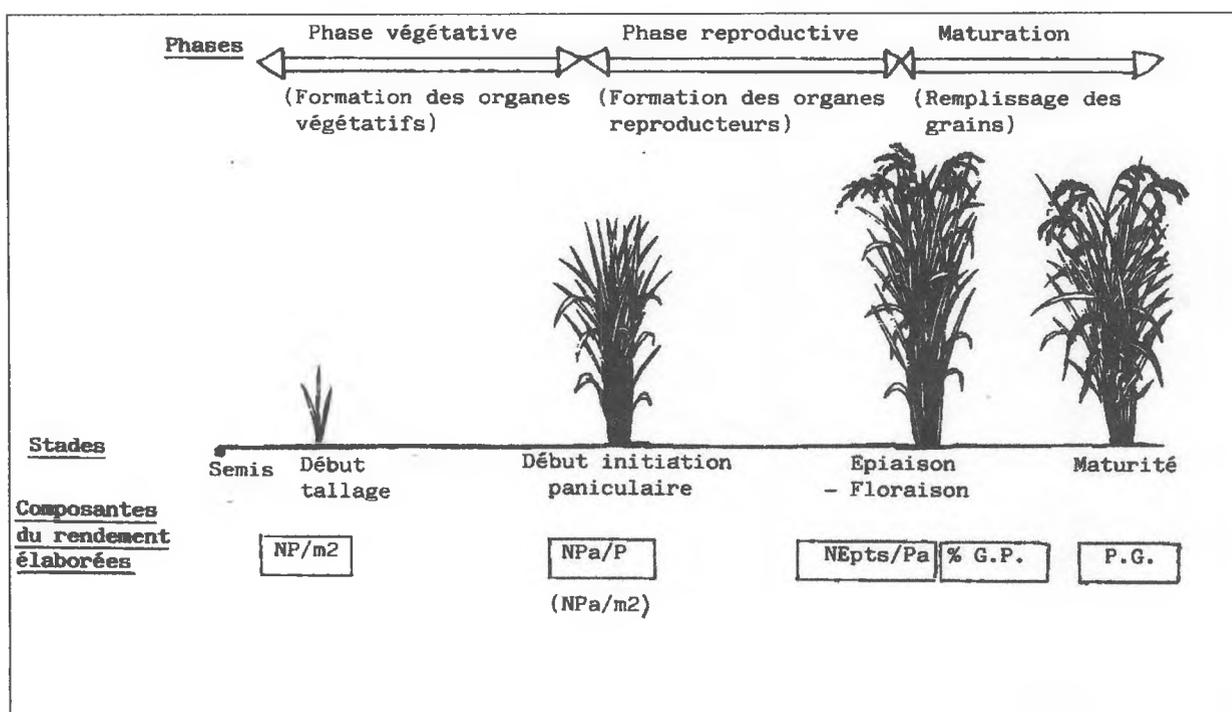
2.3. CYCLE CULTURAL ET BESOIN DU RIZ

2.3.1. CYCLE DU RIZ ET LES DIFFERENTS SCHEMAS DE CROISSANCE

2.3.1.1. Cycle du riz

Le cycle du riz dure de 100 à 120 jours avec une moyenne de 140 et 150 jours. La croissance se traduit par une augmentation de taille, de volume ou de poids ; tandis que le développement est le passage du riz par les trois phases qui sont la phase végétative, la phase reproductive et la maturation. Durant chacune de ces phases des composantes participent l'une après l'autre à l'élaboration du rendement. Ce sont le *nombre de pieds par m²*, le *nombre de panicules par plant*, le *nombre d'épillets par panicule*, le *pourcentage de grains pleins* et le *poids moyen d'un grain*.

Figure 6 : Elaboration du rendement (source : Arreaudeau, 1991)



Annexe 4 : Systématique du riz

2.3.1.1.1. Phase végétative

La phase végétative constitue la première phase du cycle et représente le développement et la croissance des organes végétatifs. Elle dure environ 75 jours. Les composantes du rendement s'élaborant au cours de cette période sont le *nombre de pieds par m²* et le *nombre de panicules par pied*. En effet, même si les panicules n'apparaissent

pas encore à la fin de cette phase, le nombre de talles fertiles, qui porteront ultérieurement une panicule est déterminé durant cette phase.

Germination

La maturité physiologique du grain pour la germination est en général postérieure à la moisson, ce qui empêche les grains récoltés en saison de pluie de germer sur pied. La germination débute 2 à 14 JAS selon la température. Le *nombre de grains semés par m²* et le *nombre de pieds par m²* sont les composantes du rendement intermédiaires élaborées.

Tallage

Le tallage commence normalement au stade trois feuilles. Le nombre de talles augmente et atteint un maximum. Ce nombre diminue au fur et à mesure que les graines mûrissent. En effet, les talles encore plus jeunes ou malingres n'arrivent pas à résister et meurent. Ils vont constituer ainsi des litières et vont produire un arrière effet pour les prochaines cultures. Plus un plant talle, plus il y aura un développement racinaire important, d'où une plus grande surface exploitée par les racines (capacité de puiser les éléments nutritifs dans le sol). La composante intermédiaire élaborée est le *nombre de talles maximum par pied*, c'est le nombre de talles atteint au moment de l'arrêt du tallage.

2.3.1.1.2. Phase reproductrice

Durant la phase reproductrice se mettent en place les organes reproducteurs appelés panicules. L'épiaison se produit peu après ou à la fin du tallage. Elle dure deux à trois semaines. Cette période est la plus critique. Elle est caractérisée par trois phases qui sont la montaison, la floraison et la fécondation.

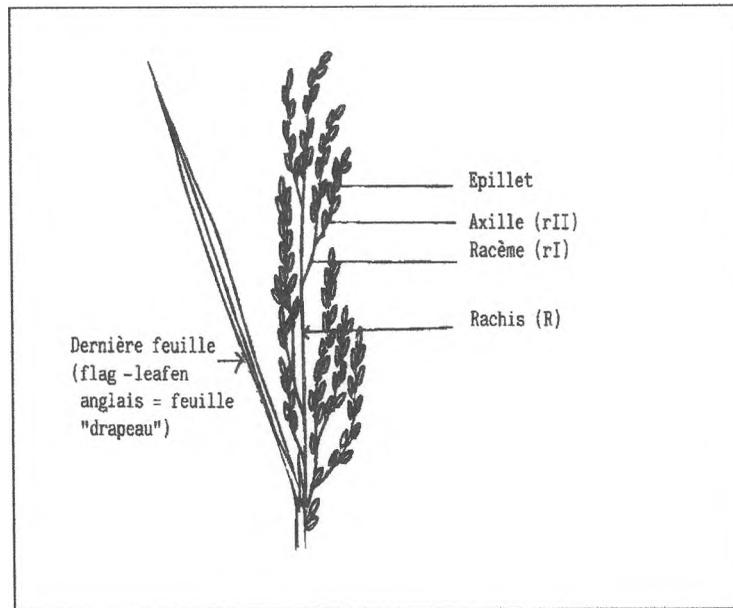
Montaison

La montaison a lieu 60 à 80 JAS. Elle débute par la formation de l'ébauche paniculaire. Les panicules, qui sont les organes reproducteurs, se différencient et commencent à être visibles. L'initiation est suivie d'un renflement de la tige à sa partie supérieure, puis une apparition de la feuille « drapeau » et enfin la panicule sort de la gaine paniculaire. La panicule commence au « niveau basal ». Les épillets sont portés soit directement par le rachis, soit par les deux niveaux de ramifications, les racèmes ou les axilles.

Floraison

Chaque épillet peut donner une fleur. La floraison correspond à l'ouverture des glumelles et à la sortie des étamines. Elle dure six à dix jours par panicule.

Figure 7 : Structure d'une panicule à la floraison (source Arreaudeau, 1991)



Cliché 3 : variété FOFIFA 154 en pleine floraison (source : auteur)



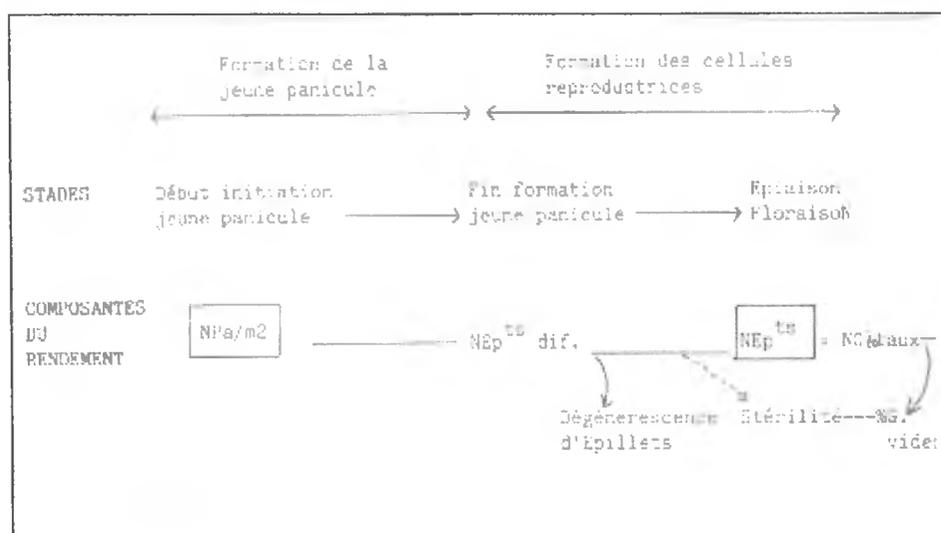
Fécondation

C'est pendant la floraison qu'a lieu l'auto-pollinisation : des millions de fleurs se transforment alors en grains. Chaque fleur donne un seul grain correspondant à un épillet. La fécondation se situe entre neuf heures du matin et trois heures de l'après midi ; elle dure moins d'une heure pour un épillet.

Classiquement la phase reproductive est divisée en deux périodes, à savoir :

- La période de formation de la jeune panicule durant laquelle se différencient les épillets. On aboutit au **nombre d'épillets différenciés**.
- La période de formation des cellules reproductrices à savoir les ovules et les grains de pollen. Durant cette période, un certain nombre d'épillets peuvent dégénérer, aboutissant, à un nombre final d'épillets observés. D'autre part, certaines malformations des cellules reproductrices peuvent se produire, entraînant la stérilité des épillets formés. Cette stérilité ne s'extériorise qu'après l'épiaison ce qui explique la présence de grains vides (Moreau, 1987).

Figure 8 : Principaux stades de la phase reproductive et élaboration des composantes (source, MOREAU, 1987)



2.3.1.1.3. Maturation

La maturation débute après la fécondation et s'achève à la récolte. La composante du rendement s'élaborant au cours de la maturation est le **poils moyen d'un grain**. Le pourcentage de grains pleins est déterminé à la floraison, mais s'extériorise durant le remplissage des grains. Le grain est mûr 45 jours environ après la sortie de la panicule.

Le riz à maturité physiologique est reconnu par les trois critères suivants :

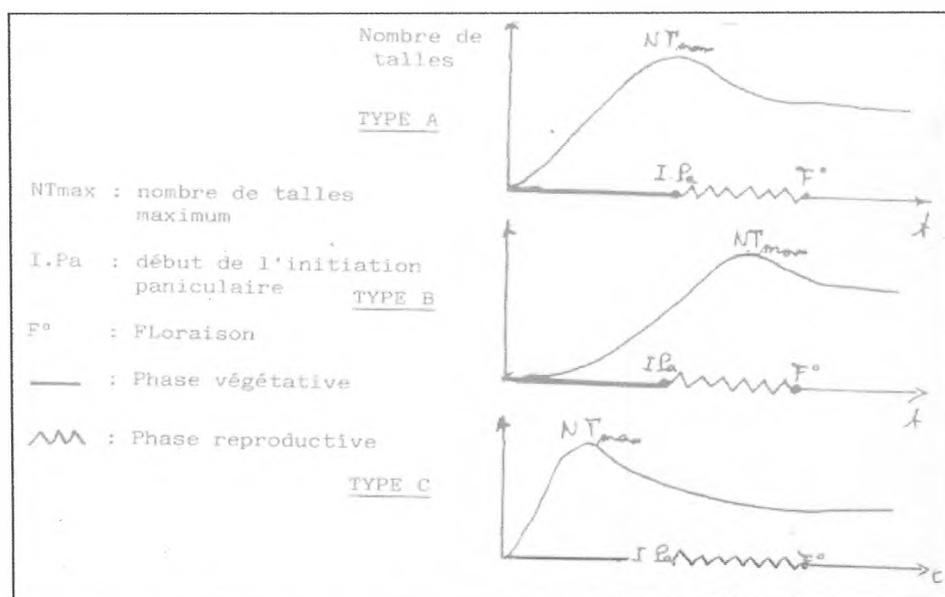
- Les feuilles virent au jaune, les talles non fertiles meurent : c'est la sénescence.
- ¾ de la panicule se colore en jaune; les glumelles jaunissent et durcissent.
- La tige sous le poids de la panicule se courbe.

2.3.1.2. Différents schémas de croissance

La durée relative et la position de chaque phase dépendent de la variété (tardive, précoce ou sensible à la photopériode), du milieu (températures et rayonnement essentiellement) et des conditions de nutrition (surtout la nutrition azotée).

Un des points essentiels influant sur l'élaboration du rendement du riz est la position moyenne de l'initiation paniculaire par rapport à la fin du tallage. On distingue trois types de cycle suivant la position relative de ces stades.

Figure 9 : Les trois types de cycle (source TANAKA, 1971)



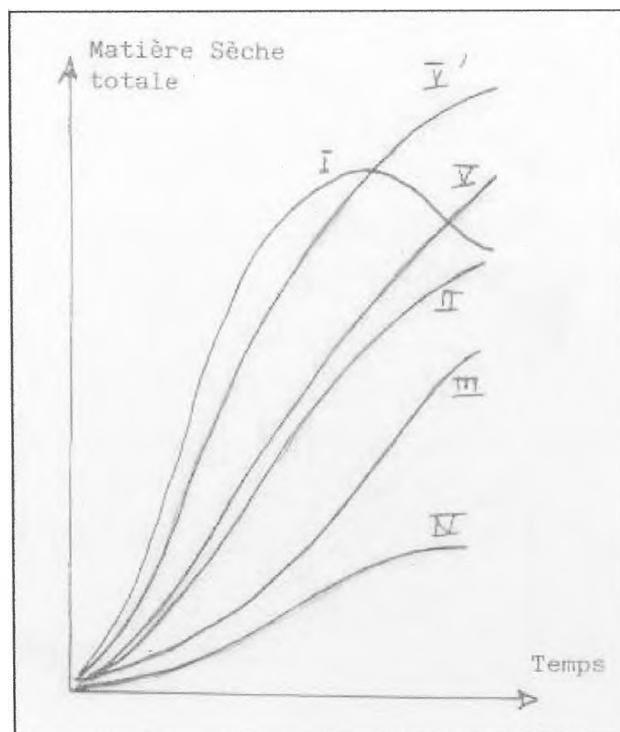
Type A : Le tallage s'arrête juste avant l'initiation paniculaire. La croissance ultérieure profitera donc pleinement à la formation des épillets.

Type B : Le tallage continue bien après l'initiation paniculaire. Le nombre de talles stériles est important et constitue une compétition pour la formation des épillets. Le nombre d'épillets par panicule est faible.

Type C : L'arrêt du tallage s'est produit bien avant l'initiation paniculaire. Le nombre de talles dégénérées est important et le nombre de panicules est faible.

Des précisions peuvent être données en ce qui concerne la production de matières sèches au début du cycle.

Figure 10 : Différents schémas de croissance (source : TANAKA, 1971)



Type I : croissance vigoureuse au départ puis faible en fin de cycle. Le type I est à rapprocher du type C. on le rencontre en cas de fortes températures ou bien d'alimentation azotée excessive en début du cycle. L'Harvest Index, qui est le rapport entre le poids des grains et le poids de la paille produite, est faible.

Type II et V : La croissance est modérée (II) à forte (v et v') durant tout le cycle. Un bon équilibre a été trouvé entre la phase végétative et la phase reproductive. Ces types sont à rapprocher du type A précédent ; l'Harvest Index est modéré (II et V') à fort (V). Le type V correspond à de forts rayonnements durant la maturation et à un PMG élevé.

Type III : La croissance est faible au départ puis forte avec une croissance végétative prolongée. Ce type III, à rapprocher du type B précédent, outre les caractéristiques variétales, se retrouve dans le cas de faibles températures en début du cycle.

Type IV : La croissance est lente et continue. Les conditions de nutrition sont insuffisantes ou les conditions de croissance difficiles.

2.3.2. INFLUENCE DES MAUVAISES HERBES, DES INSECTES ET DES MALADIES SUR LE RIZ PLUVIAL

2.3.2.1. Influence des mauvaises herbes

La condition *sine qua non* pour la réussite de la fertilisation est la maîtrise des mauvaises herbes. En effet, les mauvaises herbes, sont concurrentes du riz sur les éléments nutritifs, l'eau et la lumière. En outre, leur présence ne facilite pas les opérations culturales ; et enfin, les mauvaises herbes servent de refuge pour les insectes prédateurs. Les mauvaises herbes sont classées suivant leur pérennité (annuelle, bisannuelle ou vivace) et leur famille. Les principales mauvaises herbes du riz pluvial appartiennent à deux familles de la classe des Monocotylédones :

- Famille des graminées (*Eleusine indica*, *Echinochloa crus-galli*...)
- Famille des cyperacea (*Cyperus iria* L., *Cyperus rotundus*...)

Au cours de notre expérimentation, les mauvaises herbes sont arrachées manuellement.

2.3.2.2. Influence des insectes

Les insectes en cas d'infestation grave peuvent entraîner une chute totale du rendement. *Sur les parcelles d'expérimentation*, il n'y avait pas trop d'attaques d'insectes. Cependant nous avons trouvé quelques-uns appartenant à la famille de Lépidoptères et de Coleoptères ainsi que l'*Heteronychus plebeus (behatoka)* qui est un insecte terricole et qui attaque les plants au niveau du collet.

2.3.2.3. Maladies du riz pluvial

Parmi les maladies du riz pluvial, la *pyriculariose* est la plus grave. Elle est causée par le *Pyricularia oryzae*. Sur les limbes les lésions typiques ont une forme en fuseau : larges au centre et effilées aux deux extrémités. Les tiges attaquées deviennent noirâtres et se cassent facilement. Des apports élevés d'azote et l'humidité au niveau des feuilles favorisent l'infestation.

2.3.3. BESOINS DU RIZ AU COURS DE SON CYCLE

2.3.3.1. Besoins physiologiques du riz au cours de son cycle

2.3.3.1.1. Influence de la température

Les besoins en température varient selon le stade de croissance. Un développement optimum est obtenu entre 25 et 30°C. Durant la phase végétative, l'influence de la température est supérieure à celle de la lumière. Le froid gêne le tallage et peut même arrêter la croissance. Lors de l'épiaison, il faut que la température soit supérieure à 22°C.

Une basse température entre le 20^{ème} et 24^{ème} jour avant l'épiaison entraîne un taux de stérilité élevé.

Tableau 4 : Températures des différents phases du cycle du riz
(source : Memento de l'agronome)

Stade de développement	T° min. (°C)	T° opt. (°C)	T° max. (°C)
Germination	14 - 16	30 - 35	42
Tallage	16-18	28 - 30	40
Floraison	22	27 - 29	40
maturation	19	25	40

2.3.3.1.2. Influence de la lumière

Le riz est une plante de pleine lumière. L'intensité lumineuse joue un rôle dans l'assimilation du CO₂ par la plante et l'assimilation des diverses activités physiologiques comme l'absorption de l'azote. La lumière a une action dès les premiers stades de la croissance du jeune plant de riz. L'obscurité ou un faible éclairage entraîne l'élongation des jeunes plants. La plante a besoin de beaucoup de radiations solaires lors de la phase d'initiation paniculaire jusqu'au dixième jour de la maturité. Pour la culture pluviale l'insolation doit être suffisante 200 à 250 heures par mois

Annexe 5 : Conséquences d'une lumière diffuse ou d'une forte insolation au cours du cycle du riz.

2.3.3.1.3. Action de l'eau

La pratique de la riziculture pluviale doit impérativement coïncider avec les saisons de pluie : il faut tenir compte de l'importance en quantité de la précipitation et de la répartition au cours de la saison de culture. Une partie de la pluie est perdue dans le sol par infiltration, ou par ruissellement ou par évaporation.

□ Rôles de l'eau

L'alimentation hydrique et la nutrition minérale interagissent fortement sur la croissance du riz, du fait de l'absorption parallèle de ces deux facteurs de croissance. En effet, l'eau sert de véhicule et aux éléments nutritifs dans la plante et aux produits élaborés constitutifs des substances végétales. Elle est aussi source d'hydrogène et d'oxygène pour la plante. Elle est encore indispensable à l'élaboration de la matière sèche aérienne.

Besoin en eau

Le besoin en eau est déterminé en fonction de la transpiration. Le coefficient de transpiration est de 682. L'évaporation doit être impérativement inférieure aux taux des précipitations. Il faut 160 à 200 mm de pluie par mois pour assurer les besoins des plants. Une déficience en eau entre le début de la germination et la levée peut entraîner la mort des plantules. Lors du tallage la déficience entraîne des signes de flétrissement plus ou moins accusés. Au cours de la floraison elle peut entraîner une stérilité partielle ou totale. Au cours de la prématurité une déficience en eau peut diminuer le poids spécifique d'un grain.

2.3.3.1.4. Action du vent

Le vent détermine l'évapotranspiration : un vent léger accélère la transpiration. Trop fort, il entraîne la verse et cause des dommages sur les panicules au moment de l'épiaison. Il a aussi une action desséchante : si le vent est sec et froid, les plants jaunissent.

2.3.3.2. Besoins nutritionnels du riz au cours de son cycle

2.3.2.2.1. Notion de « source - puits »

L'interception des facteurs de croissance (rayonnement, CO₂, eau, éléments minéraux) constitue une source d'assimilats, qui à chaque instant, forme « l'offre disponible ». Une fonction de demande coexiste avec cette fonction, qui est issue de l'initiation de nouveaux organes pour assurer leur croissance et leur maintien. Durant la phase végétative, ces flux sont dirigés vers les organes en croissance à savoir les tiges et les feuilles. Durant la phase reproductive, les flux sont orientés vers les organes reproducteurs qui sont les panicules (IRRI, 1981).

2.3.3.2.2. Nutrition du riz

La nutrition permet la croissance du plant et le développement des organes végétatifs et reproductifs. La nutrition est constituée de deux phases : la nutrition à partir des réserves des graines et celle à partir des éléments nutritifs puisés dans le milieu environnant.

Nutrition à partir des réserves des graines

L'embryon puis le jeune plant se développent à partir des réserves des graines pendant les cinq premiers jours. En effet, l'assise protéique et les cotylédons utilisent les réserves au profit de l'embryon et engendrent les diastases (amylase, maltase, saccharase, catalase). Ces diastases agissent sur les réserves de grains pour les transformer en substances nutritives utilisées par la jeune plantule. L'O₂ intervient sur l'activité de la

catalase qui a un rôle dans le développement du plumule, de la radicule et dans la formation de la chlorophylle.

□ **Nutrition à partir des éléments nutritifs puisés dans le milieu environnant**

Le riz tire ses éléments nutritifs dans le sol et dans l'air par ses organes végétatifs verts. La nutrition peut provenir soit des éléments minéraux puisés dans le sol ou dans l'air, soit de l'O₂ absorbé au cours de la respiration, soit du CO₂ absorbé au cours de l'assimilation chlorophyllienne.

Nutrition du riz à partir des éléments minéraux puisés dans le sol ou dans l'air

Le riz se nourrit d'éléments minéraux qu'on peut classer en deux catégories : les éléments plastiques, qui forment plus de 99% de la matière vivante, et les oligo-éléments, qui constituent moins de 1% de la matière vivante. Le plant de riz puise ses éléments nutritifs dans le sol par ses racines ou dans l'air par ses organes végétatifs verts. Il faut respecter un équilibre entre l'alimentation carbonée par les feuilles et l'alimentation minérale par les racines pour obtenir un bon rendement. L'absence d'un élément dans le milieu se traduit par l'apparition de syndrome de carence, qui va se manifester par le ralentissement de la croissance et la diminution de la productivité (cf 2.2.1.4).

La respiration

La respiration est active jusqu'à 7 à 8 jours avant épiaison. Elle varie suivant la teneur en eau des cellules, la température (entre 20 et 25°C la respiration est constante ensuite elle décroît) et les organes végétatifs : la respiration est plus intense dans les gaines que dans les limbes.

L'assimilation du CO₂ et la photosynthèse

La plante synthétise ses hydrates de carbone et ses glucides en assimilant par photosynthèse le CO₂ de l'air. L'assimilation du CO₂ est fonction de la période de végétation (l'assimilation est maximum à l'épiaison), de l'intensité lumineuse et de la journée (l'assimilation est maximum entre 10 et 14 heures). Entre le stade plein tallage et l'épiaison, 70 à 80% des substances hydrocarbonées de la plante sont synthétisés. Si les CO₂ sont pratiquement inépuisables, les éléments minéraux du sol, en particulier le N, le P et le K sont soit exportés du sol par la récolte, soit lessivés et entraînés en profondeur hors de portée de la plante.

Tableau 5 : Exportation du riz en éléments fertilisants (kg) sur les Hautes terres Malgaches (source : J. VELLY IRAM, 1967)

Eléments	N	P2O5	K2O	CaO	MgO
Paddy (1T)	12.0	7.3	3	0.6	2.7
Paille (1 T)	5.5	2.5	25	3.0	4.0
total	17.5	9.8	28	3.6	6.7

2.3.4. CONCLUSION PARTIELLE

Le développement correspond au passage du riz par trois phases qui sont la phase végétative, la phase reproductrice et la maturation. Au cours de ces phases, des composantes participent l'une après l'autre à l'élaboration du rendement. La croissance correspond à l'augmentation de la quantité de matières sèches. Il y a trois schémas de croissance qui varient selon la variété, le milieu et les conditions de nutrition.

Une baisse de température à l'épiaison entraîne une augmentation du taux de stérilité. La lumière intervient dans l'assimilation du CO₂ et aussi dans diverses activités physiologiques. L'eau est un facteur indispensable, elle sert de véhicule aux éléments nutritifs et est indispensable à l'élaboration de la MSA. Pour que les facteurs de croissance soient bien captés et utilisés par les organes en croissance et aussi par les organes reproducteurs, il est indispensable d'éliminer les mauvaises herbes.

2.4. IMPACT DE LA NUTRITION AZOTEE SUR LA PHYSIOLOGIE DU RIZ

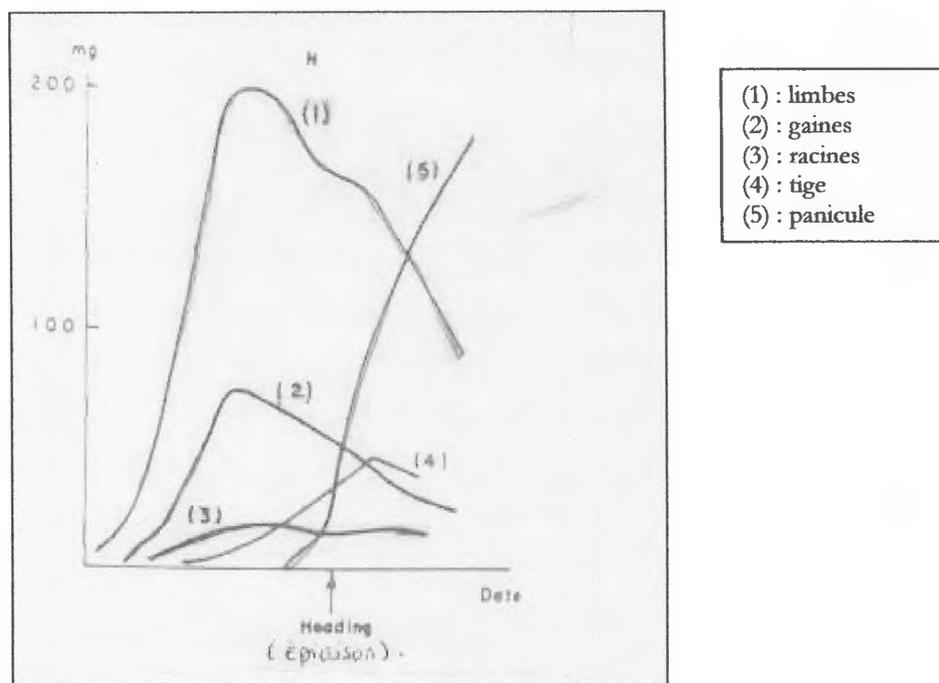
2.4.1. ROLE DE L'AZOTE

L'azote stimule l'activité photosynthétique. La quantité d'apport et la période d'apport de la fertilisation azotée est le principal précurseur de la qualité de grains. Une forte fumure minérale (plus de 90 kg d'azote) augmente le taux de protéines brutes aux dépens de la qualité. En effet, les protéines brutes sont riches en glutéline, mais la glutéline est pauvre en lysine (protéine nutritive). Un apport précoce effectué au cours de la phase végétative stimule l'activité photosynthétique. La quantité de matières glucidiques augmente ainsi que le rendement mais sans modifier la teneur en protéines des grains. Et un apport tardif (un peu avant, ou après la floraison) n'augmente pas le poids d'un grain mais l'enrichit au contraire en matières protéiques (IRRI, 1981).

2.4.2. PERIODES PROPICES AUX APPORTS D'AZOTE

L'azote est considéré comme un des facteurs déterminants du rendement. En se basant sur l'analyse de l'élaboration du rendement, il y a certaines périodes propices aux apports d'azote (Moreau, 1987). Un apport précoce d'azote au cours de la phase végétative et au moment du tallage intense, stimule l'activité photosynthétique. Un apport au moment de la différenciation du nœud basal de la panicule, au début de la phase reproductive, est bénéfique car il va augmenter le nombre d'épillets différenciés. Cet apport peut cependant avoir des effets indésirables, si le tallage continue après l'initiation de la panicule (type B) : il favorisera alors l'émergence de talles stériles. Un apport juste avant le stade critique de la division réductionnelle permet l'agrandissement de la taille de l'enveloppe des grains et de prévenir la dégénérescence des épillets. Un apport en pleine épiaison augmentera le % de grains pleins et favorisera le développement des caryopses (PG).

Figure 11 : Evolution de la quantité d'azote dans chaque organe
(source : TOGARI, 1972)



2.4.3. FACTEURS INFLUENCANT L'ABSORPTION DE L'AZOTE

L'absorption d'azote par le riz est en relation étroite avec le *potentiel de la variété*, qu'elle soit améliorée ou traditionnelle, tardive ou précoce, type *japonica* ou *indica*, et des *conditions du milieu* : avec une radiation élevée et une température maximale l'absorption de l'azote est intense. L'importance de la quantité d'azote absorbée est fonction de la quantité disponible dans le sol dépendante de la vitesse de minéralisation de l'azote organique.

2.4.4. CONCLUSION PARTIELLE

L'azote a une influence primordiale sur la croissance et le développement du riz. Il stimule l'activité photosynthétique, c'est le principal précurseur de la qualité des grains. Il y a certaines périodes propices aux apports d'azote : au moment du tallage intense, à la formation de la panicule, lors de l'épiaison et un apport tardif à la maturité. L'absorption de l'azote est aussi fonction du potentiel de la variété, de son stade de croissance et des conditions du milieu.

L'azote ammoniacal intervient durant la période végétative jusqu'à la montaison. Ainsi, il détermine une meilleure croissance, favorise le tallage, augmente la quantité de matière sèche produite (le rendement en paille est plus élevé), et augmente le nombre de panicules par pied. Tandis que l'azote nitrique intervient durant la phase reproductive : il favorise l'élongation et augmente le nombre de grains par panicules ainsi que le PMG.

2.5. OUTILS DE DIAGNOSTIC DE LA NUTRITION AZOTEE DES CULTURES (APPLICATION AU RIZ)

Pour connaître la fertilisation azotée adéquate à appliquer, il est nécessaire de connaître les disponibilités potentielles d'azote dans le sol, mais la plante peut elle-même donner des renseignements sur son état nutritionnel. Outre les conditions édaphiques, la concentration d'un élément dans la plante dépend de plusieurs facteurs internes tels que la date de mesure, l'âge de la plante et l'interaction entre éléments minéraux. Les méthodes de détermination des besoins nutritionnels de la plante sont l'examen de la végétation sur place ou diagnostic visuel, l'analyse de la plante et l'analyse du sol.

2.5.1. CARACTERISATION DE LA NUTRITION AZOTEE

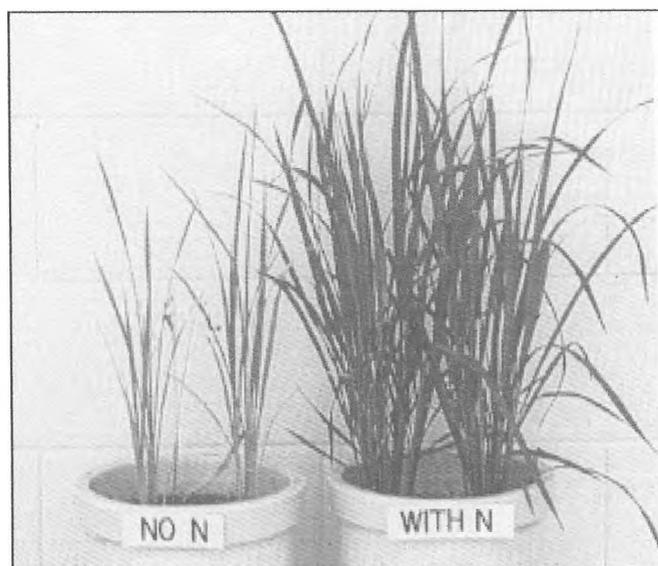
2.5.1.1. Diagnostic visuel de la végétation sur place

C'est la méthode la plus simple de détermination des besoins nutritionnels de la plante. La plante manifeste par des signes extérieurs l'existence d'un déséquilibre. Les feuilles présentent une teinte vert clair. Les pointes se colorent en brun rougeâtre puis en jaune pâle, après les feuilles flétrissent. Les nécroses progressent le long des bords des feuilles et couvrent progressivement la superficie totale. Si la carence en azote est précoce, les feuilles sont petites et étroites et les talles sont en nombre limités.

Cliché 4 : Parcelle de riz carencée en azote (source : INRA, 1979)



Cliché 5 : Pied de riz carencé en azote (source: INRA, 1979)



2.5.1.2. Indicateurs de stress fondés sur la biomasse ou le rendement

L'indicateur est estimé par comparaison de la matière sèche ou du rendement final du traitement témoin sans carence avec celui d'un traitement limité en éléments. L'indice de carence en cet élément est alors calculé de la façon suivante :

Indice de carence = MS ou Rdt du traitement limitant / MS ou Rdt du traitement non limitant

2.5.1.3. Analyse de la plante

L'hypothèse avance qu'il y a une relation entre la concentration des éléments nutritifs dans les différentes parties de la plante, les conditions de croissance et le rendement. La production de graines suppose qu'il y a une absorption élevée des éléments nutritifs. Donc avec un rendement élevé, le sol est de plus en plus déficitaire en certains éléments minéraux essentiels et cette déficience entraîne une diminution de la concentration des éléments dans la plante (graines, paille) (Moreau, 1984).

2.5.1.3.1. Teneur en nitrate

La teneur en NO_3^- se mesure dans la sève ou dans des extraits de tissus. Cette teneur en NO_3^- dans les tissus est un indicateur de l'azote présent dans la plante au moment de la mesure. Mais elle ne donne pas une précision sur une carence qui aurait lieu à un stade plus précoce de la croissance. On peut alors interpréter et dire que le NO_3^- est la principale forme absorbée par la plante en question.

2.5.1.3.2. Mesure de l'azote total

L'azote total des tissus peut être obtenu par la méthode Kjeldahl ou Dumas (cf Annexe 6). Cette analyse reflète la somme des effets en ce qui concerne le statut azoté pour une période de temps antérieure à la mesure, mais n'indique pas clairement le statut au moment donné de l'analyse. cette valeur indique un état à posteriori et non une évaluation des conditions actuelles.

2.5.1.4. Analyse du sol

L'analyse du sol est effectuée pour connaître l'aptitude du sol à fournir de l'azote aux cultures. L'analyse consiste à évaluer les réserves globales azotées du sol (dosage C total et N total) ainsi que les formes solubles et échangeables (dosage N minéral et N minéralisable).

2.5.2. INDICATEUR DE LA TENEUR EN CHLOROPHYLLE

2.5.2.1. Charte de couleur des feuilles (Leaf color chart ou Lcc)

L'une des méthodes d'évaluation du statut azoté de la culture se fait à partir d'une charte de couleur des feuilles. La note Lcc est attribuée en posant derrière le limbe une carte présentant une gamme de six couleurs numérotées de 1 à 6 et en retenant la couleur la plus proche de celle du limbe. C'est une mesure par réflectance qui prend en compte la perception globale de couleur produite par différents pigments du limbe à l'échelle de la carte. Elle est répétée 10 à 15 fois (Ramarolahy , 1999).

2.5.2.2. Chlorophyl meter

Le chlorophyl meter est un appareil qui permet d'estimer la quantité de chlorophylle dans la plante. C'est une méthode non destructive et aisée à effectuer qui peut fournir des informations instantanées. Le chlorophyl meter n'indique pas du tout la quantité d'engrais azotée à appliquer mais c'est seulement une façon d'évaluer et de gérer le statut azoté du riz, donc, il permet de savoir le moment opportun pour l'apport d'azote. Le Spad est l'unité utilisée pour cette estimation. La valeur Spad inférieure à 35 signifie un manque d'azote. Cependant, la valeur Spad peut être modifiée suivant des contextes diverses. Ainsi si pour deux parcelles, à niveaux de fumure différentes, la valeur Spad est la même, on peut attribuer l'identité des valeurs à une carence en un autre élément nutritif : le phosphore ou le potassium (Schaobing, 1995).

2.5.2.2.1. Mode d'utilisation

A partir de 28 JAS, jusqu'à la floraison, la mesure Spad sur le chlorophyl meter est pratiquée sur trois points du 1/3 médian du dernier limbe, du même côté de la nervure principale, et répétée vingt fois en choisissant toujours les limbes saines. Elle donne une évaluation par transmittance de la teneur du limbe en chlorophylle. La chlorophylle étant constituée de molécules d'azote.

2.5.2.2.2. Méthodes d'échantillonnage du Spad

Il faut une mesure tous les 2 ares c'est à dire : 20 mesures pour une superficie de 40 ares ou 40 mesures pour une superficie de 80 ares.

Les échantillons doivent être représentatifs : il faut prendre les feuilles qui ne sont pas bronzées ou qui ne présentent pas de lésions. Les lésions peuvent être causées par une blessure, la maladie de la tache brune est due par exemple à un flétrissement des gaines. Le bronzage des feuilles est du à une carence en phosphore. Toutes ces précautions sont prises afin d'avoir une feuille saine bien colorée, non altérée pour ne pas fausser la valeur spad indiquée par la chlorophyl meter.

Annexe 7: Définition et qualités d'un indicateur de nutrition azotée

Cliché 6 : Chlorophyl meter (Source : auteur, 2002)



2.5.3. CONCLUSION PARTIELLE

Pour connaître la fertilisation azotée à appliquer, il est nécessaire de connaître les disponibilités potentielles d'azote dans le sol, mais la plante peut elle-même donner des renseignements sur son état nutritionnel. Parmi les méthodes de détermination d'une carence dans la plante il y a : le diagnostic visuel, qui est la méthode la plus simple de détermination des besoins nutritionnels de la plante. Ensuite, il y a l'analyse de la plante, qui peut fournir soit la teneur en nitrate soit la teneur de l'azote total. L'analyse du sol est effectué par contre pour connaître l'aptitude du sol à fournir de l'azote aux cultures. Parmi les indicateurs de la teneur en chlorophylle, on utilise la charte de couleur des feuilles, qui est une mesure par reflectance, et le chlorophyl meter, un appareil, qui fournit des information instantanées et donne une évaluation par transmittance de la teneur du limbe en chlorophylle.

Tenant compte, de ces différentes remarques, voyons alors dans la troisième partie comment interpréter et analyser les résultats des expérimentations.

Troisième partie :
Objectifs de l'étude ;
matériels et méthodes utilisés

3.1. OBJECTIFS DE L'ETUDE

3.1.1. CHAMP GENERAL DE L'ETUDE

Cette étude est une composante d'un programme de recherche du PCP SCRID dont les objectifs sont d'analyser les effets des conditions de culture (sols-climats) et des techniques culturales (fertilisation, travail du sol...) sur le fonctionnement des peuplements végétaux pour identifier les facteurs limitant la production, et leurs modes d'action et de définir les caractères adaptatifs des variétés aux conditions et systèmes de culture.

3.1.2. PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE

Dans le cadre de cette étude nous nous intéressons à la **nutrition azotée**. En effet, l'azote est un des principaux facteurs qui contrôle le rendement. Ce facteur a déjà été largement étudié. Toutefois aucune étude n'a cherché à l'analyser de façon dynamique, c'est à dire tout au long du cycle cultural du riz, ni à utiliser un indicateur d'état de culture qui peut donner un pronostic sur l'état de nutrition azotée. Ce type d'indicateur peut se révéler utile pour évaluer la performance d'un système de culture testé ou pour piloter la fertilisation.

3.1.3. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Les objectifs principaux de cette étude sont de :

- Tester un indicateur du statut azoté de la culture : le *chlorophyl meter*.
- Mettre en relation un état de nutrition azotée du peuplement (en jouant sur la fertilisation et la densité de peuplement) avec l'élaboration du rendement.

3.1.4. METHODOLOGIES DE TRAVAIL

3.1.4.1. Limites de l'étude

Nous n'avons pas effectué des analyses du sol sur les sites d'expérimentation qui pourraient nous donner une idée sur l'évolution de la quantité d'azote du sol durant le cycle cultural. Nous avons effectué des mesures de l'azote total, mais pour ne pas fausser les résultats, ces mesures ne seront pas prises en compte. En effet, les échantillons étaient séchés au soleil, avant l'analyse au laboratoire, il y avait trop de perte en azote.

3.1.4.2. Bibliographie

Nous avons effectué des consultations d'ouvrages concernant le riz et la pratique de la riziculture pluviale. Des consultations sur internet ont été faites également. Les données

climatologiques sont relevées sur les stations cimel implantées sur les sites d'expérimentation.

3.1.4.3. Expérimentation

L'expérimentation a été conduite sur la ferme de KOBAMA à Andranomanelatra sur sol ferrallitique. Les mesures ont été effectuées durant six mois en suivant un calendrier bien établi qui respecte le cycle cultural du riz.

3.2. MATRIELS UTILISES

3.2.1. DISPOSITIF PRINCIPAL : LE SITE D'ANDRANOMANELATRA

3.2.1.1. But de l'essai

L'objectif de ces traitements de fertilisation et de densité est d'obtenir des conditions de nutrition fortement contrastées.

3.2.1.2. Mise en place du dispositif

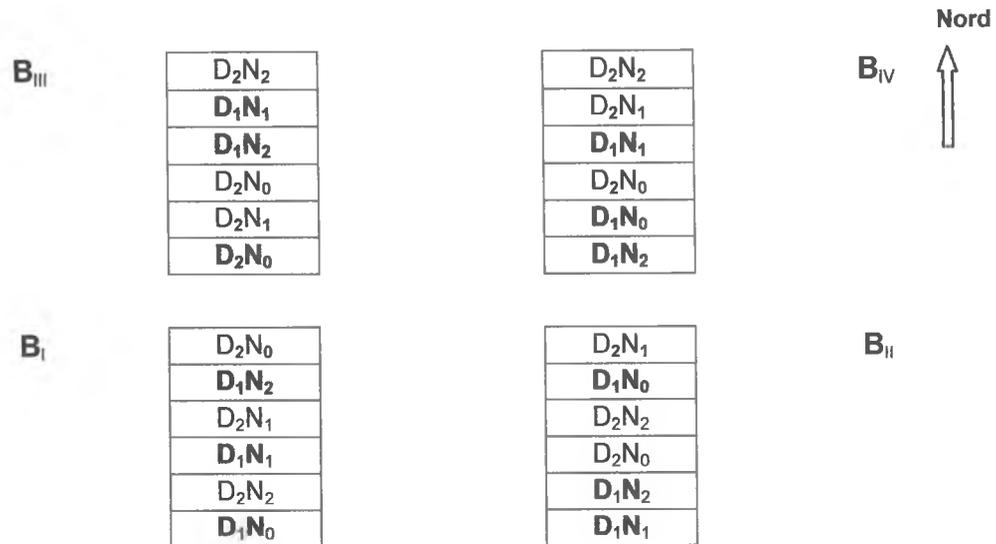
- Dispositif de blocs complets avec quatre répétitions.
- Semis en poquet avec deux densités du peuplement :
 - **D₁ (simple densité)** : 30cm x 20cm à 6 graines par poquet (100 plantes par m²).
 - **D₂ (double densité)** : 20cm x 20cm à 8 graines par poquet (200 plantes par m²).

Le semis en poquet permet une économie de semences et facilite le sarclage.

- 3 niveaux de fertilisation :
 - **N₀** : 5 T/ Ha de fumier à la levée
 - **N₁** : N₀ + 300 kg de NPK (11 22 16) + 500 kg/ Ha de dolomie à la levée
 - **N₂** : N₁ + 30u N à mi-tallage + 30u N à initiation paniculaire.

Mode d'épandage des engrais : épandage sur ligne. Chaque parcelle élémentaire est de forme rectangulaire et a une dimension de 6.70 m sur 7 m soit 46.90 m² chacune.

Figure 12 : Plan du dispositif expérimental (source : auteur)



Annexe 8 : Itinéraires techniques sur le dispositif principal

3.2.2. DISPOSITIFS COMPLEMENTAIRES

3.2.2.1. Objectif

Dans un objectif de diagnostic, nous avons cherché à comparer les résultats du dispositif principal avec ceux des autres dispositifs où la variété FOFIFA 154 que nous avons suivie était présente. Nous avons choisi trois sites : un autre terrain à Andranomanelatra, le site d'Ibity et le site d'Ivory. Sur ces sites deux modes de gestion du sol ont été testés : le labour et le semis direct sur couverture végétale.

3.2.2.2. Mise en place des sites

3.2.2.2.1. Sites d'Andranomanelatra et d'Ibity

Les sites d'Andranomanelatra et d'Ibity présentent les mêmes dispositifs. Le dispositif est en split-plot (gestion sol/ variété) avec quatre répétitions. Les traitements consistent en deux modes de gestion (labour - SCV sur résidu de crotalaire et soja) et six variétés (dont FOFIFA 154). La parcelle élémentaire est constituée de 22 lignes de 3 m chacune avec un écartement entre lignes de 0.30m et sur la ligne, entre poquets, de 0.20m soit 21 m². 5 graines sont semées par poquet.

3.2.2.2.2. Site d'Ivory

Le dispositif d'Ivory est en split-plot (gestion sol/ variété) avec quatre répétitions. Les traitements consistent en deux modes de gestion (labour - SCV sur résidu de muncuna) et cinq variétés (dont FOFIFA154). La parcelle élémentaire est constituée de 22 lignes de 6m (4.5m x 6m, écartement entre lignes et sur la ligne de 0.20m). 5 graines sont semées par poquet.

3.2.3. CARACTERISTIQUES DE LA VARIETE UTILISEE

La variété **FOFIFA 154** actuellement vulgarisée par la Recherche est utilisée lors de l'expérimentation.

- Origine : création locale, C30 (*latsibavy*) x Fofifa 62
- Cycle végétatif total moyen: 162 jours à 1500m
- Aptitude culturale : pluviale
- Caractéristiques variétales
 - Hauteur moyenne de la plante: 75cm
 - Port de la plante : érigé
 - Type de grains : long fin
 - Paddy : longueur : 9.4 mm, teinte jaune paille, barbu
 - Caryopse : longueur 7.43 mm, translucide
 - Caractéristiques agronomiques : résistante à la verse et à l'égrenage, tolérante à la pyriculariose, plus ou moins rustique, ne supporte pas une quantité élevée d'azote et très productive.
- Rendement en essais : 3.2 T/ Ha en moyenne et 6 T/ Ha au maximum.

Cliché 7 : Panicule de la variété FOFIFA 154 (source : auteur, 2003)



3.2.4. APPAREIL UTILISE

Nous avons utilisé comme indicateur de nutrition azotée le *chlorophyll meter* dont l'unité de mesure est le *Spad* (cf. 2.5.2.2.).

3.3. MESURES

3.3.1. MESURES DES COMPOSANTES DU RENDEMENT SUR LE DISPOSITIF PRINCIPAL

A l'intérieur de chaque parcelle des mesures sont effectuées pour connaître l'évolution des composantes de rendement et celle de la matière sèche aérienne. Pour suivre ces évolutions, un échantillon constitué de deux placettes, à quatre poquets successifs chacune, est prélevé au hasard sur chaque parcelle tous les 10 jours. Ces échantillons seront séchés à l'étuve pendant 48 heures à 60 °C pour avoir la matière sèche totale aérienne.

La décomposition du rendement en grain en plusieurs composantes permet de suivre la façon dont il s'élabore.

$$\text{Rendement grain} = \text{nombre de plants} / \text{m}^2 \times \text{nombre de panicules} / \text{plant} \times \text{nombre d'}$$
$$\text{épillets par panicule} \times \% \text{ Grains Pleins} \times \text{poids de mille grains}$$

Chacune des variables est mesurée au cours du cycle cultural.

3.3.1.1. Mesures effectuées durant la phase végétative du riz

Durant la phase végétative, le riz fait ses feuilles et ses tiges. Sur chaque échantillon, on a effectué le comptage du nombre de plants, pour avoir le *nombre de plants par m²*, et le comptage du nombre de talles par plante. Les données sur la dynamique de tallage sont ainsi obtenues.

3.3.1.2. Mesures effectuées durant la phase reproductive du riz

Durant la phase reproductive le riz fait ses panicules. Outre les deux comptages cités plus haut, on a procédé au comptage et du nombre de talles fertiles, pour connaître le *nombre de panicules par plante*, et du nombre de panicules saines et attaquées.

3.3.1.3. Mesures effectuées à la récolte

A la récolte, il y a les comptages du nombre de plants, du nombre de talles par plante et du nombre de panicules. Dans l'échantillon 20 panicules sont prélevées au hasard. Les grains pleins et les grains vides de chaque panicule sont comptés séparément. A partir de ces comptages, on obtient le nombre de grains total ou *nombre d'épillets par panicule* et le taux de fécondation-remplissage ou *pourcentage de grains pleins*. Ces grains seront pesés, on obtient à la fin le *rendement placette*. Ensuite, sur chaque parcelle, les plants de riz sont coupés à la base avec une faucille, puis battus avec une batteuse. La totalité des grains est pesée avec une balance pour avoir le poids de matières fraîches. On prend une

poignée qui sera séchée (48 heures à 60 °C dans l'étuve) puis pesée pour avoir le poids de matières sèches. On obtient ainsi le *rendement parcelle*. Le rendement placette est une valeur surestimée par rapport au rendement parcelle car dans les placettes choisies il n'y a pas de poquets manquants.

La totalité des pailles est pesée avec un peson pour avoir le poids de matières fraîches. On prend une botte de paille qui sera séchée (48 heures à 60 °C dans l'étuve) puis pesée pour avoir le poids de matières sèches. Le reste des pailles est remis sur les parcelles.

3.3.2. MESURES SUR LES DISPOSITIFS COMPLEMENTAIRES

Sur les deux sites, Andranomanelatra et Ibity, on a effectué un suivi au Spad tous les 15 jours (moyenne de 20 mesures sur 2 placettes de 4 poquets consécutifs par parcelle sur 4 blocs). A Ivory, seulement deux mesures ont pu être réalisées (à 36 et 64 JAS). Sur les échantillons prélevés seront comptés le nombre de plantes et de talles. Ces échantillons sont mis dans l'étuve pendant 48 heures à 60 °C pour avoir la matière sèche totale aérienne. Sur ces mêmes échantillons seront comptés le nombre de plantes, de talles et de panicules (composantes du rendement : *nombre de plantes par m², nombre de panicules par plante*). Ces échantillons sont séchés pour avoir la matière sèche totale aérienne. Sur un sous échantillon de 20 panicules en moyenne on compte le nombre de grains total (*nombre d'épillets par panicule*) : grains pleins et vides (détermination du *pourcentage de grains pleins*). Ces grains sont séchés (48 heures à 60 °C dans l'étuve) et pesés (*poids de 1000 grains*).

3.4. CONCLUSION PARTIELLE

Afin d'obtenir des conditions de nutrition fortement contrastées, nous avons combiné deux densités (simple densité et double densité) avec trois niveaux de fumure (N_0 avec seulement du fumier, N_1 avec du fumier, de l' NPK et de la dolomie et N_2 avec du fumier, de l' NPK, de la dolomie et en plus de l'urée). La variété utilisée est la FOFIFA 154. Les mesures sont effectuées tous les 10 jours. Nous avons suivi l'évolution de la matière sèche aérienne et de la teneur en azote et en parallèle, nous avons suivi les composantes du rendement. Dans un objectif de diagnostic, nous avons choisi trois autres sites complémentaires qui sont représentatifs de la région d'Antsirabe, où la variété FOFIFA 154 que nous avons suivie était présente.

Quatrième partie :
Interprétations et synthèses
des résultats

4.1 RESULTATS SUR LE DISPOSITIF PRINCIPAL

4.1.1. EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LE STATUT AZOTE DU PEUPELEMENT (mesuré par le SPAD)

- **Figures 13 et 14 : Evolution des valeurs SPAD en jours après semis jusqu'à la floraison, par traitements de densité (simple densité D_1 , double densité D_2) et de fumure**

Figure 13

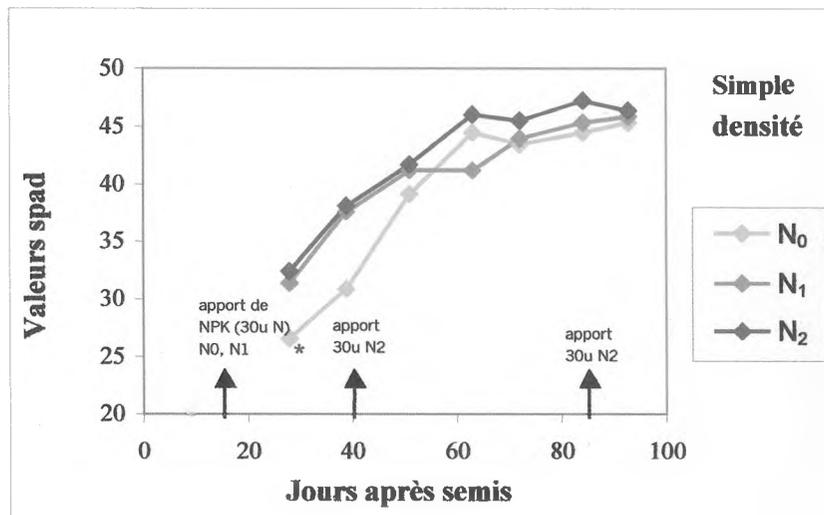
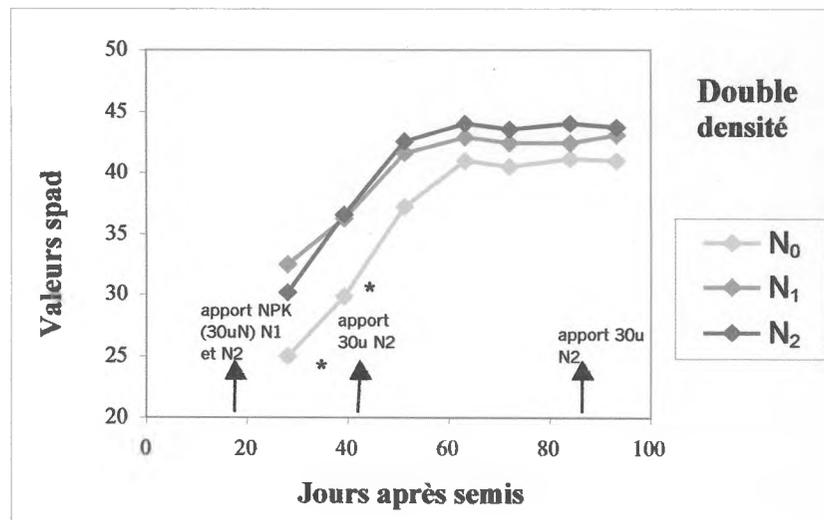


Figure 14



* : indique une différence significative au seuil de 5 %.

Les flèches sur la figure indiquent les apports successifs de N_0 , N_1 et N_2 tels que :

N_0 : fumier 5 T/ Ha à la levée.

N_1 : fumier + 300Kg / Ha NPK (11 22 16) à la levée,

N_2 : fumier + 300Kg / Ha NPK (11 22 16) à la levée + 2 x 60 Kg / Ha d'urée à 39 et 84 JAS)

Chaque point est la moyenne de quatre répétitions (moyenne sur 20 mesures par répétition).

D'après les figures 13 et 14 :

Les valeurs Spad sont plus faibles avec le traitement N₀ pour les deux densités, avec un minimum pour D₂N₀. N₂ et N₁ ont des valeurs Spad presque identiques ; le dernier apport d'urée pour N₂ n'a pas entraîné une augmentation de la valeur Spad. D₁N₂ a les valeurs Spad les plus élevées. A partir de 70 JAS, il n'y a aucune différence entre D₂N₁, D₂N₀ et D₁N₁, D₁N₀.

□ **Tableau 6 : Effets des traitements sur les valeurs SPAD jusqu'à la floraison (en Jours Après Semis)**

TRAITEMENTS	Modalités	Valeurs SPAD à 28 JAS	Valeurs SPAD à 39 JAS	Valeurs SPAD à 51 JAS	Valeurs SPAD à 63 JAS	Valeurs SPAD à 72 JAS	Valeurs SPAD à 84 JAS	Valeurs SPAD à 93 JAS
Densité	D₁	30,1 a	35,5 a	40,7 a	43,9 a	44,4 a	45,7 a	45,9 a
	D₂	29,2 a*	34,2 a	40,5 a	42,6 a	42,1 a	42,5 b	42,6 b
Fumure	N₀	25,8 b	30,4 b	38,1 b	42,7 b	42,0 a	42,8 b	43,1 a
	N₁	31,9 a	36,9 a	41,4 a	42,1 b	43,1 a	43,8 b	44,5 a
	N₂	31,3 a	37,3 a	42,2 a	45,0 a	44,5 a	45,6 a	45,1 a

Entre les modalités de traitement, les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

Les chiffres en gras indiquent toujours une différence significative entre les traitements.

D'après le tableau 6 :

Jusqu'à 72 JAS, les valeurs Spad sont presque identiques pour les deux densités. Mais à partir de 84 JAS jusqu'à 93 JAS, il y a une différence significative entre les deux densités, à l'avantage de D₁.

L'effet de la fumure sur les valeurs Spad se voit dès le début : N₀ a les valeurs les plus faibles. Généralement, la mesure au Spad augmente avec l'apport d'azote. Entre N₁ et N₂ il n'y a pas de différence significative. Les apports en surplus d'azote pour N₂ se traduisent par une augmentation de la valeur Spad vers 63-84 JAS. A la fin, au bout de 93 JAS nous ne retrouvons plus ces différences.

4.1.2. EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LA CROISSANCE DU PEUPEMENT (Evolution de la matière sèche aérienne en fonction des traitements)

- Les dynamiques d'évolution de la matière sèche aérienne du semis à la récolte ont été reconstituées à partir des prélèvements destructifs.

Les régressions ont été réalisées sur le logiciel *SigmaPlot 4.0* pour Windows (*Jandel Scientific*). L'estimation des paramètres est réalisée selon une procédure itérative. Le logiciel recherche les valeurs des paramètres qui minimisent la somme des carrés des écarts entre valeurs observées et prédites de la variable dépendante.

Un modèle logistique a été utilisé pour paramétrer les relations masse sèche en fonction des jours après semis(cf. annexe 9a) :

$$y = A / (1 + (x/x_0)^B)$$

Avec : y la masse sèche, x le temps en jours après semis, A l'asymptote supérieure, x_0 l'abscisse du point d'inflexion, et B un paramètre lié à la pente au point d'inflexion.

Figures 15 et 16 : Evolution de la matière sèche aérienne par plante en jours après semis jusqu'à la récolte, par traitements de densité et de fumure

Figure 15

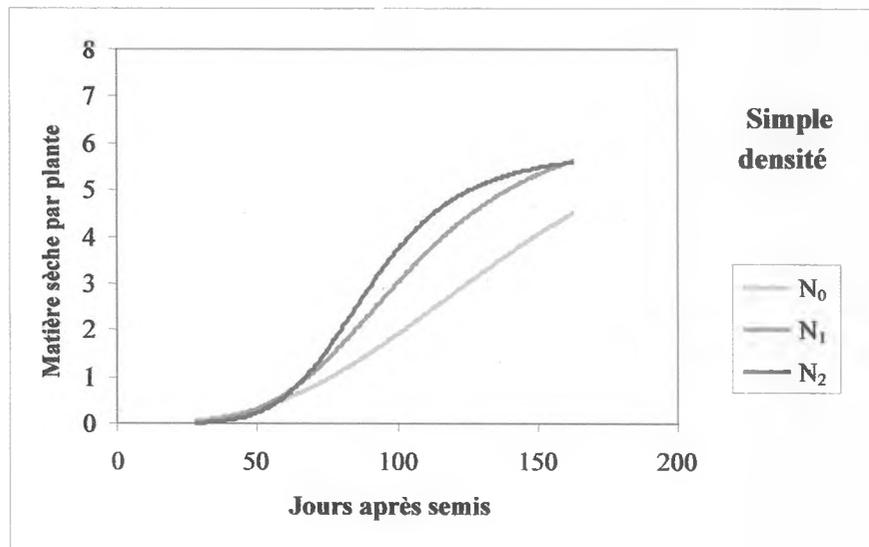
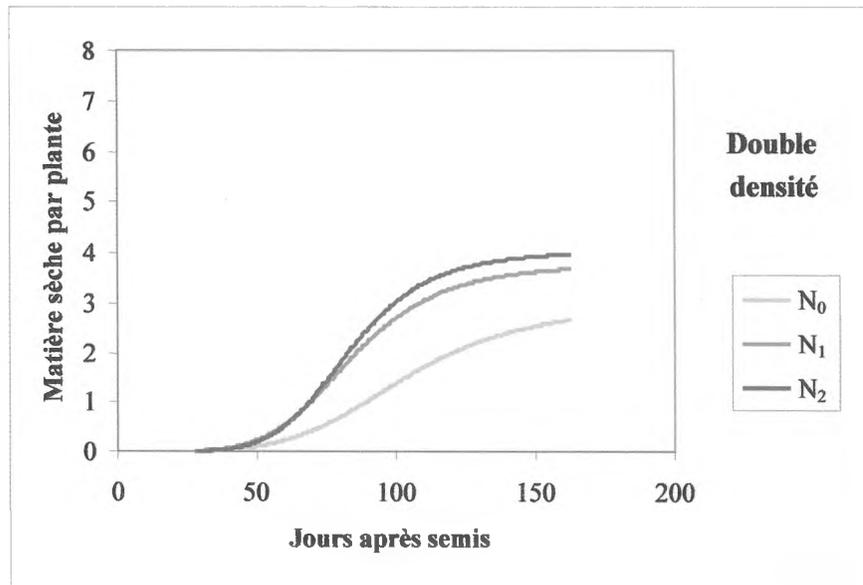


Figure 16



D'après les figures 15 et 16 :

La courbe avec N_0 pour les deux densités est inférieure par rapport aux autres courbes. D_1N_1 et D_1N_2 ont des dynamiques différentes mais à la fin ils ont les mêmes quantités de MSA. D_2N_1 et D_2N_2 ont presque la même quantité de MSA. D_2N_2 a la quantité de MSA la plus élevée et celle de D_1N_0 est la plus faible.

- Le taux de croissance par plante est calculé à partir des courbes d'évolution de la matière sèche aérienne par plante.

Figures 17 et 18 : Taux de croissance par plante en jours après semis jusqu'à récolte, par traitements de densité et de fumure

Figure 17

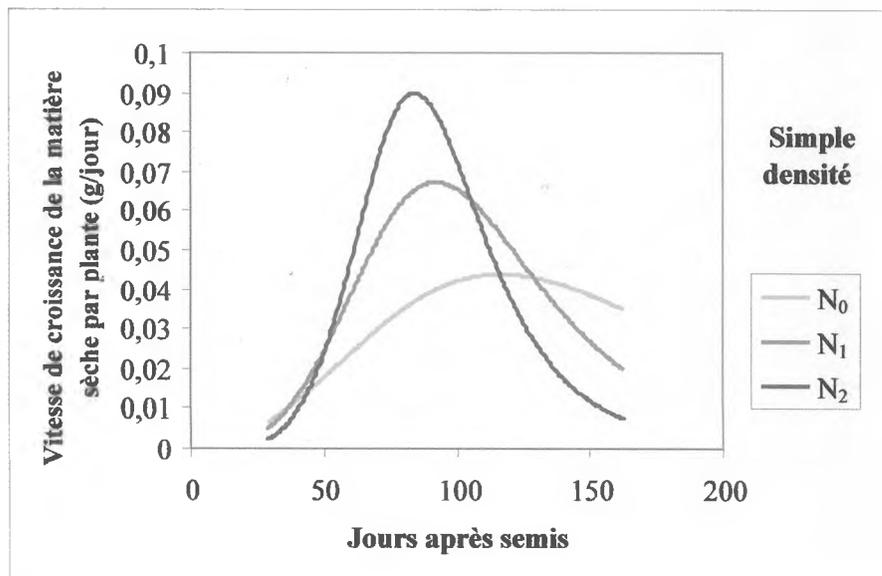
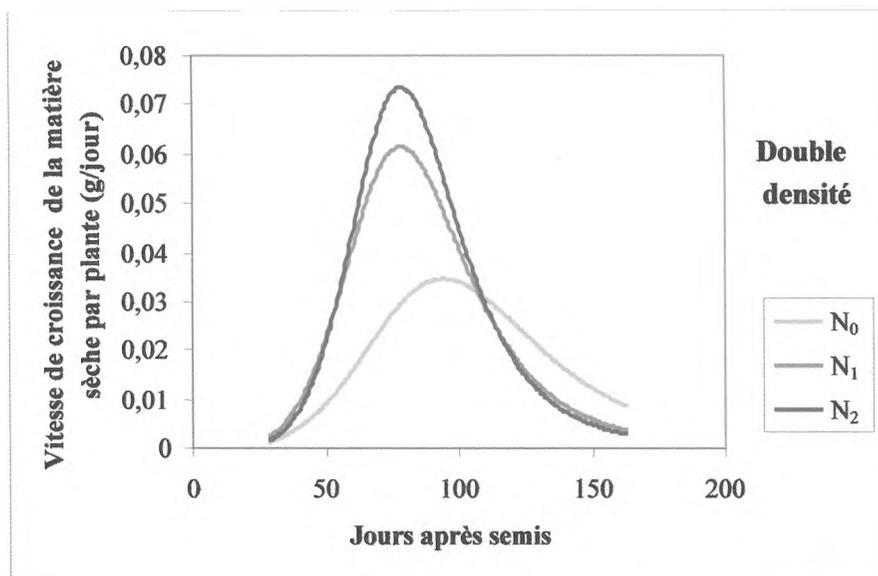


Figure 18



Le pic correspond à la vitesse de croissance la plus élevée (phase exponentielle de croissance).

D'après les figures 17 et 18 :

N₀ pour les deux densités a un pic de croissance plus faible et une croissance allongée (vitesse de croissance qui décroît plus lentement) donc N₀ est plus tardif par rapport à N₁ et N₂. D₁N₁ par rapport à D₁N₂ a un taux de croissance plus faible mais aussi une croissance qui est maintenue plus longtemps. L'arrêt de croissance ne se fait pas de façon abrupte (vers 150 JAS). D₁N₂ a un pic de croissance maximale à 0,09g/jour.

D₂N₁ et D₂N₂ ont chacun une vitesse de croissance rapide mais qui décroît vite également. Pour D₂N₁, D₂N₂, D₁N₁ et D₁N₂ la croissance démarre vers 80 JAS, développement exponentiel de 80 à 110 JAS, la valeur seuil est atteinte à partir de 110JAS.

□ **Tableau 7 : Effets des traitements sur la matière sèche aérienne (MSA en g par plante)**

TRAITEMENTS	Modalités	MSA à 39 JAS	MSA à 63 JAS	MSA à 84 JAS	MSA à 112 JAS Floraison	MSA à 163 JAS Récolte
Densité	D₁	0,121 a	0,664 a	1,709 a	4,552 a	5,586 a
	D₂	0,097 a*	0,557 a	1,376 a	3,392 b	3,715 b
Fumure	N₀	0,063 b	0,389 b	0,896 b	2,647 b	3,755 b
	N₁	0,126 a	0,761 a	1,744 a	4,509 a	5,037 a
	N₂	0,137 a	0,681 a	1,988 a	4,762 a	5,159 a

* Entre modalités de traitement, les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

L'analyse statistique montre que :

Il n'y a pas de différence significative entre les deux densités sauf à partir de 112 JAS jusqu'à la récolte : la quantité de MSA est plus élevée avec D_1 à la floraison et à la récolte. C'est avec N_0 que nous avons la moindre quantité de MSA, avec N_2 , la plus forte fumure, la quantité de matières sèches aériennes produite est la plus élevée. Cette différence entre les niveaux de fumure se voit à la récolte.

SYNTHESE DES RESULTATS

Relation entre la matière sèche aérienne produite et la densité

En simple densité, il y a moins de compétition entre les plantes vis à vis des ressources, ce qui induit une production de matière sèche par plante plus élevée (cf. tableau 7). Les différences entre traitements de densité apparaissent surtout à partir de la floraison, car c'est à cette période que la couverture foliaire est maximale, et la concurrence entre plantes la plus forte.

Relation entre la matière sèche aérienne produite et la fertilisation

L'azote a une influence sur la croissance de la plante. L'augmentation de matière sèche produite est importante lorsque l'on passe du fumier seul (N_0) à un apport de 30 unités d'azote (N_1) (cf. figures 15 et 16). Par contre peu d'effets sont observés lorsqu'on rajoute plus d'azote, dans notre cas 90 unités d'azote (N_2).

Types de croissance des différents traitements

D'après la bibliographie (les différents type de croissance, chapitre 2.3.1.2 p. 37) on peut classer nos traitements :

- en double densité, N_2 et N_1 ont une croissance vigoureuse au départ puis faible en fin de cycle, ils se rapprochent du type I. N_0 correspond au type IV : la croissance est lente et continue. Les conditions de nutrition sont insuffisantes.
- En simple densité, N_2 se rapproche du type I, mais avec une croissance plus importante qu'en forte densité. N_1 se rapproche du type II : la croissance est modérée durant tout le cycle. N_0 correspond au type III : la croissance est lente au départ puis forte. La croissance végétative est prolongée et induit un retard (cf. figures 15 et 16).

4.1.3. EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LE DEVELOPPEMENT DU RIZ

4.1.3.1. Evolution du tallage en fonction des traitements

- Un modèle log-normal a été utilisé pour paramétrer les relations tallage en fonction des jours après semis (cf. annexe 9b):

$$y = A e^{-0.5 (\ln (x/x_0)/B)^2}$$

Avec : y la masse sèche, x le temps en jours après semis, A l'asymptote supérieure, x_0 l'abscisse du maximum de la courbe, et B la valeur absolue de l'abscisse des deux points d'inflexion.

Figures 19 et 20 : Evolution du tallage par plante en jours après semis jusqu'à récolte, par traitements de densité et de fumure

Figure 19

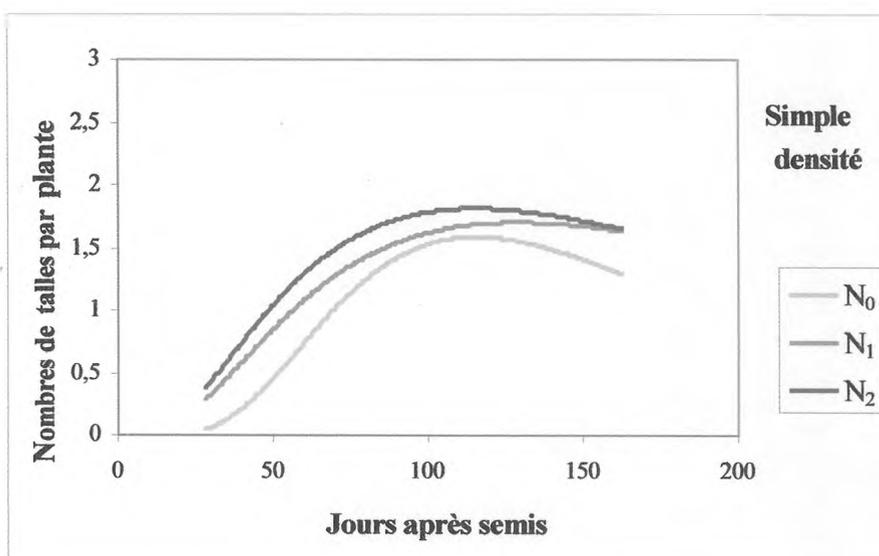
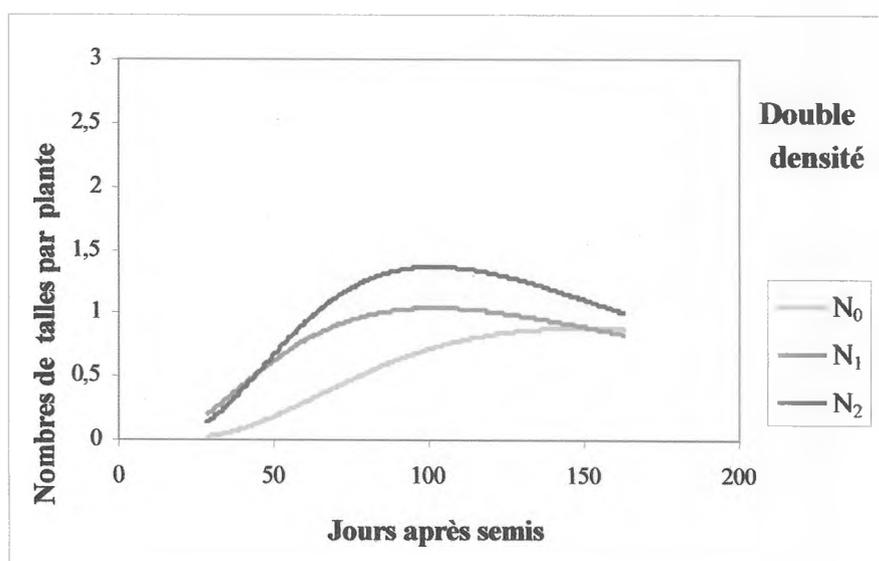


Figure 20



Les figures 19 et 20 présentent les courbes d'évolutions du tallage par densité, on observe que :

Plus de talles sont formées en simple densité, avec un nombre de talles maximal vers 115 JAS pour l'ensemble des traitements de fertilisation, c'est toutefois le traitement N_2 qui présente la valeur la plus élevée qui est de 1,8 talles par plante. N_0 présente en fin de cycle plus de régression que N_1 et N_2 . Le nombre de talles par plante à récolte est similaire pour N_1 et N_2 .

En double densité, le nombre de talles maximum se situe vers 100 JAS pour N_1 et N_2 , et une régression de talles est observée en fin de cycle. Pour N_0 , le nombre de talles maximal est observé en fin de cycle.

□ **Figures 21 et 22 : Taux de tallage par plante en jours après semis jusqu'à la récolte par traitements de densité et de fumure**

Figure 21

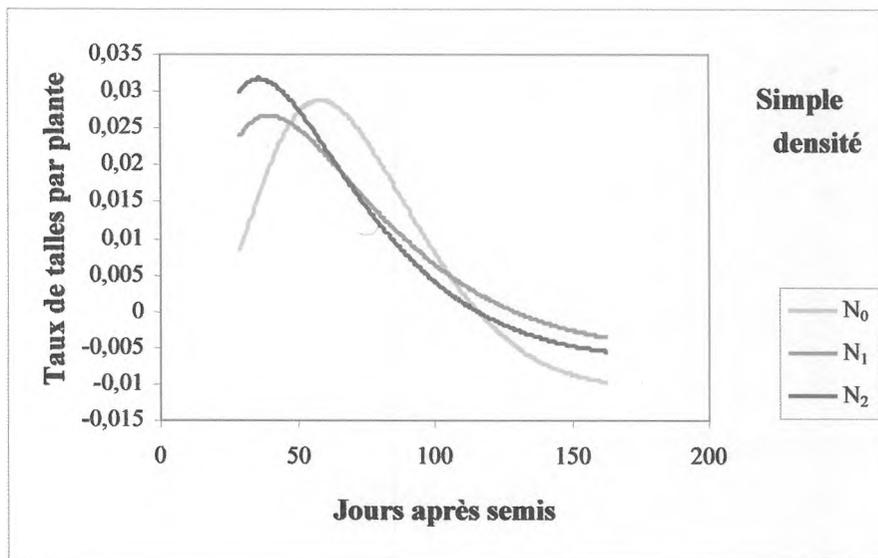
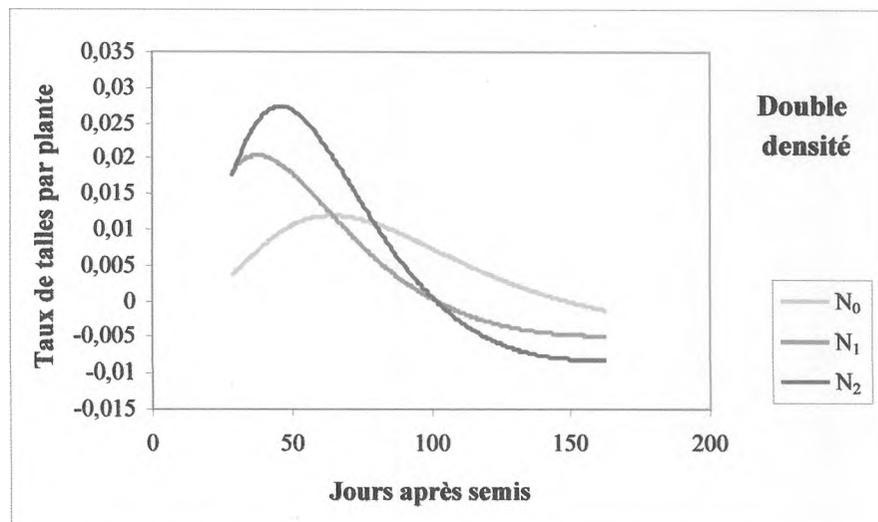


Figure 22



Les figures 21 et 22 présentent les taux de tallage par plante en fonction de la fertilisation pour les deux densités. Un taux au dessous de 0 correspond à une régression des talles.

Le traitement N₀ pour les densités présente un retard dans le pic de tallage, mais celui-ci est plus élevé en simple densité qu'en double densité. Une faible fertilisation retarde le tallage, mais en plus en double densité le taux est réduit.

Les traitements N₁ et N₂ sont peu différents en simple densité, par contre en double densité, N₂ présente un pic de tallage nettement plus élevé, mais également un taux de régression plus élevé que N₁ en fin de cycle. La fertilisation a permis un développement végétatif plus important (nombre de talles maximal plus élevé pour N₂) mais la compétition entre plantes pour d'autres facteurs que l'azote (principalement pour la lumière) a induit une régression de talles plus importante pour N₂.

□ **Tableau 8 : Effets des traitements sur le tallage par plante**

TRAITEMENTS	Modalités	Nombre de talles à 39 JAS	Nombre de talles à 63 JAS	Nombre de talles à 84 JAS	Nombre de talles à 112 JAS Floraison	Nombre de talles à 163 JAS Récolte
Densité	D ₁	1,46 a	2,14 a	2,45 a	2,84 a	2,58 a
	D ₂	1,22 b*	1,77 b	1,90 b	2,03 b	1,93 b
Fumure	N ₀	1,02 b	1,60 b	1,80 b	2,15 b	2,11 a
	N ₁	1,46 a	2,18 a	2,22 ab	2,45 ab	2,33 a
	N ₂	1,53 a	2,10 a	2,51 a	2,70 a	2,33 a

* Entre modalités de traitement, les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

L'analyse statistique (cf. tableau 8) confirme les observations des figures 19,20,21 et 22 en effet, il y a plus de talles pour D₁ que pour D₂ (effet de la compétition entre plantes). Sur le traitement fumure : il y a moins de talles avec N₀ et plus de talles avec N₁ et N₂. Nous ne retrouvons plus de différence à la récolte.

4.1.3.2. Tallage fertile

- *Figures 23 et 24 : Evolution du nombre de panicules par plante en jours après semis jusqu'à la récolte, par traitements de densité et de fumure*

Figure 23

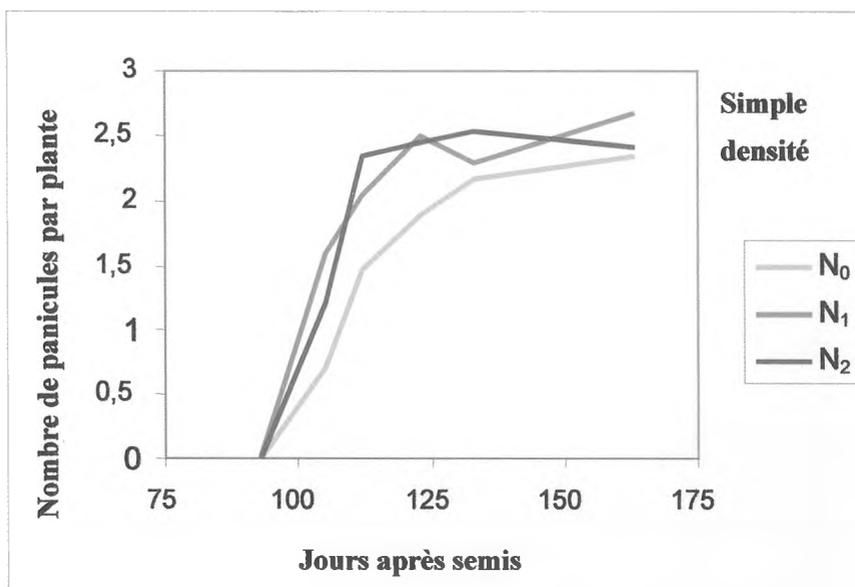
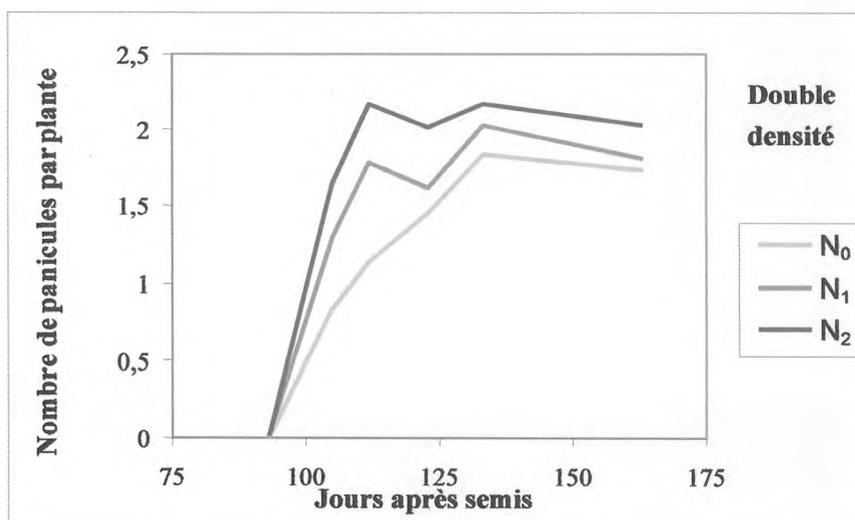


Figure 24



Les figures 23 et 24 présentent l'évolution du nombre de panicules par plante en jours après semis jusqu'à récolte en fonction de la fertilisation pour les deux densités.

Les premières panicules apparaissent vers 90 JAS. Le traitement N₀ pour les 2 densités présente un retard de mise en place des panicules, qui se traduit par un nombre de panicules par plante plus faible que pour N₁ et N₂ entre environ 105 et 125 JAS, ces observations sont en relation avec le tallage. Il n'apparaît pas de différence entre N₁ et N₂ en simple densité, par contre en double densité, N₂ présente des valeurs supérieures. Ces observations sont également en relation avec le tallage (cf. figure 19 et 20).

□ **Tableau 9 : Effets des traitements sur le tallage fertile par plante**

TRAITEMENTS	modalités	Nombre de panicules à 93 JAS	Nombre de panicules à 105 JAS	Nombre de panicules à 112 JAS	Nombre de panicules à 123 JAS	Nombre de panicules à 133 JAS	Nombre de panicules à 163 JAS
Densité	D₁	0,003 a	1,17 a	1,95 a	2,27 a	2,33 a	2,47 a
	D₂	0,01 a*	1,26 a	1,70 a	1,69 b	2,01 b	1,86 b
Fumure	N₀	0 a	0,77 b	1,30 b	1,67 b	2,00 b	2,04 a
	N₁	0,013 a	1,44 a	1,91 a	2,06 a	2,16 ab	2,24 a
	N₂	0,009 a	1,43 a	2,26 a	2,23 a	2,35 a	2,22 a

* Entre modalités de traitement, les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

L'analyse statistique (cf. tableau 9) montre que :

C'est avec D₁ qu'il y a le plus de panicules à partir de 123 JAS jusqu'à la récolte. C'est avec N₀ que le nombre de panicules est le plus faible. Au bout d'un certain temps, il y a une différence entre N₁ et N₂ (vers 133 JAS) mais elle ne se retrouve pas à la fin.

SYNTHESE DES RESULTATS

Relation entre la formation de talles et la densité.

La densité influe sur le nombre de talles par plante : en effet, plus la densité est élevée (simple densité) et plus l'espace vitale utile à la croissance des plants est réduit. Un nombre de talles par plante inférieur est observé en double densité par rapport à la simple densité, tout au long du cycle (cf. tableau 8). L'arrêt de développement des talles est également plus précoce (nombre de talles maximal atteint à 100 JAS en double densité, contre 115 JAS en simple densité, cf. figure 19 et 20).

Relation entre la formation des talles et la fertilisation.

L'azote contribue à la formation des talles. En effet, plus il y a d'azote, plus il y a de talles, mais ensuite ce nombre régresse parce que la plante n'a pas pu nourrir toutes les talles (compétition entre talles au sein d'une plante). Ainsi, à récolte, on ne retrouve plus de différence entre traitement de fertilisation (cf. tableau 8).

4.1.4. EFFETS SUR LES COMPOSANTES DU RENDEMENT

Tableau 10 : Effets des traitements sur les composantes du rendement

TRAITEMENTS	modalités	Nombre plantes/ m ²	Nombre panicules /plante	Nombre épillets/ panicule	% grains pleins	Poids 1000 grains	RDT placette (t/ ha)	RDT Parcelle (t/ ha)
Densité	D ₁	101,4 b	2,47 a	69,9 a	82,7 a	30,2 a	3,26 a	2,48 b
	D ₂	179,9 a*	1,86 b	66,1 a	81,2 a	29,1 a	3,76 a	3,05 a
Fumure	N ₀	142,1 a	2,04 a	59,9 b	82,5 a	30,2 a	2,84 b	2,04 b
	N ₁	141,9 a	2,24 a	71,4 a	80,7 a	30,4 a	3,80 a	3,05 a
	N ₂	138,0 a	2,22 a	72,7 a	82,7 a	28,4 a	3,90 a	3,22 a

* Entre modalités de traitement, les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

• **Au niveau traitement de densité**

Pour D₁, il y a moins de plants par m², cette composante est compensée par un nombre de panicules par plante plus élevé, mais qui ne suffit pas à assurer le même niveau de rendement. Avec D₂, le nombre de plants par m² est le plus élevé. Même si le nombre de panicules est plus faible, c'est avec D₂ que le rendement est le plus élevé. Il y a une différence de presque 1.5 T entre les deux densités.

☆ Le nombre de plants/ m² et le nombre de panicules par plante sont inversement proportionnels. Plus le nombre de plants par m² est élevé moins il y a de panicules par plante (avec D₂ il y a 1.86 panicules par plante, avec D₁ : 2.47 panicules par plante).

• **Au niveau traitement de fumure**

N₀ a le nombre d'épillets le plus faible (59.9) et aussi le rendement le plus faible (2.04T par Ha). Il apparaît donc que c'est cette composante qui est la plus influencée par le traitement fumure, et qui détermine le rendement.

N₁ et N₂ sont à peu près identiques, mais avec N₂ il y a plus d'épillets (72.7) et le rendement est aussi élevé (3.22 T par Ha).

Synthèse des résultats

Effet de la densité sur les composantes du rendement

La densité a un effet principal sur le tallage (cf. ci-dessus et tableau 10). A l'échelle de la parcelle, les différences de rendement (3,05 t/ha en forte densité contre 2,48 t/ha en faible densité) sont dues à la différence du nombre de plantes par m². En simple densité,

plus de talles sont produites par plante mais cela ne suffit pas pour compenser un nombre de plants par m² faible.

Effet de la fertilisation sur les composantes du rendement

La fertilisation a un effet sur le nombre de grains. En effet, la seule composante réduite expliquant la réduction du rendement du traitement N₀ est le nombre d'épillets par panicule (cf. tableau 10 : N₀ = 59,9 et N₁ = 71,4, N₂ = 72,7). On observe un effet sur le tallage, plus de talles sont produites au cours du cycle, mais également est observé plus de régression de talles, ce qui conduit à un nombre similaire entre modalité à récolte. Il n'y a pas de différence de rendement entre N₁ et N₂, l'apport d'azote supplémentaire ne se justifie pas.

4.2. RESULTATS SUR LES DISPOSITIFS COMPLEMENTAIRES

4.2.1. EVOLUTION DES VALEURS SPAD POUR LES TROIS SITES

Tableau 11 a-b-c : Comparaison des valeurs SPAD jusqu'à floraison par modes de gestion du sol pour chaque site d'expérimentation

a- Site d'Andranomanelatra

Mode de gestion du sol	Valeurs SPAD à 36 JAS	Valeurs SPAD à 51 JAS	Valeurs SPAD à 64 JAS	Valeurs SPAD à 78 JAS	Valeurs SPAD à 92 JAS	Valeurs SPAD à 106 JAS
SCV	30,91 a*	37,34 a	40,37 a	42,12 a	42,87 a	41,51 a
Labour	32,19 a	38,73 a	40,16 a	42,10 a	42,91 a	42,09 a

b- Site d'Ibity

Mode de gestion du sol	Valeurs SPAD à 35 JAS	Valeurs SPAD à 48 JAS	Valeurs SPAD à 62 JAS	Valeurs SPAD à 76 JAS	Valeurs SPAD à 89 JAS
SCV	34,02 a	37,87 b	41,51 a	41,63 a	39,77 a
Labour	35,05 a	40,68 a	40,47 a	38,37 b	37,46 b

c- Site d'Ivory

Mode de gestion du sol	Valeurs SPAD à 36 JAS	Valeurs SPAD à 64 JAS
SCV	24,20 b	42,80 a
Labour	35,60 a	46,05 a

* Entre modes de gestion du sol, les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%

D'après ces tableaux :

A Andranomanelatra, il n'y a pas de différence significative entre les valeurs Spad. A Ibity, qui a un sol de faible fertilité, en début de cycle les valeurs Spad sont plus élevées avec le labour. A Ivory, nous manquons de données mais au début la valeur Spad est défavorable au SCV. Le même phénomène qu'à Ibity a pu intervenir.

4.2.2. EVOLUTION DU NOMBRE DE TALLES PAR PLANTE POUR LES TROIS SITES

Tableau 12 : Composantes du tallage par plante par site et par modes de gestion du sol

SITES	Mode de gestion du sol	Nombre de talles par plante à 30-35 JAS	Nombre de talles par plante à 65- 75 JAS	Nombre de talles par plante Floraison	Nombre de talles par plante Récolte
Andrano		1,60 a*	3,84 a	4,19 a	3,67 a
Ibity		1,64 a	3,08 a	4,96 a	3,22 a
Ivory		1,31 a	2,08 b	2,64 b	2,52 b
	SCV	1,53 a	3,46 a	4,80 a	3,56 a
	Labour	1,58 a	2,67 b	3,58 b	2,95 b

* Entre modalités de traitement, les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

D'après ce tableau : il y a plus de talles par plante à Andranomanelatra et à Ibity et moins de talles à Ivory. Il y a plus de talles par plante aussi avec le SCV.

4.2.3. COMPOSANTES DU RENDEMENT

Tableau 13 : Composantes du rendement par site et par modes de gestion du sol (Semis Direct sur couverture végétale, labour)

SITES	Mode de gestion du sol	Nombre plantes/ m ²	Nombre panicule s/ plante	Nombre épis/ panicule	% grains pleins	Poids 1000 grains	RDT placette (t/ha)	RDT parcelle (t/ha)
Andrano		76,6 b	3,5 a	73,7 a	76,1 b	30,2 b	2,84 a	2,23 a
Ibity		77,6 b	3,1 a	75,5 a	79,2 ab	28,8 b	2,88 a	2,33 a
Ivory		99,5 a	2,3 b	64,4 a	86,9 a	31,9 a	3,20 a	
	SCV	79,8 a	3,4 a	76,4 a	81,1 a	30,4 a	3,3 a	2,37 a
	Labour	83,3 a	2,8 b	68,7 a	77,9 a	29,6 a	2,5 a	2,19 a

* Entre modalités de traitement, les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

D'après ce tableau :

A Andranomanelatra et à Ibity les densités de semis sont presque identiques. Le nombre de panicules par plante est influencé par le nombre de plantes par m². A Ivory il y a plus de plantes par m² mais moins de panicules par plante. A Ivory les valeurs supérieures pour le pourcentage de grains pleins et le PMG s'expliquent par une température plus élevée par rapport aux deux autres sites et celle-ci a joué un rôle sur le remplissage des grains.

Avec le SCV, il y a plus de panicules par plante mais cette composante n'influe pas significativement sur le rendement. Sur Ibity, nous observons un effet significatif du SCV sur le nombre d'épillets par panicules : 79,4 pour le traitement SCV contre 71,5 pour le labour (non présenté dans le tableau 13).

CONCLUSION

Madagascar est un pays essentiellement à vocation agricole. Malheureusement pour assurer son autosuffisance alimentaire, le pays a encore besoin d'importer du riz. Une alternative consiste à exploiter les *tanety*. Mais la principale difficulté de leur non exploitation reste le problème de la fertilisation. En effet, les sols des *tanety* sont des sols essentiellement ferrallitiques donc impropres par définition à la riziculture. Dans la région de Vakinankaratra, lieu de notre expérimentation, la riziculture pluviale est une pratique encore récente.

Cette étude est réalisée dans le but d'ajouter un plus sur les recherches rizicoles déjà soutenues, sans toutefois minimiser les travaux effectués par nos prédécesseurs. Les variables à comparer sont l'effet de deux types de densités avec trois niveaux de fumures. Les résultats de l'étude ont montré que le rendement obtenu avec une double densité associée au niveau de fumure moyen est le meilleur. Un faible niveau de fumure n'arrive pas à compenser le niveau de fertilité très bas des *tanety* et un niveau trop élevé n'est pas très rentable parce que les résultats obtenus sont identiques à ceux avec un niveau de fumure moyen.

Parallèlement, nous avons utilisé le *chlorophyl meter*, afin de tester son efficacité comme indicateur du statut azoté de la culture. D'après nos résultats le spad apparaît comme un bon indicateur de la nutrition azotée. En effet, des valeurs Spad plus faibles pour N_0 sont associés à des valeurs de croissance et de tallage plus faibles. On observe également un effet de la densité sur les valeurs Spad (plus faibles en double densité), mais on ne peut juger si elles sont dues à une plus forte compétition pour l'azote entre plantes, ou à un développement différent entre les plantes. La mesure au Spad est dépendante de l'épaisseur des feuilles, or des études ont montré une réduction de l'épaisseur de feuilles avec l'augmentation de la densité (non mesurée ici).

Dans un objectif de diagnostic, nous avons comparé les valeurs Spad sur d'autres dispositifs secondaires, les traitements consistent en deux modes de gestion du sol : le labour et le semis direct sur couverture végétale (SCV). A Andranomanealtra, les valeurs Spad entre traitements ne présentent pas de différence significative. A Ibity, les valeurs Spad sont dans un premier temps plus faibles pour le SCV par rapport au labour, ensuite cela s'inverse au profit du SCV. Sur ce site un effet significatif du SCV est observé sur le

nombre d'épillets par panicules : 79,4 pour le SCV contre 71,5 pour le labour. Ces résultats sont en accord avec ceux du dispositif principal.

Il est fort possible que sur le site d'Ibity, un cas de faim d'azote soit intervenu sur le traitement SCV. En effet, la dégradation des couvertures végétales (paille, résidus de récolte...) débute par une immobilisation de l'azote par les microorganismes du sol, qui peut alors être déficitaire pour les plantes. Par la suite, le processus de minéralisation libère l'azote qui se trouve en plus grande quantité dans le sol et qui sera disponible pour la plante.

En outre, le semis direct sur couverture végétale offre une très grande opportunité pour le riz pluvial en terme de sécurisation, de maintien, d'amélioration de la conservation de l'humidité et de la fertilité des sols. En effet, des perspectives d'avenir peuvent être envisagées quant à la lutte contre les insectes et à la résistance aux maladies.

La suite à cette recherche pourra s'orienter vers l'étude de la qualité des grains : il faudra vérifier si, avec un surplus d'azote, le taux de remplissage, le taux de protéines et les qualités organoleptiques seront améliorés.

Une autre étude pourra être axée avec les mêmes traitements (même fertilisation, même densité, même mode de semis) sur une comparaison entre le labour et le SCV dans le but de savoir lequel de ces deux modes de gestion est le plus performant.

Notre souhait, pour clore cette étude, est que les paysans agriculteurs aient les moyens matériels adéquats et financiers afin de pouvoir augmenter la productivité des *tanety*, qu'ils puissent obtenir un rendement optimum de leurs rizières en adoptant la fertilisation adéquate, que l'Etat soutienne leurs efforts comme il l'a déjà annoncé en détaxant les intrants et autres matériels agricoles et que notre pays retrouve ses lustres d'antan en exportant le riz de luxe qui en a fait sa renommée.

BIBLIOGRAPHIE

1. **ANDRIANAIVO B.F.**, 1989. - Effet de la fertilisation des rizières en engrais verts *sesbania*. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies en Sciences Biologiques Appliquées Département Agrophysiologie Végétale.
2. **ANGLADÈTTE A.**, 1966. - Le riz. Maisonneuve et Larose Ed. Paris.
3. **ARRAUDEAU.**, 1985.- Problèmes en riziculture guide d'identification. Seconde édition. IRRI. Los Banos, Laguna, Philippines.
4. **ARRAUDEAU M.A. et VERGARA B.S.**, 1979. - Manuel illustré de riziculture pluviale IRRI. INRA.
5. **ATANASIU N. et SAMY J.S.**, 1984. - Le riz : utilisation efficace des engrais. Ed. CEA, Zurich.
6. **BARBIER J.M et al.**, 1987. - Présentation d'une méthode d'étude des facteurs et des conditions limitant les rendements de riz., Laboratoire d' Etudes Comparées des Systèmes Agraires (LECSA) INRA, CIRAD.
7. **CIRAD et GRET.**, 2002.- Mémento de l'agronome, Cinquième édition.
8. **CIRAD.**, édition 2002. -Revue : Le riz qui nourrit le monde.
9. **CIRAD-TAFA-FOFIFA.**, Fiche d'essai 2002 n° 2. - Amélioration de la fertilité par écobuage : influence de la nature du combustible selon le type de sol de *tanety*.
10. **DE DATTA S.I.**, 1981. - Principles and practices of rice production, Wiley- Interscience Publications.
11. Direction Vulgarisation Agricole – septembre 1983 - Aperçu général sur la riziculture à Madagascar
12. **DOBELMANN J.P.**, 1976. - Riziculture pratique de riz pluvial, Presses Universitaires de France.
13. **FOFIFA/CENRA DERU.**, 2000-2001. - Rapport de campagne dans la région de Vakinankaratra.
14. **FOFIFA/CENRADERU.**, 1998-1999.- Fiche d'activité :Test variétal de riz pluvial en milieu paysan dans le moyen ouest de Vakinankaratra.
15. **FOFIFA/CENRADERU.**, 1998-1999. - Fiche d'activité: Effet de l'utilisation combinée intégrée des fumures organo minérales sur les nouvelles variétés de riz.
16. **FOFIFA-CIRAD.**, Septembre 1999.- Bilan du programme du riz d'altitude.
17. **INSTAT.**, 2002. - Annuaire de la Statistique agricole
18. **IRRI.**, 1981.- Nitrogen and Rice- Los Banos, Laguna, Philippines
19. **KWANCHAI A.**, 1972.- Technique pour des expérimentations au champ sur le riz, IRRI ;Los Banos, Laguna, Philippines.
20. **LERALU F. et RENAULT D.**, 1997. - Nouveaux outils de diagnostic pour une meilleure gestion de l'eau et de l'azote dans les parcelles cultivées. Séminaire des étudiants spécialisation agronomique environnement de l'Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier.

21. **MOREAU D.**, 1987. - L'analyse de l'élaboration du rendement de riz : les outils de diagnostic, Paris, France, groupes de recherches et d'échanges technologiques.
22. **ONG Tafa**., Rapport de campagne 1998-1999. - Test de fertilisation du riz pluvial.
23. **RABEHARISOA L.**,1999. – Cours de Sciences du Sol.
24. **RABEZANDRINA R.**, 2001. – Cas concret sur la riziculture à Madagascar.
25. **RABEZANDRINA R.**, 2001. - Cours d'Agriculture générale.
26. **RABEZANDRINA R.**, 2001. – Cours de fertilisation.
27. **RABEZANDRINA R.**, 2002. - Manuel de pédologie Malagasy
28. **RAKOTONDRAVELO J.C.**, 2001. - Cours de Physiologie végétale appliquée à l'Agriculture.
29. **RAMAROLAHY H.**, 1999.- Mise au point d'une méthode d'apport fractionné d'engrais azoté sur le riz irrigué en utilisant la plaquette couleur foliaire -PCF- .Mémoire de fin d'étude ESSA Département agriculture.
30. **RANAIVO J.**, 1985. - Etude cinétique de la concentration en $N-NH_4^+$ de la solution d'un sol de rizière après apport en profondeur de supergranulés d'urée. Mémoire de Diplôme d' Etude Approfondie de Sciences Biologiques Appliquées.
31. **RANDRIAMIHARISOA R.**, 2002. – Cours d'Agriculture Générale.
32. **RANDRIANJATOVO J.F.**,1982. – La fertilisation du riz de submersion sur les Hauts Plateaux Malagasy. Mémoire de fin d'étude ESSA Département agriculture.
33. **RAOBELISON F.**, 2000 - Suivi expérimental de la teneur en éléments fertilisants libérés par la fumure organique au cours du cycle de développement du riz .Mémoire de fin d'étude ESSA Département agriculture.
34. **RAVEROMIHAJA H.**, 1996. - Atlas de la Région de Vakinankaratra, CIRAGRI Antsirabe.
35. **SCHAOBING PENG and al.**, 1995.- Chlorophyl meter estimates leaf area based nitrogen concentration of rice Agronomy, plant physiology and agroécologie division IRRI, Philippines.
36. artic.ac_besancon.fr : article axé sur la biochimie, fixation biologique de l'azote.
37. www.versailles.inra.fr : unité de nutrition azotée des plantes.
38. www.inra.fr/actualités/DOSSIERS/DOC/agrip/dosap3.pdf :institut national de la recherche agronomique selon des méthodes et monde agricole, question sur la nature et la fertilisation azotée

ANNEXES

ANNEXE 1 : QUELQUES DONNEES SUR LA PRODUCTION RIZICOLE A MADAGASCAR

(source INSTAT)

Tableau 1 : Effectif de la population totale, population rurale et agricole

	1999	2000	2001	2002
Population totale	14 552 000	14 959 000	15 378 288	15 808 880
Population rurale	11 337 580	11 677 030	12 026 650	12 375 420
Population agricole	10 638 940	10 962 530	11 301 800	11 604 854

Tableau 2 : Préférences alimentaires par province (kg/tête/an)

	Antananarivo	Fianarantsoa	Toamasina	Mahajanga	Toliary	Antsiranana
Riz	118.1	104.6	129.2	140	59.4	143.8

Tableau 3 : Quantité d'aliments consommés par milieu (kg/tête/habitant)

	Nationale	Rurale	Urbain
Riz	113.5	115.6	106.7
Légumineuses	6	5.4	7.9
Tubercules	63.4	68.9	44.7
Fruits et légumes	20.7	14.4	42.4
Viandes et poissons	13.8	11.6	21.5
Lait et œufs	8.6	3.9	24.7
PPN	7.9	7.2	10.5
Boisson et tabac	62.3	39.6	139.3
Autres	4.2	4.4	3.6

Tableau 4 : Production de riz et des autres cultures (T)

	1999		2000		2001	
	Total	%	Total	%	Total	%
Paddy	2 483 634	30	2 396 706.81	29	2 571 666.41	30
Cultures vivrières	3 522 865	41	3 514 590	42	3 592 280	42
Cultures industrielles	2 250 659	26	2 253 298	27	2 271 601	26
Cultures d'exportation	106 285	3	97 741	2	104 491	2
Totale	8 363 443		8262 335.85		8 540 038	

Tableau 5 : Evolution de la superficie agricole (Ha)

	1999	2000	2001
Riz	1 207 500	1 209 300	1 212 650
Autre cultures vivrières	771 150	771 655	773 480
Cultures industrielles	150 854	145 890	145 388
Cultures d'exportation	322 076	321 980	32 336
total	2 451 580	2 448 825	2 452 854

Tableau 6 : Quantité de riz exportée (T)

	Riz exporté			Riz importé		
	1999	2000	2001	1999	2000	2001
Riz semi blanchi	381	120	84	82937	188199	149650
Riz décortiqué	110	91	0.3	0.04	0.6	1
Riz de luxe	525	210	200	140	2332	28

ANNEXE 2 : DONNEES CLIMATIQUES

1. Pluviométrie et températures d'Antsirabe sur une période de 30 années

Mois	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
Pm (mm)	15.2	14.4	19.5	88.2	179	235.2	251.7	218.8	188.1	82	27.4	11.1
T° (°C)	12.7	13.3	15.3	17.5	18.5	19.2	19.5	19.6	18.8	17.7	15	12.9

2. Total de la quantité de pluie et moyennes des températures durant le cycle cultural sur le dispositif principal (décadaire)

Date	Pluie(mm)	Tmin(°C)	Tmax(°C)	Tmoy(°C)
06-15/11/02	176,5	12.72	22.76	14.53
16-26/11/02	0	7.98	18.07	9.8
27/11-06/12	26,5	6.32	19.72	8.73
07-17/12/02	133,5	12.9	21,7	16.3
18-27/12/02	155,0	14.81	24.63	18.09
28/12-07/01	179,0	14.42	22.87	17.45
08-17/01/02	187,0	15.38	24.61	18.51
18-28/01/02	268,0	15.52	24.92	18.67
29/01-07/02	93,5	15.30	23.26	18.29
08-18/02/03	1,5	8.5	18.21	8.33
19-28/02/03	63,0	12.28	21.42	15.93
01-11/03/03	75,0	14.63	25.1	18.62
12-21/03/03	184,0	14.81	24.21	18.17
22/03-01/04	13,0	14	24.45	17.9
02-11/04/03	39,0	12.37	24.64	16.89
12-22/04/03	2,0	8.13	24.05	15.56
23/04-02/05	39,0	10.54	24.43	16.13
03-13/05/03	13,5	11.16	23.53	16.36
14-23/05/03	10,5	12.33	22.76	16.14
24-30/05/03	1	5.20	14.75	9.51

ANNEXE 3 : INTERET DU PCP POUR LE CIRAD, LE FOFIFA ET L' ESSA

- Pour **le Cirad** le PCP s'intègre dans sa stratégie de recherche pour une production agricole durable en relevant trois défis majeurs qui sont la transformation des milieux cultivés en préservant l'environnement, la proposition de systèmes techniques diversifiés et de variétés adaptées et l'intégration de ces systèmes techniques au sein des filières et des marchés.
- Pour **le Fofifa**, le PCP met en œuvre une partie de la mission de son département riziculture chargé de conduire les recherches pour le développement durable de la riziculture. De même, le PCP

assure sa mission d'appui à la diffusion des résultats de recherche et celle de la formation de son personnel scientifique et technique.

- Pour l'**Université d' Antananarivo**, la participation au PCP s'inscrit dans la nouvelle politique de participation de l'Université au développement du pays. Il s'agit d'institutionnaliser la recherche pour le développement et le travail multidisciplinaire au sein l'université, de nourrir le contenu des enseignements, de questions et de connaissances liées au développement du pays et enfin, de développer une formation de 3^{ème} cycle spécialisée et des formations professionnelles.

ANNEXE 4 : SYSTEMATIQUES DU RIZ

Le riz est une plante annuelle, herbacée. Il appartient dans la classification suivante:

- Règne **Végétal**
- Catégorie des **Phanérogames**
- Embranchement des **Spermaphytes**
- Sous-embranchement des **Angiospermes**
- Classe des **Monocotylédones**
- Sous-ordre de **Glumiflores**
- Famille des **Graminacea**
- Genre des **Oryza**
- Ordre de **Sativa**
- Espèces : **Indica** et **Japonica**

Variétés : il y a plus de 5000 variétés de riz à majorité de riz long

ANNEXE 5 : CONSEQUENCES D'UNE LUMIERE DIFFUSE ET D'UNE FORTE INSOLATION AU COURS DU CYCLE DU RIZ

➤ **Conséquence d'une lumière diffuse**

Une lumière diffuse entraîne une végétation grêle : vert pâle (dès les premiers stades de la croissance les jeunes plants s'élongent par conséquent le poids sec des coléoptiles et des racines est plus élevé), une absorption réduite de l'azote, une limitation de la production des racines et une modification du rapport C/N.

➤ **Conséquences d'une forte insolation**

Une forte insolation entraîne : une perturbation de la croissance, l'élongation de la tige et l'échaudage.

ANNEXE 6 : MESURE DE L'AZOTE TOTAL

L'azote total est représenté par toutes les formes d'azote : minérales(nitrate, nitrite et ammonium) et organiques (acides aminés et protéines, essentiellement). Il s'agit de récupérer ces formes azotées pour déterminer la teneur globale en azote dans un organe. Pour ce faire, l'organe prélevé est lavé, séché, broyé, tamisé et pesé. Deux méthodes sont alors possibles : la méthode Kjeldhal et la méthode Dumas.

La méthode Kjeldal consiste à mettre les échantillons dans une solution d'acide sulfurique avec un catalyseur qui assure la conversion de toutes les formes d'azote en ammonium. La teneur en ammonium est alors mesurée par des méthodes colorimétriques ou par des titrations acidimétriques.

La méthode Dumas consiste à brûler les échantillons. Toutes les formes d'azote sont alors transformées en azote gazeux (N_2), qui est ensuite mesuré par catharométrie. La méthode Dumas a l'avantage de récupérer 100% du nitrate contenu dans les échantillons, mais elle demande plus de temps et d'investissements en équipements.

ANNEXE 7 : DEFINITION ET QUALITES D'UN INDICATEUR DE NUTRITION AZOTEE

Définition d'un indicateur de nutrition azotée

Les indicateurs de nutrition azotée aident à la conduite de la fertilisation azotée dans une exploitation agricole. Ils interviennent à différents niveaux (Aubry et al., 1996) :

- Estimer les besoins en azote d'une culture, en fonction de son statut nutritionnel à un moment donné, et ainsi fixer les doses d'engrais.
- Déclencher un apport en fonction de l'atteinte récente ou prochaine d'un niveau de nutrition azotée.
- Evaluer à posteriori une stratégie de fertilisation : un diagnostic tardif dans la saison, à un moment où on ne peut plus intervenir, peut amener à rectifier pour l'année suivante les règles de raisonnement de la fertilisation.

Qualités des indicateurs

Pour être utilisables en parcelles agricoles, les indicateurs doivent répondre à cinq critères.

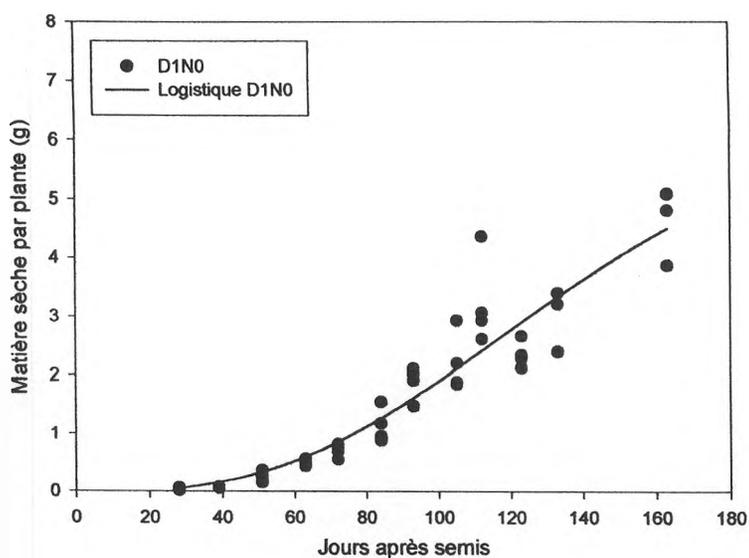
- La *spécificité* : un indicateur de diagnostic azoté est spécifique s'il ne varie que lorsque la nutrition azotée varie. En effet, l'indicateur utilisé doit pouvoir être interprété sans ambiguïté.
- La *sensibilité* : un indicateur de diagnostic azoté est d'autant plus sensible qu'il réagit rapidement quand la disponibilité en azote dans la plante varie. C'est une qualité essentielle pour les indicateurs de déclenchement d'apport où l'on veut éviter toute carence azotée.
- La *mémoire* d'un indicateur fait référence à la quantité d'informations qu'il délivre sur l'histoire de la culture. La mémoire est nécessaire aux indicateurs de stratégie de fertilisation. Les indicateurs sensibles ont généralement peu de mémoire.
- La *valeur prédictive* : un indicateur prédictif permet de prévoir le comportement futur de la culture et donc d'agir en prévention. Cette qualité est essentielle pour les ajustements des doses d'engrais.
- La *facilité de mise en œuvre* : pour être accepté des agriculteurs et des techniciens et être utilisé en parcelles agricoles, l'indicateur ne doit pas entraîner de frais trop importants, ni demander des compétences spécifiques trop poussées et être applicable au champ. Il doit être robuste, c'est-à-dire qu'il peut être utilisé en dehors de ses conditions strictes de validité, tout en restant efficace. En effet, généralement les agriculteurs raisonnent leur fertilisation à la sole c'est-à-dire à l'ensemble des parcelles dite « parcelle guide » et extrapolent les résultats et donc les décisions.

ANNEXE 8 : ITINERAIRES TECHNIQUES SUR LE DISPOSITIF PRINCIPAL

1. *Défrichage* : enlèvement et incinération du *bracharia*.
2. *Préparation du sol* : le travail du sol doit être fait à temps dès la première pluie. La préparation du sol permet un bon développement racinaire et une meilleure aération du sol.
Le profondeur de labour est de 20-30 cm afin d'augmenter la réserve en eau du sol.
3. *Semis en poquet* : La terre qui recouvre le poquet est entassée par le pied.
4. *Enfouissement du fumier et fertilisation minérale*
5. *Travaux d'entretien* : sarclages manuels , lutte contre les insectes et mise en place des engrais pour N₂.
6. *Récolte* manuelle puis battage avec un batteur

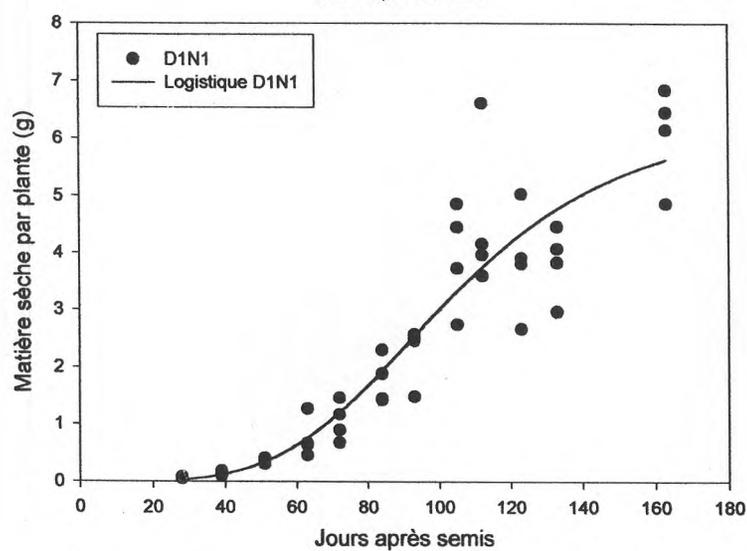
Travail cultural	Date (2002-2003)
Défrichage	5/11
Préparation du sol	15/11
Semis	2/12
Application localisé d'engrais sur N1 et N2	16/12
Démariage	24/12
1 ^{er} sarclage	03/01
1 ^{ere} application localisée d'urée sur N2	10/01
2 ^{eme} sarclage	03/02
2 ^{eme} application localisée d'urée sur N2	24/02
3 ^{eme} sarclage	25/02
Récolte	14/05

ANNEXE 9a : DYNAMIQUE DE CROISSANCE EN SIMPLE DENSITE PAR NIVEAU DE FERTILISATION

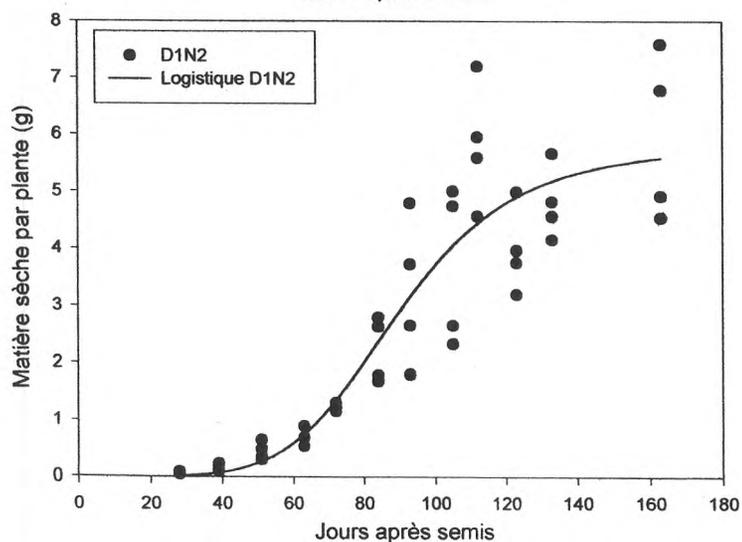


Modèle logistique
 $Y = A / (1 + (x/x_0)^B)$

$R^2 = 0,890$
paramètres
 $A = 7,97$
 $B = -2,91$
 $x_0 = 148,77$

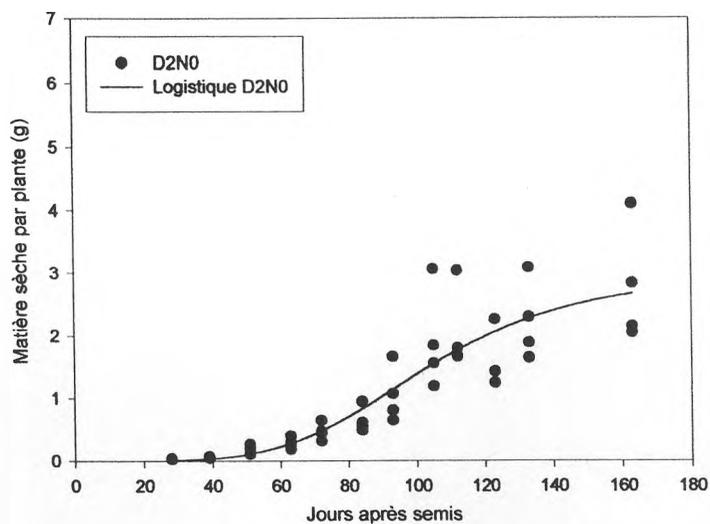


$R^2 = 0,863$
paramètres
 $A = 6,55$
 $B = -4,03$
 $x_0 = 104,27$



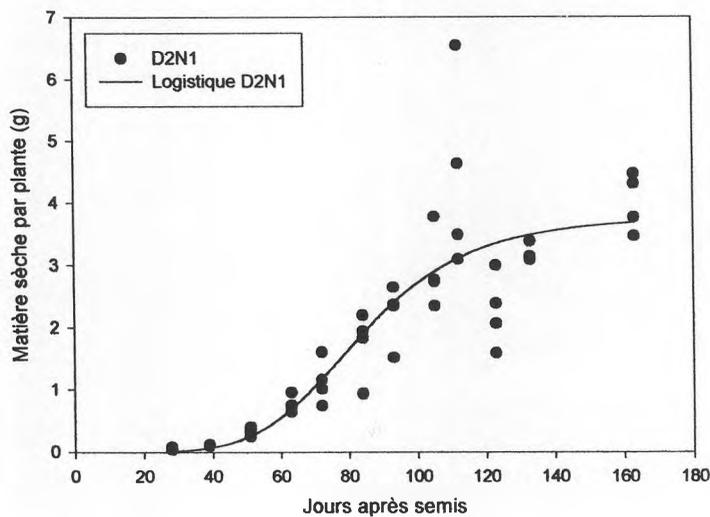
$R^2 = 0,841$
paramètres
 $A = 5,82$
 $B = -5,38$
 $x_0 = 90,10$

ANNEXE 9a : DYNAMIQUE DE CROISSANCE EN DOUBLE DENSITE PAR NIVEAU DE FERTILISATION

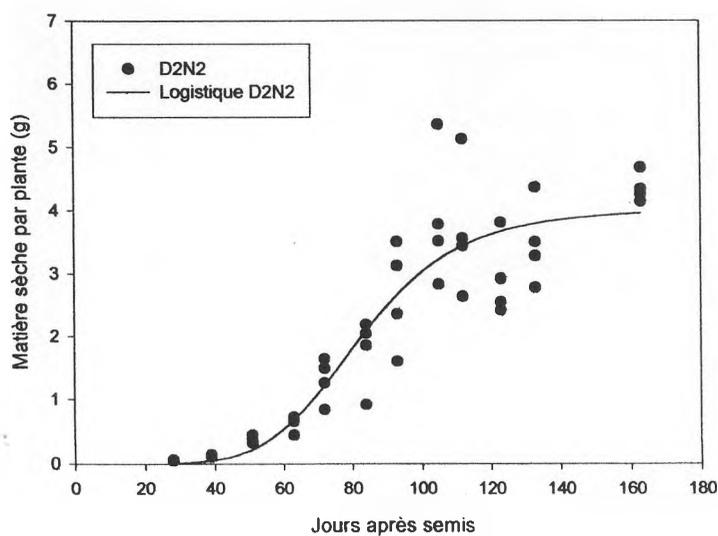


Modèle logistique
 $Y = A / (1 + (x/x_0)^B)$

$R^2 = 0,787$
paramètres
A = 3,02
B = -4,55
 $x_0 = 103,80$

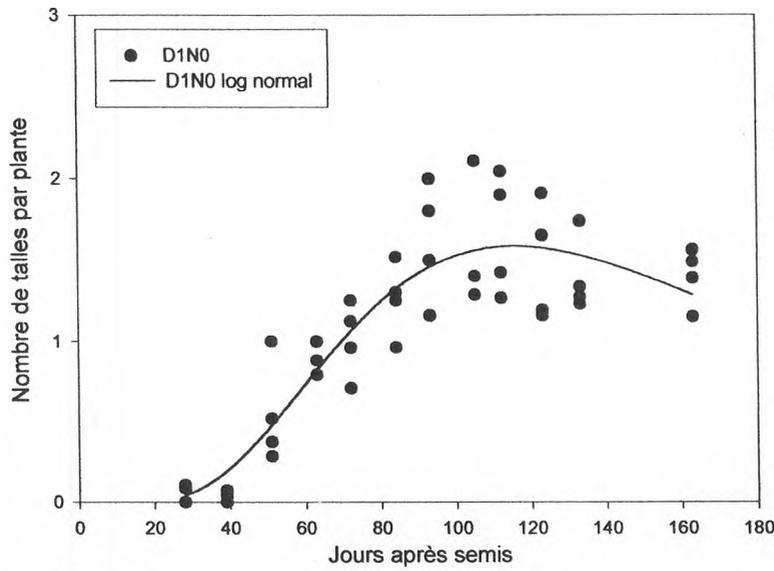


$R^2 = 0,779$
paramètres
A = 3,79
B = -5,26
 $x_0 = 84,00$

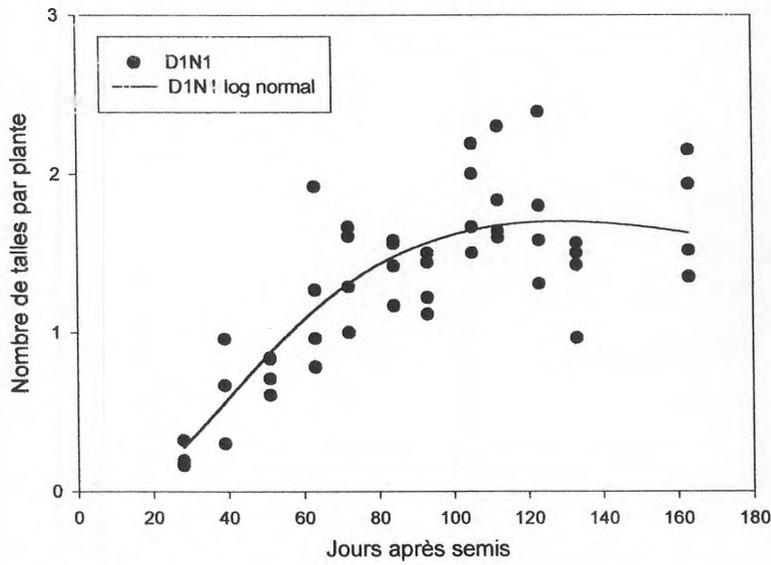


$R^2 = 0,854$
paramètres
A = 4,04
B = -5,86
 $x_0 = 83,03$

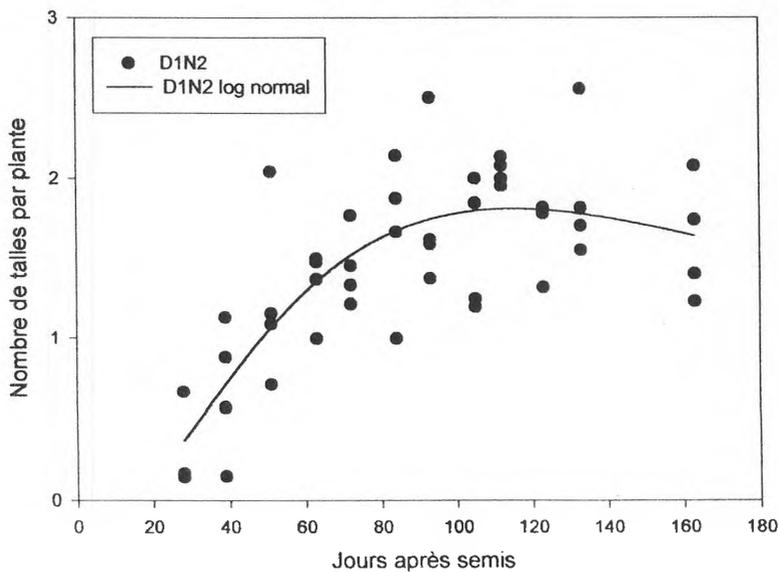
**ANNEXE 9b: DYNAMIQUE DE TALLAGE EN SIMPLE DENSITE PAR NIVEAU DE FERTILISATION
(NOMBRE DE TALLES PAR PLANTE EXCLUANT LA TIGE PRINCIPALE)**



Modèle log-normal
 $Y = A e^{-0.5 ((\ln x/x_0)/ B)^2}$
 $R^2 = 0,821$
 paramètres
 $A = 1,59$
 $B = 0,53$
 $x_0 = 115,52$

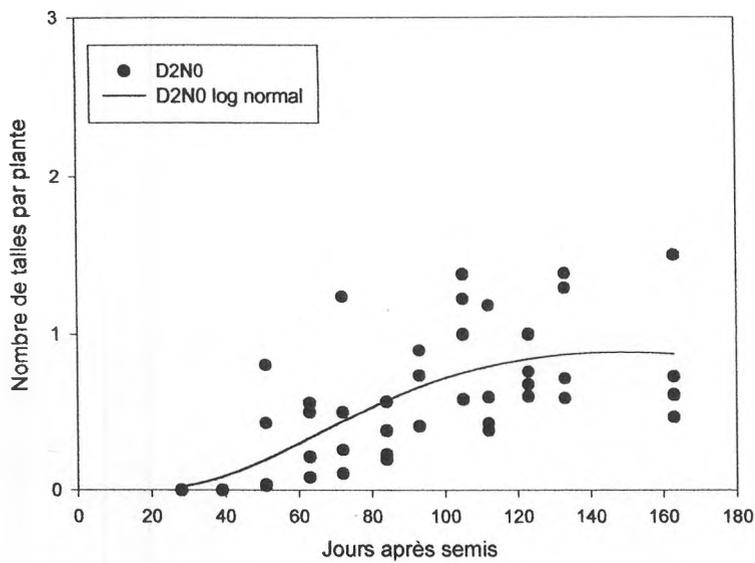


$R^2 = 0,693$
 paramètres
 $A = 1,70$
 $B = 0,80$
 $x_0 = 128,81$



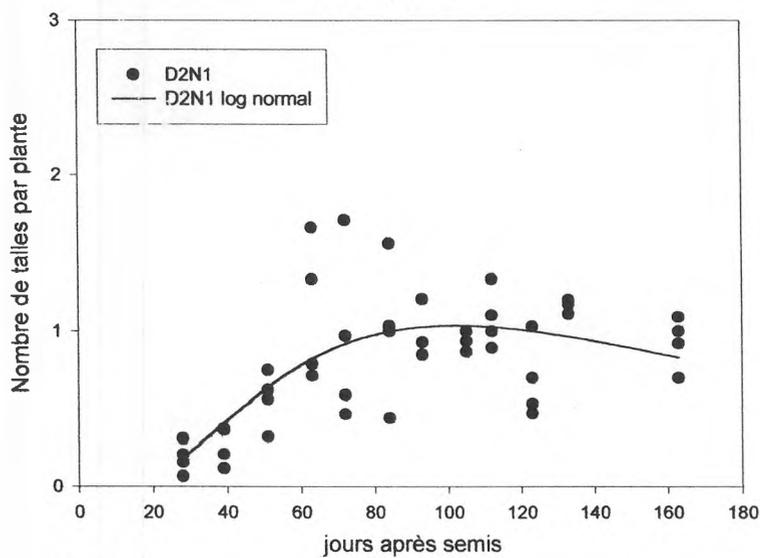
$R^2 = 0,631$
 paramètres
 $A = 1,81$
 $B = 0,79$
 $x_0 = 115,24$

ANNEXE 9b : DYNAMIQUE DE TALLAGE EN DOUBLE DENSITE PAR NIVEAU DE FERTILISATION (NOMBRE DE TALLES PAR PLANTE EXCLUANT LA TIGE PRINCIPALE)

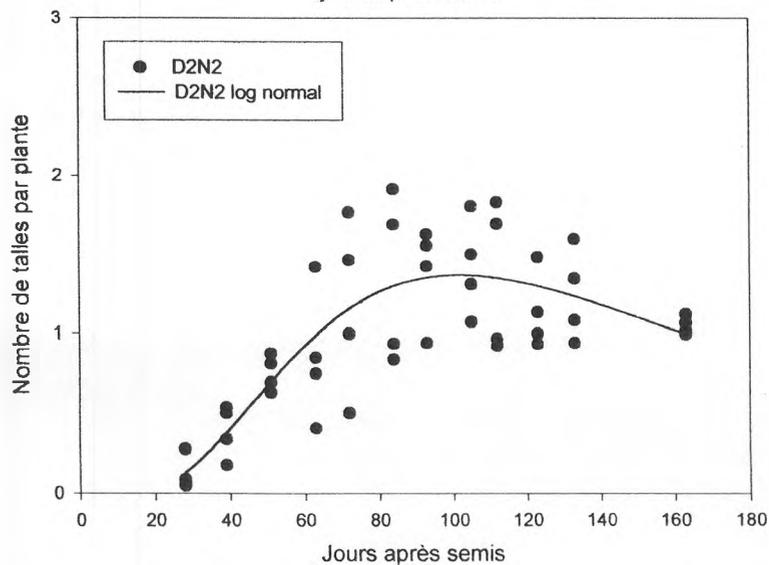


Modèle log-normal
 $Y = A e^{-0.5 ((\ln x/x_0) / B)^2}$

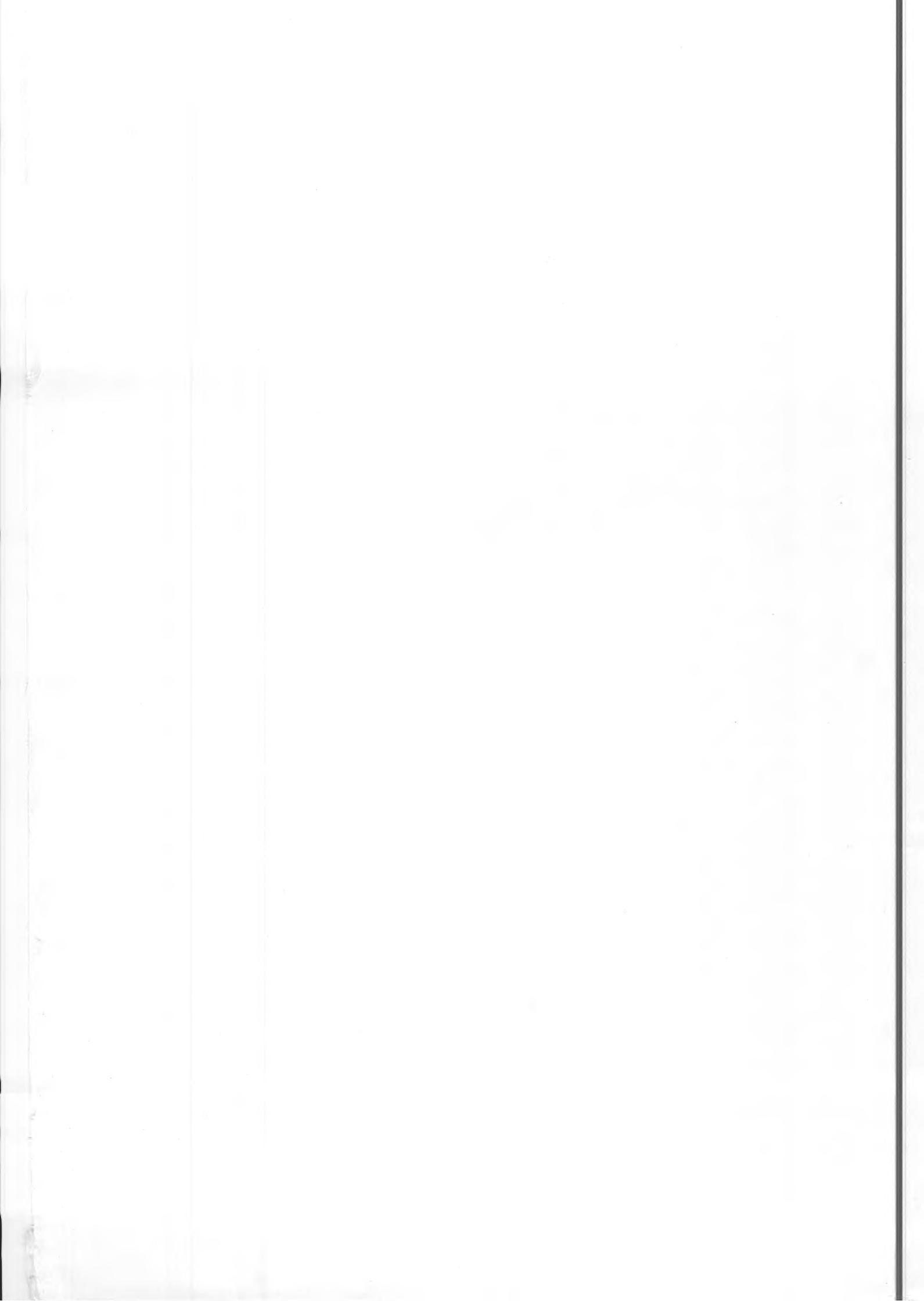
$R^2 = 0,492$
 paramètres
 A = 0,88
 B = 0,62
 $x_0 = 148,63$



$R^2 = 0,452$
 paramètres
 A = 1,04
 B = 0,70
 $x_0 = 101,80$



$R^2 = 0,629$
 paramètres
 A = 1,37
 B = 0,60
 $x_0 = 101,76$



RESUME

Dans la région de Vakinankaratra, la riziculture pluviale est une pratique assez récente. Les facteurs limitant sa large diffusion sont d'une part l'absence de variétés de riz performantes en haute altitude avec les techniques culturales adaptées à ces variétés; et d'autre part, afin d'avoir un bon rendement sur les sols de *tanety*, il conviendrait d'améliorer leur fertilité.

Cette étude est une composante d'un programme de recherches de PCP SCRID dont les objectifs sont d'analyser les effets des conditions de culture et des techniques culturales sur le fonctionnement des peuplements végétaux.

De nombreuses recherches ont été effectuées sur la fertilisation azotée du riz. Toutefois aucune étude n'a cherché à analyser l'azote de façon dynamique, c'est à dire tout au long du cycle cultural, ni à utiliser un indicateur d'état de culture comme le *chlorophyl meter* qui peut donner un pronostic sur l'état de nutrition azotée de la plante.

Pour ce faire, une expérimentation a été conduite sur la ferme de KOBAMA à Andranomanelatra sur sol ferrallitique. La méthode consiste à étudier les effets combinés de trois niveaux de fumures (N_0 , N_1 et N_2) avec deux densités différentes (simple et double) sur la croissance et le développement de la variété FOFIFA 154 actuellement vulgarisée par la Recherche. Les résultats seront comparés avec trois autres dispositifs complémentaires à deux modes de gestion du sol: labour et semis sur couverture végétale.

Les résultats montrent que la fumure azotée et la densité influent sur le rendement. Le rendement optimum est obtenu avec une double densité associée à un niveau de fumure moyen. Le spad apparaît comme un bon indicateur de la nutrition azotée. En effet, des valeurs Spad plus faibles pour N_0 sont associés à des valeurs de croissance et de tallage plus faibles. On observe également un effet de la densité sur les valeurs Spad (plus faibles en double densité).

Mots clés : Riz pluvial, fertilisation azotée, densité, indicateur de nutrition azotée.