

Université d'Antananarivo
Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
Département AGRICULTURE

MISE EN EVIDENCE DES OPPORTUNITES DE
DEVELOPPEMENT DE LA RIZICULTURE PAR ADOPTION DU
SRI, ET EVALUATION DE LA FIXATION BIOLOGIQUE DE
L'AZOTE

Andry Heritiana ANDRIANKAJA

RESUME

La riziculture des hautes terres a connu une longue période de crise. Depuis les années 60, le rendement est resté pratiquement au même niveau. Vers la fin des années 70, la production souffrait d'une insuffisance par rapport aux besoins nationaux. Des efforts de développement de la production ont été entrepris pendant des années sans réussir.

Il existe plusieurs techniques d'intensification rizicole proposées aux paysans pour augmenter le rendement. Dans cette étude, nous avons traité le SRI sur deux principaux types de sol de rizières des hautes terres (limono-sableux et argilo-limoneux). Les essais ont permis d'obtenir des niveaux de rendement de plus de 6 t/ha sur les sols limono-sableux et de 10 t/ha pour les sols argilo-limoneux. Ces hauts rendements ont été obtenus avec la combinaison de quatre facteurs de rendement du SRI (plants de 8 jours, repiquage à 1 brin, application de compost, maîtrise de l'eau). Les combinaisons partielles de ces facteurs donnent également des rendements significatifs, très différents de la méthode traditionnelle.

L'énigme de la nutrition azotée du riz qui a suscité beaucoup de doute trouve par cette étude une voie d'explication. En effet, l'existence de l'association *Azospirillum*-riz a été étudiée et confirmée. Le SRI semble offrir des conditions favorables à l'établissement de ces bactéries (niveau d'aération du sol par la maîtrise de l'eau, amendement organique ...).

Sur le plan économique, le SRI permet aux paysans de produire du riz en quantité suffisante pour à la fois couvrir leurs besoins et dégager un surplus commercialisable. Avec un coût de production à l'unité de poids relativement faible, le paysan qui pratique le SRI réalise presque le double du bénéfice de celui adoptant la méthode traditionnelle. Les efforts supplémentaires requis par le SRI semblent être compensés par ce gain de rendement. La méthode reste donc valable pour les petits exploitants rizicoles possédant de faibles superficies en conformité avec le contexte des hautes terres.

Les rendements obtenus avec les différentes combinaisons des facteurs du SRI sont largement démontrés dans ce mémoire afin de pouvoir estimer préalablement la production des paysans qui ne satisfont que partiellement ces facteurs de rendement.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos profondes reconnaissances à l'endroit de :

- Monsieur **René RABEZANDRINA**, Docteur-Ingénieur, Consultant International, Chef du Département Agriculture, pour les précieuses directives et la qualité de la formation qu'il nous a dispensée au cours de notre formation, et pour l'honneur qu'il nous fait d'accepter de présider le jury de ce mémoire ;
- Monsieur **Robert P. RANDRIAMIHARISOA**, Professeur Titulaire d'Université, Docteur ès Sciences qui, malgré ses multiples et nobles occupations, a accepté d'être notre tuteur et de nous consacrer beaucoup de son temps pour nous apporter ses précieux conseils et son expertise dans l'élaboration de ce travail ;
- Monsieur **Harison RANDRIARIMANANA**, Conseiller Technique auprès du Premier Ministre et du Ministre de l'Agriculture, Responsable National de l'Unité de Politique de Développement Rural (UPDR), qui malgré ses innombrables responsabilités, nous fait l'honneur de juger ce travail ;
- Monsieur **Sebastien RAFARALAHY**, Ingénieur ICAM Lille, Président de l'Association Tefy Saina, pour tous les conseils qu'il nous a apportés et pour avoir accepté de siéger parmi les membres du jury.

Nous adressons également nos sincères remerciements à :

- **ROCHFELLER FOUNDATION** pour avoir financé ce travail,
- Monsieur **Norman UPHOFF**, Professor of Government, Director of CIIFAD, Cornell University, pour ses conseils au cours de l'élaboration du mémoire,
- Monsieur **Glenn A. LINES**, Directeur Régional du programme LDI/Moramanga, pour ses aides dans la réalisation du travail ;
- Messieurs **FETIARISON** et **Fidèle RANDRIAMAROLAHY**, Chercheurs auprès du FOFIFA, pour leurs aides et conseils, et le travail qu'ils ont accompli pour contribuer à la réalisation de ce mémoire ;
- L'Association Tefy Saina et ses membres pour leur étroite collaboration ;
- Tous les enseignants à l'ESSA et au Département AGRICULTURE qui n'ont pas ménagé leur peine pour parfaire notre formation ;
- Tout le personnel du Laboratoire Sols/Plantes du Département Agriculture ;

- Tout le personnel du Département Agriculture ;
- Tous les paysans d'Anjomakely qui ont participé à la réalisation des expérimentations et qui nous ont fait découvrir plusieurs autres réalités du milieu rural ;
- Tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

1. HISTORIQUE DE L'EVOLUTION DE LA CULTURE DU RIZ ET L'IMPORTANCE DU SRI

1.1. Historique du riz

- 1.1.1. La genèse de la riziculture
- 1.1.2. Les intérêts socio-économiques du riz
- 1.1.3. Les conditions locales de production

1.2. Les évolutions techniques de la riziculture

- 1.2.1. La riziculture de submersion
- 1.2.2. La riziculture de bas fond sans submersion (SRI)
- 1.2.3. Les cultures pluviales

1.3. Les raisons scientifiques de ces évolutions

- 1.3.1. Les étapes des évolutions
- 1.3.2. La correspondance entre le SRI et ces évolutions
- 1.3.3. La peur des dégradations des rizières par l'emploi des intrants chimiques

1.4. Le SRI : Proposition technique

- 1.4.1. Internationalisation du SRI
- 1.4.2. Les fondements biologiques du SRI
- 1.4.3. Les critères d'évaluations de bons rendements

2. EXPERIMENTATION

2.1. Méthodologie

- 2.1.1. Essais en milieu paysan
 - 2.1.1.1. Choix du site expérimental
 - 2.1.1.2. Dispositif expérimental
- 2.1.2. Mise en place de l'expérimentation
 - 2.1.2.1. La préparation du sol
 - 2.1.2.2. Les aménagements requis par l'essai
 - 2.1.2.3. La mise en place de l'essai

2.2. Résultats et interprétations

- 2.2.1. Les effets des différents facteurs de rendement en SRI
- 2.2.2. La synergie entre les facteurs de rendement

2.3. Recommandations

3. IMPORTANCE DE LA FIXATION BIOLOGIQUE DE L'AZOTE SUR LE RIZ SOUS SRI

3.1. Le mécanisme de la fixation biologique de l'azote

- 3.1.1. La réduction de l'azote
- 3.1.2. La fixation biologique de l'azote : cas des légumineuses
- 3.1.3. Les facteurs de régulation

3.2. La BNF et les plantes non légumineuses : cas des Azospirillum

- 3.2.1. Les étapes importantes de la BNF
- 3.2.2. Les complexes fixateurs et les voies de recherche envisagées

3.3. La liaison entre la BNF et le SRI

- 3.3.1. Les observations faites
- 3.3.2. Les hypothèses
- 3.3.3. Les analyses de BNF faites sur les racines de riz

4. ETUDE ECONOMIQUE

4.1. Conditions de production

- 4.1.1. Dotation matérielle des exploitations agricoles
- 4.1.2. Contraintes structurelles globales
- 4.2. Comparaison avec les autres méthodes de culture
 - 4.2.1. Avec les méthodes traditionnelles
 - 4.2.2. Avec la riziculture améliorée
- 4.3. Opportunités offertes par le SRI
 - 4.3.1. Justification du choix
 - 4.3.1.1. Optimisation de l'utilisation des ressources
 - 4.3.1.2. Possibilités de production de « riz biologique »
 - 4.3.2. Extension de la riziculture
 - 4.3.2.1. Scénarios
 - 4.3.2.2. Problèmes

CONCLUSION

INTRODUCTION

Dans les conditions des hautes terres, les paysans riziculteurs « aquatiques » se heurtent au problème de l'exiguïté des sols. De génération en génération, ces rizières se départagent alors que l'extension reste faible. C'est dans cette unique optique d'une augmentation de la productivité que nous avons mené nos expérimentations, dans le cadre de ce mémoire

ROCHFELLER FOUNDATION, en collaboration avec CIIFAD, a contribué largement au financement de ce travail, pour une perspective de développement des « petits paysans ».

Les paysans riziculteurs de la zone périphérique de la capitale sont pauvres. La plupart ne sont que des métayers si bien qu'une faible production provoquera un désintéressement à cultiver du riz. Ces « petits » paysans n'arrivent pas toujours à évaluer, du moins financièrement, les efforts consacrés à cette culture du riz. Leur objectif se limite à assurer leur besoin une partie de l'année.

Dans ce contexte socio-économique, les techniques améliorées comme le SRA ne sont pas à leur portée. Nous pensons que cette situation milite en faveur du SRI. Une démonstration appropriée et un suivi systématique pourront amener les paysans à bénéficier de la fixation biologique de l'azote (BNF), que nous allons d'ailleurs suivre et évaluer au cours de nos expérimentations.

Le niveau actuel du rendement en paddy est de 1,5 à 2 tonnes par hectare ce qui diffère très peu du rendement obtenu trente ans auparavant. En outre, l'étroitesse des parcelles de culture ne permet que de produire une très faible quantité de riz par exploitation. Cette situation se traduit par l'incapacité croissante des paysans, à assurer une sécurité alimentaire, d'une part, et à produire un surplus de production commercialisable, d'autre part. Avec la croissance démographique (2,8% par an environ), il y a forcément une répercussion sur l'économie nationale par une importation de plus en plus importante de riz, allant jusqu'à 200 000 tonnes par an. Aussi, faut-il trouver un moyen de renverser cette tendance, et d'amener ces agriculteurs à produire davantage.

Le « Système de Riziculture Intensive ou SRI », proposé par un certain nombre d'organismes de développement, figure parmi les alternatives techniques jugées susceptibles d'augmenter la quantité de riz produite par unité d'exploitation agricole, avec pratiquement le même capital foncier et les mêmes intrants.

En général, une importante production nécessite un apport substantiel en éléments fertilisants ou à la rigueur une bonne fertilité naturelle du sol même si dans ce cas, il faut entretenir cette fertilité par des apports exogènes au fil des années.

Une importante perspective du SRI semble s'ouvrir par l'intermédiaire de la fixation biologique de l'azote (BNF) et de nombreux adeptes espèrent apporter un grand soulagement, par sa performance, aux paysans producteurs de riz. Si les connaissances en la matière pouvaient se préciser et mettre à la disposition des riziculteurs un ensemble de techniques tendant à favoriser le mécanisme de cette fixation, ces paysans pourraient bénéficier d'une quantité supplémentaire d'azote sans une dépense monétaire conséquente.

Aussi, ce mémoire vise-t-il à étudier les possibilités d'augmentation du rendement de la riziculture des hautes terres par adoption du SRI et des effets bénéfiques du BNF. Pour cela, dans la première partie, l'étude portera d'abord sur le contexte de la riziculture sur les hautes terres à travers une approche historique. Un aperçu succinct des aspects scientifiques et socio-économiques du SRI sera également abordé. Ensuite l'accent sera porté sur des expérimentations agronomiques basées sur les facteurs de rendement en SRI. Et finalement, pour mieux situer la pertinence de l'adoption du SRI dans le contexte actuel des paysans des hautes terres, une étude économique sera faite.

1. HISTORIQUE DE L'EVOLUTION DE LA RIZICULTURE ET DE L'ITINERAIRE VERS LE SRI

Dans la zone d'Antananarivo, la riziculture est une activité qui date d'une époque ancienne. Du temps des rois aux jours présents, elle reste un élément principal du paysage de la ville et de ses proches périphériques. Cependant, derrière cette appréhension empirique de la riziculture en Imerina, des successions de faits historiques et d'innovations technologiques ont contribué à façonner la forme de production pratiquée actuellement. Différents facteurs d'ordre économique, technique et politique ont donné forme à ce type de riziculture.

1.1. Historique du riz

La riziculture est une activité qui a pris naissance dans la société des hautes terres au cours de son évolution historique. Le riz a tellement influé l'histoire et la culture de cette société. Le « santabary » pour partager la joie de la récolte, en est une illustration. Cette approche historique apporte également une meilleure compréhension de la valeur sociale du riz et de son importance dans l'équilibre économique, dans son ensemble.

1.1.1. La genèse de la riziculture

Avec la quasi-certitude d'une origine orientale du peuplement d'Antananarivo (immigrants malaisiens et indonésiens), la tendance générale d'assimiler la riziculture à un héritage de cette civilisation originelle se fait cours. Toutefois, des précisions sur les faits historiques tendraient à admettre qu'elle serait plutôt le fait de circonstances économiques et politiques du courant du 17^{ème} siècle (Raison, 1991).

1.1.1.1. Problèmes alimentaires du 18^{ème} siècle

Les « vazimba », premiers occupants de l'Imerina, ne connaissaient pas le riz. Pour leur alimentation, ils se nourrissaient de saonjo, de taro, de voavahy (*Dolichos lablab*). Plus tard, les migrants Merina, peuplement majoritaire actuel de la zone, avaient instauré une organisation politique et administrative, obligeant les premiers venus à céder la place. Au 17^{ème} siècle, le puissant royaume Merina avait entretenu d'importantes relations commerciales avec les grandes puissances coloniales européennes. Les principaux produits d'exportation étaient alors le textile et le zébu. Au 18^{ème} siècle, avec la révolution industrielle et notamment l'invention du métier à tisser, le déclin du royaume commença d'abord par un déficit de la balance commerciale : les tissus ne se vendent plus, car de moindre qualité, alors que les importations de produits alimentaires restaient stables. Il a fallu trouver une solution pour pallier cette situation. Malgré la bonne volonté des gens à produire pour les besoins du royaume, la faillite du système socio-productif (perte de fertilité du sol, pression démographique ...) était inévitable. L'effet observé fut l'accentuation de la précarité du système.

1.1.1.2. Début de production de riz

Les sept années de famine⁽¹⁾ sous Andrianampoinimerina ont été décisives. Des solutions s'imposaient pour stopper ce fléau. Le choix stratégique portait alors sur la production de riz afin de satisfaire les demandes.

a. Priorité : aménager un nouvel espace de culture

Ce roi, connu pour avoir eu un grand sens de commandement, avait entrepris un vaste projet d'aménagement de la plaine d'Antananarivo qui, à l'époque n'était qu'un marais impropre à la culture. Avec l'aide d'une forte organisation sociale, ce roi a réussi à repousser l'Ikopa à quelques kilomètres plus loin de la ville, et ensuite à drainer toute la plaine qui correspond à l'actuel Betsimitatatra pour en faire un grand périmètre rizicole. Et progressivement, la riziculture avait pris sa place dans les pratiques culturelles de la population.

b. Condition sine qua none : promouvoir la nouvelle riziculture

La riziculture de submersion ne pouvait démarrer d'elle-même de par le fait qu'il s'agit d'une activité nouvelle. Le roi lui-même a dû s'investir dans la promotion de cette activité dans un de ses fameux discours, au cours duquel il a exhorté le peuple à mettre en valeur les rizières, sans oublier les traditionnelles cultures de tanety. A cette époque, cette exhortation avait force de loi d'autant plus que le peuple devait obéissance au roi.

1.1.1.3. Facteurs favorables à l'introduction du riz

La riziculture était une activité nouvelle qui nécessitait beaucoup plus de travail, et par conséquent une plus importante organisation au sein de chaque unité de production. A cette époque lointaine, la mobilisation des forces productives était déjà assez difficile. Aussi, adopter une nouvelle pratique assortie d'une contrainte majeure de travail, relevait pratiquement de l'utopie. Toutefois, deux événements capitaux rendaient finalement la situation favorable à la riziculture :

a. La libération de la main d'œuvre féminine

Les femmes étaient auparavant occupées par le tissage, mais depuis le déclin des exportations de tissus, elles s'adonnaient à d'autres activités de production. En effet, avec les guerres de territoire que se faisaient les rois de l'époque, les hommes étaient pratiquement mobilisés pour protéger le royaume et son territoire. Les femmes étaient donc majoritairement disponibles pour suppléer aux travaux agricoles, d'une part, et contribuer à l'augmentation de la capacité de production de la communauté, d'autre part.

b. L'augmentation des besoins alimentaires d'une population de plus en plus nombreuse

L'Imerina connut en même temps un accroissement démographique important. Par la suite, les entreprises de réunification de l'Imerina et de l'île, ultérieurement, nécessitaient de

⁽¹⁾ les « Tsimiofy » (Callet, 1908)

plus en plus de denrées alimentaires pour appuyer les troupes au combat et soutenir les efforts de guerre.

c. La division sociale des attributions

Plus tard, la vie sociale s'organisait d'une façon plus précise. Il a été fait une distinction nette entre la vie civile et la vie politique, notamment militaire. Radama 1^{er}, avec l'institution de la première véritable armée régulière, libéra de nombreuses forces productives qui se sont vite investies vers les nouvelles surfaces agricoles aménagées.

1.1.2. Les intérêts socio-économiques du riz

Depuis cette époque révolue, l'importance du riz n'a cessé de croître. Devenu pratiquement l'aliment de base principal des malgaches, la production du riz est toujours restée au centre des préoccupations des Malgaches.

1.1.2.1. La place du riz dans le contexte social

Le riz est très bien connu des habitants des hautes terres, en général et de ceux de la plaine d'Antananarivo, en particulier. Il est même considéré comme étant la culture de référence en matière de production agricole. Actuellement, malgré une tendance à l'urbanisation qui s'incruste dans le paysage de la province d'Antananarivo, l'activité rizicole reste la plus importante, tant en surface de culture, qu'en volume de production (tab n°1).

Tableau n°1 : Importance du secteur rizicole (Annuaire des Statistiques Agricoles, 1999)

	Surface rizicole (ha)	Volume de production (milliers de tonnes)	Nombre d'exploitations rizicoles (en milliers)
National	1 207 500	2 570	1 721
Antananarivo	194 310	523	373

La société rurale malgache s'accorde comme référence sociale la possession de rizières et la possibilité de les mettre en culture tous les ans. Pour la majorité des paysans, la rizière représente non seulement un élément important de leur patrimoine, mais également une sorte de prestige familial. Il n'est pas rare de constater qu'ils gens se séparent amèrement de leurs rizières, lorsque les circonstances les y obligent. La cession d'une parcelle de terrain constitue l'ultime alternative à ces difficultés.

D'ailleurs, la naissance du « paysannat sans terre » (FAO et Jureco, 1988) a été largement due à cet attachement aux rizières. Pour assurer leur mise en culture, le paysan a souvent recours aux crédits informels. Avec un taux d'intérêt usuraire, allant de 100 à 150%, d'une part, et la faiblesse de la production, d'autre part, le paysan qui mise principalement sur sa récolte pour le remboursement des emprunts, est souvent obligé de vendre son terrain pour honorer ses engagements envers ses créanciers.

1.1.2.2. Le prix du riz et la stabilité socio-économique

Au fil du temps et avec l'importance grandissante de la problématique du riz, les dirigeants se sont efforcés de garder une certaine stabilité du prix du riz. En effet, cette denrée

figure parmi les produits stratégiques de la société malgache. Aussi, pour atteindre les objectifs de stabilité, différentes stratégies ont été adoptées :

a. La promotion de la production par le développement de grands périmètres rizicoles (Marovoay ou Lac Alaotra, par exemple) :

En effet, par application des théories économiques sur les échanges, il est possible de maîtriser le prix du riz par le volume écoulé sur le marché. Les responsables ont donc lancé la mise en valeur de ces vastes espaces agricoles pour dégager un surplus agricole capable de répondre aux besoins du marché. S'agissant de marché « libre », le mécanisme de l'offre et de la demande détermine le prix. Cette politique a eu un effet incitateur sur les producteurs.

b. L'intervention directe de l'Etat sur le prix (politiques de fixation de prix ...) ::

Stratégie courante dans les pays à économie dirigée, cette pratique influe artificiellement sur le marché. Elle nuit aux producteurs car les prix sont fixés unilatéralement par les autorités supérieures, sans tenir compte des charges de production. Par contre, lorsque l'Etat intervient en subventionnant les producteurs, les impacts pour les consommateurs ne sont pas toujours significatifs pour le cas de Madagascar. D'ailleurs, les formes de subvention dont bénéficiaient les paysans touchaient essentiellement les intrants.

c. L'intervention indirecte de l'Etat sur la filière (importation et subvention à la consommation)

Le consommateur malgache reste très sensible aux évolutions du prix du riz. A défaut d'avoir des concepts économiques de manière académique, il évalue son pouvoir d'achat en fonction du prix du riz. Au temps de la colonisation, maintenir le prix du riz au niveau le plus bas permettait de garder le salaire des ouvriers à un niveau tel qu'ils pouvaient s'acheter du riz à hauteur de leur besoin. Plus tard, la pauvreté accompagnant, maintenir ce prix à un niveau accessible à la bourse de la population, urbaine en particulier, devenait un impératif économique de stabilité. Pour ce faire, les responsables ont eu, à maintes reprises, recours aux subventions du prix à la consommation et aux importations de riz. Toutefois, les seuls véritables effets d'une telle politique se résument en dépense budgétaire et en une démotivation des producteurs locaux.

Bien que des effets positifs puissent résulter de telles initiatives, le sort des producteurs eux-mêmes qui voient, au fil du temps, leur revenu s'effriter de manière dramatique, a été quelque peu oublié.

1.1.3. Les conditions locales de production

Antananarivo, avec ses plaines aussi bien au Nord (Laniera, Ambohimanarina ...), au Sud (Tanjombato, Andromba ...), à l'Est (Alasora ...) qu'à l'ouest (Fenoarivo, Ambohidrapeto ...), reste un des centres urbains ayant le plus d'activités rizicoles. Toutes ces plaines aux alentours accueillent des rizières et apportent chaque année aux propriétaires respectifs une quantité de riz qui leur permet de couvrir, au moins partiellement, leurs besoins. Avec l'évolution du contexte économique, de nouvelles activités se sont développées sur cette

zone (industries, commerce ...) et l'urbanisation continuant, la configuration subit une certaine mutation.

1.1.3.1. Le climat

Le climat est du type tropical d'altitude. La température s'atténue sous l'effet de l'altitude et la pluviosité est assez élevée. La répartition des pluies et l'évolution de la température divisent l'année en deux saisons climatiques et culturelles bien distinctes (tab n°2) :

- Une saison chaude et humide, variant de quatre (04) à six (06) mois, qui correspond également à la période favorable à la majorité des activités agricoles,
- Une saison fraîche et sèche qui limite les possibilités culturelles à quelques espèces, suivant les caractéristiques physiologiques de la plante, et à quelques espaces, suivant la disponibilité en eau, l'exposition au soleil et l'emplacement topographique.

Tableau n°2 : Pluviométrie et température moyennes à Antananarivo de 1991 à 2000 (Direction de la météorologie)

Années	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
P (mm)	321,1	265,7	168,9	32,9	9,8	6,3	6,0	7,4	12,36	39,9	102,0	206,8
T moy (°C)	21,7	21,6	21,5	20,5	18,9	16,6	15,1	15,9	17,7	19,7	21,2	21,8

1.1.3.2. Le relief

Le relief est plus ou moins modéré mais la disparité entre les zones est toutefois très marquée avec des vallées, et des vastes plaines à fond plat.

L'organisation des parcelles de culture correspond à la situation de la zone considérée, plaine ou petites vallées, d'une part, et à l'emplacement par rapport à la topographie, d'autre part :

- Sur la plaine, une dominante incontestable est la riziculture ; toutefois, autour des cases, on observe quelques cultures maraîchères associés aux arbres fruitiers. Le même type de paysage peut se rencontrer sur les bourrelets de berge longeant les cours d'eau ;
- Dans les vallées, les cultures sèches sont localisées en hauteur, sur les flancs des collines. Les rizières commencent seulement à partir d'un niveau où l'argile, emportée par les flux d'érosion, assure une certaine imperméabilité au sol situé en contre bas. Ce caractère est recherché pour la riziculture de submersion.

La présence du seuil de Farahantsana réduit la pente naturelle des fleuves. Cela ralentit d'une manière significative la vitesse d'écoulement des fleuves et contribue à une plus grande quantité de dépôt grossier (essentiellement du sable) dans le fond des fleuves. Par conséquent, lors des inondations il y a davantage d'épandage de particules sableuses dans les zones affectées, lesquelles nuisent principalement à la culture en place, mais également aux propriétés des sols (remontée d'eau par capillarité, par exemple).

La plaine d'Antananarivo se trouve à une altitude d'environ 1200 mètres. Elle est parcourue par l'Ikopa et ses affluents (Mamba, Sisaony, Andromba, Katsaoka), lesquels constituent essentiellement le réseau hydrographique de base de la zone. Une caractéristique principale de ce réseau est l'effet niveleur exercé par le seuil rocheux de Farahantsana (au nord-ouest de Mahitsy). Ce seuil maintient le niveau de la nappe phréatique très près de la

surface, et celui des fleuves au-dessus de la plaine. Cette situation rend obligatoire leur endiguement afin de préserver les surfaces cultivables et la zone habitable des inondations.

Ce régime hydrologique particulier présente des impacts majeurs sur les pratiques agricoles locales. Dans les zones où la nappe reste très près de la surface, la rizière reste humide toute l'année, il s'ensuit une légère modification du calendrier cultural. Le retrait de l'eau pendant la période fraîche permet la préparation du sol juste avant la montée des eaux. La mise en pépinière des plants de riz a été avancée du fait de la course de vitesse qu'impose le rythme d'augmentation de la hauteur d'eau. En effet, il faut donner aux plants de riz la taille et la vigueur suffisantes pour pouvoir s'adapter aux conditions de submersion dérivant de la crue des fleuves et des précipitations.

1.1.3.3. Le sol

Avec l'évolution des sciences agronomiques, praticiens et chercheurs ont été amenés à considérer le facteur sol comme étant un élément indissociable de la production. Le sol n'est plus un simple substrat mais devient un facteur déterminant des capacités de production..

Pour le cas des hautes terres malgaches, la réputation de « sols pauvres » relève d'un concept dont il convient de comprendre les implications. Des essais de classification de sols ont été menés par l'ORSTOM, dans les années 60, pour aboutir à une diversité de types de sols aux potentialités agricoles d'autant plus différentes. Etant donné ces différences, les affirmations doivent être nuancées et tenir compte de cet aspect.

Ces sols peuvent être globalement regroupés en :

a. Sols ferrallitiques des tanety :

Ils n'ont fait l'objet d'une sérieuse considération des organismes étatiques que vers la fin des années 60 avec l'« Opération tanety ». D'ailleurs, cette nouvelle orientation s'est faite dans le souci d'étendre les terres cultivables. Malgré la « pauvreté de ces sols », les paysans continuent toujours de les mettre en valeur, avec des techniques de régénération de la fertilité les plus diverses (fumure organique, rotation culturale, jachère de durée variable ...). A ce jour, les tanety constituent une part importante du capital foncier des exploitations agricoles des hautes terres (tab n°3) et leur contribution à l'équilibre du système de production ne doit pas être négligée.

Tableau n°3 : Répartition moyenne des surfaces de culture entre tanety et rizières sur les hautes terres (adapté de Place, 1991)

	Rizières	Tanety
Surface moyenne par exploitation ^(*) (ares)	48,9	54,7

^(*) Ces valeurs tiennent compte des réalités de l'ensemble des hautes terres

b. Sols hydromorphes des bas-fonds.

Les sols hydromorphes occupent les vallées et les plaines. Ils sont essentiellement consacrés à la riziculture de submersion à cause de leur faible perméabilité. Ils ont des propriétés physiques assez diverses, asphyxiantes entre autres, mais au point de vue chimique, ils sont les mieux adaptés aux céréales qui sont en général très exigeantes en azote. En effet,

du fait d'un approvisionnement continu de ces sols en matériaux d'érosion, ils profitent du départ des éléments fertilisants des sols situés en amont, pour le renouvellement de leur fertilité. Ces sols sont presque tous exploités sur les hautes terres. Toutefois, il existe depuis quelque temps une tendance à prendre en considération : la perte de surface de culture pour diverses raisons telles qu'ensablement, détérioration des infrastructures hydro-agricoles ..., et une tendance qu'il convient d'ajouter aux éléments servant à l'analyse de la situation. L'évolution de la surface rizicole dans la région périphérique d'Antananarivo dénote cette situation (tab n°4) qui reste, au stade actuel, très peu sensible par rapport à l'ensemble de la province.

Tableau n°4 : Evolution de la surface rizicole de 1997 à 1999 (Annuaire des Statistiques agricoles, 1999)

Superficie (ha)	1997	1998	1999
Antananarivo et alentours	20 650	21 150	20 450
Ensemble de la province	188 265	193 375	194 310

1.2. Les évolutions techniques de la riziculture

Les conditions actuelles de production découlent d'une longue histoire de mutation technique et sociologique. L'ensemble de ces changements a façonné de manière significative le modèle de production des hautes terres, donnant à celui-ci un caractère particulier. Pour pouvoir conceptualiser cette spécificité, il faut retracer les évolutions des techniques rizicoles au cours du temps.

1.2.1. La riziculture de submersion

Ce type de riziculture est historiquement lié à l'arrivée du riz sur les bas fonds. Ce choix est loin d'être en relation avec la parenté malayenne du peuplement merina. Tout au début, les gens exploitaient les collines. Plus tard, ces sols ferrallitiques dessaturés, initialement occupés par les forêts, n'étaient plus suffisamment fertiles pour accueillir de nouvelles cultures. Les phénomènes d'érosion aidant, les éléments nutritifs sont entraînés par la pluie vers les zones situées en contre bas désormais plus riches, et partant, plus productives une fois aménagées. La fertilité y est renouvelée d'une façon régulière par l'érosion des collines environnantes.

Deux autres impératifs s'imposaient aux responsables de l'époque :

- Le pâturage qui, au début était représenté par les tanety, devenait un souci majeur avec la perte de fertilité de ces sols,
- Les cultures sèches, en complément du régime alimentaire de l'époque, devaient également faire face au problème de fertilité.

Des résolutions ont été prises : les zébus ont été envoyés du côté d'Ankazobe, à 100 km au Nord de la capitale, où la pression démographique était relativement faible, et l'espace plus vaste. Avec cette décision, il était difficile de récupérer la poudrette utilisée comme amendement organique. En conséquence, une autre modification s'avérait nécessaire, en particulier l'apport en localisation de l'amendement pour concentrer la fertilité autour de la culture.

Sur les bas fonds, constitués essentiellement de sols à caractère tourbeux et riches en matière organique à cette époque, le problème de fertilité ne se posait pas de façon aussi nette que sur les tanety. De plus, le riz s'adaptait bien aux conditions existantes.

1.2.2. La riziculture de bas fond sans submersion (cas du SRI)

Actuellement, plusieurs études ont été menées sur les mécanismes aboutissant aux résultats « spectaculaires » obtenus avec le SRI. Les études préliminaires réalisées sur ce système ont établi six (06) variables du rendement (Joelibarison, 1998) :

- l'âge des plants
- le nombre de brin par touffe
- la maîtrise de l'eau
- l'écartement
- les sarclages répétés
- l'utilisation du compost ou d'amendement organique

1.2.2.1. Repiquage de jeunes plants à un brin

Le SRI préconise le repiquage de jeunes plants afin de limiter les conséquences des traumatismes de la transplantation et les pertes de rendement faisant suite à cela. En effet, avant que le tallage ne commence, stade qui coïncide avec le début de fonctionnement du système photosynthétique, la plante se nourrit des réserves du grain et peut supporter un bref stress provoqué par la transplantation. Par ailleurs, la reprise des fonctions physiologiques de la plante s'effectue assez rapidement. De plus, le plant garde tout, ou une partie importante, de son potentiel de production car les premières talles n'ont pas été affectées par la transplantation.

Dans les techniques culturales proposées par le SRI, le repiquage est effectué à un brin. Cela évite l'encombrement des racines au cours du développement de chaque brin de la touffe et permet de profiter pleinement du potentiel de rendement du brin (cf. 1.1.3) qui à lui seul peut donner plus de 80 talles, en conditions optimales. Il faut également signaler l'économie de semence réalisable avec le SRI, que l'on peut attribuer à la fois à un nombre réduit de plant au repiquage, et à une faible densité de plantation.

1.2.2.2. Ecartement et sarclages répétés

Avec la technique du SRI, on observe à la fois un grand développement des organes aériens et racinaires. Aussi un grand écartement entre les plants leur assure, d'une part, un grand volume de sol exploitable par les racines et, d'autre part, un espace suffisant pour le développement de leurs organes aériens. Cela se traduit par une plus grande exposition à la lumière et par conséquent une plus grande aptitude à la photosynthèse, élément fondamental de toute production végétale. En effet, par ce système, les feuilles captent mieux l'énergie solaire qu'elles transforment ensuite en énergie chimique (hydrates de carbone). Cette dernière vient ensuite s'accumuler dans les organes de réserves pour former finalement le rendement.

Le choix de l'écartement doit résulter de la connaissance de l'état de fertilité du sol et de l'évaluation de la compensation des pertes dues à l'espace, et les gains résultant du développement des talles : il faut former au minimum 250 à 300 panicules au mètre carré. En effet, un sol riche semble permettre le recours aux grands écartements car les réserves en

éléments nutritifs du sol peuvent subvenir aux besoins de chaque plant. Par contre, les sols pauvres doivent être valorisés par une plus forte densité. Une fois le bon écartement défini, la compétition pour la lumière ne se pose plus entre les plants de riz et il s'ensuit une bonne végétation de la plante.

Le sarclage permet de lutter contre les mauvaises herbes qui font concurrence au riz notamment pour les éléments fertilisants. L'avance donnée au riz lors de la transplantation doit être préservée pour éviter, en premier lieu, l'étouffement des plantules (durant la première semaine suivant le repiquage), et ensuite, l'envahissement des interlignes par les mauvaises herbes qui retrouvent des conditions idéales pour leur développement. Lorsque le sarclage est effectué à la houe sarcleuse, il semble apporter un effet d'aération de la couche superficielle du sol par action de léger émiettement de la surface et d'incorporation d'oxygène.

1.2.2.3. Maîtrise d'eau et amendement organique

a. Un niveau minimum d'eau

Le régime de l'eau est réglé de manière à garder un minimum d'eau au niveau de la parcelle pendant la phase végétative. Avec la riziculture traditionnelle, les effets de la submersion sur les racines de la plante se sont avérés néfastes pour leur développement : ces effets peuvent être une formation de couche ferrique sur les racines contribuant à un antagonisme avec l'absorption du phosphore, une faible elongation racinaire par hypoxie (Kramer, 1965 cité par Joelibarison, 1998), une dénitrification et une formation d'oxydes d'azote toxiques, une acidification du milieu par équilibre des charges après absorption de l'ion ammonium (Heller et Lance, 1998) La connaissance de ces effets a conduit à l'adoption du système de contrôle du niveau d'eau suivant :

- Pendant la phase végétative, la rizière est maintenue humide. La nuit, une mince couche d'eau est maintenue sur la parcelle mais elle est retirée dès le lendemain matin ;
- A partir de la montaison jusqu'au début de la maturation, la hauteur de la lame d'eau est ramenée à 10 cm environ, puis on assèche complètement la parcelle quinze (15) jours avant la récolte. Cette dernière pratique permet d'homogénéiser la maturation de toute la récolte.

b. Un recours recommandé aux amendements organiques

Le compost apporte une certaine quantité d'éléments nutritifs à la plante et améliore surtout les propriétés physiques du sol par ses propriétés colloïdales. Cette matière organique non seulement améliore la capacité d'échange du sol, mais stimule également le développement des racines, condition indispensable pour une bonne absorption des éléments nutritifs présents dans le sol. Par ailleurs, le compost est d'une fabrication adaptable aux conditions paysannes (mise en valeur des résidus de récolte...) et n'affecte guère la situation de la trésorerie de l'exploitation.

Une autre propriété du compost et de la fumure organique en général est l'augmentation de la résistance aux attaques d'insectes et de maladies. Cela provient du fait que le métabolisme des plantes soumises aux fertilisations chimiques, élabore davantage de sucres simples (Randriamiharisoa, 1999). Ces derniers favorisent le développement préférentiel des prédateurs et des maladies d'origine bactérienne ou sur les plants. Lorsque la

culture est conduite avec de la fumure organique, à la place des oses simples, des polysaccharides sont synthétisés dans la plante. Ces substances complexes n'ont pas le même effet attracteur que les sucres simples. Les essais de SRI menés dans le Centre Baobab de Morondava ont confirmé cette propriété. A l'issue de l'infestation de pourriture de la gaine foliaire, les parcelles traitées au compost se révélaient plus résistantes (Rajaonarison, 2000).

1.2.3. Les cultures pluviales : « tavy » ou plaine sèche

La riziculture, bien que pratiquée au tout début sur brûlis sur les hautes terres, a vécu une grande partie de son histoire en terrains submersibles (Raison, 1991). La double riziculture n'a pas été possible du fait des problèmes liés au climat, dont la baisse de la température et le manque d'eau.

Les « tavy » au sens d'abattis brûlis n'existent pratiquement plus dans la province d'Antananarivo. En fait, la disparition des formations forestières en est la raison principale. Les cultures pluviales sur plaine sèche se rencontrent surtout dans le moyen ouest. Elles dépendent largement de la répartition des précipitations annuelles.

1.3. Les raisons de ces évolutions

Pour essayer de comprendre les raisons qui ont motivé ces évolutions, il faut tout d'abord retracer les étapes franchies.

1.3.1. Les étapes des évolutions

Comprendre l'évolution des techniques culturales est une étape essentielle dans la définition d'une stratégie de développement de la production agricole. En effet, les changements ont dû s'opérer sous l'action résultante de toutes les contraintes en présence. Cette évolution décrit également une sorte de cheminement obligatoire auquel il faut trouver une alternative viable afin de renverser la tendance.

1.3.1.1. Les évolutions par rapport au calendrier cultural

Les conditions topographiques et climatiques locales ont déterminé deux types principaux de culture :

- Le « vary aloha » : semé en Avril-Mai, repiqué entre Août et Octobre suivant les conditions de température, est récolté en Janvier-Février. Ce type sert d'appoint pendant les périodes critiques mais ne suffit pas pour tenir une année (on dit toujours « ny vary aloha mahavonjy fa tsy mahavita taona ») ;
- Le « vary vakiambiaty » : semé en Septembre-Octobre, repiqué entre Novembre et Décembre, est récolté en Avril-Mai. Il constitue la plus grande moisson de l'année mais la réussite dépend de la pluviométrie, en absence de réseau d'irrigation performant.

Le calendrier cultural de ces types principaux est présenté dans le tableau n°5 :

Tableau n°5 : Calendrier rizicole (*)

Opérations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Semis				O	O					X	X	X

Préparation du sol							O	O	X	X	X	
Repiquage	X							O	O		X	X
Désherbage		X	X									
Récolte	O	O		X	X							

(*)O pour le « vary aloha » et X pour le « vary vakiambiaty »

1.3.1.2. Les évolutions par rapport aux techniques de production

Ces deux (02) types sus-mentionnés se subdivisent ensuite, suivant le niveau de technicité de chaque exploitant agricole, et la stratégie de production, en :

a. Riziculture traditionnelle

La principale caractéristique de cette méthode est le repiquage de plants âgés de plus de un (01) mois, suivant une disposition aléatoire et avec une densité à l'hectare assez élevée. Le riz pousse alors sous une lame d'eau, de plus d'une dizaine de centimètres de hauteur, pendant tout son cycle de développement. Les entretiens des cultures sont assez simplifiés dans cette option, nombre réduit de sarclage par exemple. Du fait du minimum de dépenses occasionnées par sa culture, les paysans l'adoptent pour minimiser les risques de pertes en cas d'intempéries ou de mauvaise récolte ;

b. Riziculture améliorée (SRA)

Elle a été lancée avec l'Opération Productivité Rizicole (OPR) sous la Première République. Cette nouvelle orientation est basée sur des innovations de la précédente méthode et introduit la notion de transplantation en ligne qui offre un plus grand espace au riz, et permet de produire un nombre plus important de talles. En plus, une interligne régulière suivant une direction est recommandée pour faciliter le passage de la houe sarclouse. Bien que le recours aux engrais minéraux y soit recommandé, seule une fraction des agriculteurs peut financièrement supporter les dépenses y afférentes (tab n°6). De plus, le niveau global d'investissement requis limite cette technique à une frange de riziculteurs beaucoup plus fortunés.

Tableau n°6 : Importance de l'utilisation de deux formes de fumure dans la province d'Antananarivo (adapté de Place, 1991 ; Projet MADIO, 1999)

	Fumier de ferme ^(a)		Engrais chimiques (NPK)	
	Dose moyenne (t/ha)	Taux d'utilisation (% d'exploitations agricoles)	Dose moyenne (kg/ha)	Taux d'utilisation (% d'exploitations agricoles)
Riz	5,2	51,4	109,7 ^(b)	24,5
Autres	6,2	86,6	35,1	38,0

(a) *Aucune distinction n'a été faite entre le fumier de ferme et la poudrette de parc*

(b) *La dose recommandée pour les rizières étant de 300 kg/ha de 11.22.16 (Programme Engrais malagasy)*

1.3.2. La correspondance entre le SRI et ces évolutions

Au cours des siècles passés, les évolutions sont parties de la maîtrise de l'espace agricole (aménagement de nouveaux espaces cultivables), à la maîtrise des conditions climatiques de culture (adaptation des calendriers cultureux en vue de deux cycles de culture par an) et finalement à la maîtrise de la technique (intensification, principalement).

Toutefois, bien qu'il y ait eu effectivement évolution au niveau de ces trois paramètres, la quantité de riz produite reste toujours inférieure aux besoins, notamment à partir des années 80. La disponibilité en riz par habitant a chuté de manière dramatique entre les années 70 et la fin des années 90 comme le montre le tableau n°7.

Tableau n°7 : Evolution de la disponibilité en riz par habitant pour 1970, 1990 et 1998 (adapté de Fanjanarivo, 1998 et Andrianarisoa, 1998)

Années	1970	1990	1998
Disponibilité par habitant	150	141	114
Autosuffisance en riz du pays	49 semaines	45 semaines	Moins de 40 semaines

En dépit des évolutions techniques, le niveau du rendement a pratiquement stagné. L'augmentation de la production a été surtout due à l'extension des surfaces cultivées. Pourtant, le critère rendement a permis la révolution verte dans les pays asiatiques : l'exemple de la Chine est le plus frappant avec une augmentation du rendement de 2 t/ha vers les années 60 à 6 t/ha actuellement (Wybrecht, 1998). Ce qui fait de ce pays un grand exportateur de riz.

Dans ce domaine des changements de pratiques, des exemples d'autres pays peuvent être cités. C'est le cas notamment des Etats-Unis, et de l'Egypte. L'augmentation rapide de leur production est notamment liée à la maîtrise de l'eau. Pour l'année 1999, l'Egypte a dégagé un surplus de plus de 1 million de tonnes de riz.

1.3.3. La peur de la dégradation des rizières par l'utilisation des intrants chimiques

Les connaissances actuelles sur les effets des engrais chimiques renseignent sur les risques que cela peut engendrer. Il est révélé que ces engrais ont un effet sur la composition microbienne du sol. De plus, si leur application n'est pas raisonnée, il y a un risque de destruction de la structure du sol, de pollution de la nappe phréatique ou de volatilisation de l'azote (cas des nitrates en sols réducteurs).

De leur côté, les paysans ont vécu l'expérience d'un durcissement du sol après applications répétées de ces engrais. Actuellement, une partie de la population rurale reste toujours sceptique quant à l'utilisation de ces produits. Par contre, ils se contentent d'adopter le fumier qui est souvent en quantité limitée, mais assure quand même une viabilité aux rizières. D'ailleurs, les paysans ne peuvent pas prendre le risque d'une perte de sols cultivables car jusqu'à maintenant, il s'agit des seules ressources disponibles.

1.4. Le SRI : Proposition technique

Le SRI a été proposé par le Père de Laulanié vers le milieu des années 80. Parti du modèle de tallage de KATAYMA, qui explique le mécanisme et la chronologie de la formation des talles à partir d'un brin de riz repiqué, il est arrivé à une combinaison de facteurs capables d'apporter aux producteurs de riz une augmentation importante du rendement (Mada économie, 1995). Cette technique, connue aussi sous l'appellation locale « vary maro anaka », a été vulgarisée auprès des producteurs dans les différentes zones d'intervention du missionnaire et, par la suite, reprise et vulgarisée par des organismes de développement aussi bien nationaux qu'internationaux (Association Tefy Saina, CIIFAD ...).

1.4.1. Internationalisation du SRI

Le SRI est maintenant sur le point de vivre une expérience unique en son genre. Si la tendance actuelle se confirme, le SRI risque d'apporter un effet de bouleversement dans le cercle rizicole mondial. Non seulement ses principes semblent déroger aux concepts acquis depuis, mais ses possibilités iront peut-être au-delà des limites actuellement admises.

1.4.1.1. Le début d'une franche collaboration avec l'Université de Cornell

Au vu des résultats acquis avec les essais SRI à Madagascar depuis 1994, ce système a pris une dimension internationale avec le raffermissement de la collaboration entre l'Université de Cornell (Yathaca, NY) et l'Association Tefy Saina. Le CIIFAD, institut de recherche de cette université américaine, l'a intégré dans ses programmes de recherche pour le développement rural à Madagascar. Les efforts ont été axés sur les fondements scientifiques de ce système. Des essais ont été réalisés afin de vérifier les hypothèses de départ apportées par De Laulanié. Et petit à petit, les hypothèses ont cédé la place à la connaissance. Dès lors, une nouvelle ère s'ouvre au SRI.

1.4.1.2. Les publications à l'échelle internationale

D'abord, des œuvres du Père De Laulanié ont été traduites en anglais et publiées dans la revue scientifique « Tropicultura ». De son côté, le CIIFAD, à travers son Directeur Norman Uphoff, a continué de publier les résultats annuels du SRI dans son « Annual Report ». Cette diffusion a permis à certains pays de s'intéresser davantage à ce système. Il s'agit notamment de pays asiatiques à économie basée, pour une large part, sur le riz.

Progressivement, les échanges se sont multipliés entre ces différentes entités : d'un côté, des malgaches étaient partis à l'étranger pour parler du SRI et, de l'autre côté, des scientifiques d'outre mer étaient venus à Madagascar pour voir le SRI. Actuellement, le SRI est déjà publié en français, en anglais et quelques documents sont également traduits en espagnol et en portugais. Bientôt, le SRI va emprunter la voie de la technologie de pointe par une diffusion sur internet à travers une page Web spécial SRI.

1.4.1.3. Le SRI : convoité partout

Plusieurs pays ont déjà manifesté leur intérêt pour ce système : Cambodge, Chine, Philippines, Indonésie, Sri Lanka, Thaïlande, Bangladesh, Cuba, Sierra Leone, Gambie, Côte

d'Ivoire ... et même les Etats-Unis où un des plus grands groupes semenciers s'est lancé dans le SRI à titre d'essais. Il faut citer parmi ces pays asiatiques, quelques pays qui viennent justement d'achever leur « révolution verte » et qui se lancent déjà dans cette perspective du SRI. Pourtant, ces pays ne souffrent pas apparemment de la faiblesse des rendements comme pour le cas de Madagascar (tab n°8). De plus, certains d'entre eux ont même un surplus rizicole net exportable, pour ne citer que le cas de la Thaïlande dont le fameux riz Thaï inonde le marché céréalier de la plupart des pays du tiers monde.

Tableau n°8 : Niveau de rendement en paddy de quelques pays asiatiques (Uphoff, 2001)

Pays	Rendements moyens nationaux (t/ha)	Rendements réalisés en SRI (t/ha)
Chine	6,0	9,2 – 10,5
Indonésie	4,2	6,8 – 9,5
Philippines	2,8	4,95

1.4.2. Les fondements biologiques du SRI

L'étude des mécanismes physiologiques du riz en SRI aide à la compréhension de l'accroissement du rendement. Le principe de base repose sur l'expression plus ou moins complète des potentialités de la plante par la réunion des conditions favorables à son développement.

1.4.2.1. La physiologie du riz

La connaissance de la physiologie du riz est l'élément scientifique commun de départ de toute proposition d'amélioration des performances technique et économique des riziculteurs. Combinée aux pratiques en cours et aux conditions de production, elle apporte une bonne évaluation des méthodes actuelles.

Au cours de son développement, le riz présente deux stades bien distincts :

- Le stade végétatif au cours duquel le riz constituera son appareil végétatif (racines, tiges et feuilles)
- Le stade reproducteur pendant lequel le plant de riz mettra en place les organes de réserves qui feront l'objet de la récolte.

Ces deux stades végétatifs sont à la base de l'élaboration du rendement. En principe, la durée du stade reproducteur reste toujours la même pour les différentes variétés de riz et pour les différentes techniques de production, mais la différence réside surtout au niveau de la phase végétative (Yoshida, 1985).

1.4.2.1.1. Le stade végétatif

Il constitue la première étape de développement du riz. Dans le cas particulier de la pratique du repiquage, cette phase est d'une importance capitale, du fait que l'optimisation du tallage, recommandée pour compenser la perte de rendement due à une plus faible densité de plantation, ne sera possible que par une bonne végétation. Le stade végétatif comprend les différentes phases de la levée à la fin du tallage.

a. La levée :

Les conditions de la levée revêtent une importance capitale dans la mesure où celles-ci détermineront la vigueur des plants. Une étude plus approfondie lui sera alors consacrée afin de définir les meilleures conditions pour la germination des semences.

Cette première étape correspond normalement à l'émergence de la coléoptile hors de la surface de la terre (pépinière en milieu exondé) ou de l'eau (pépinière submergée). De ce fait, elle succède directement à la période de la germination laquelle se matérialise par la formation de la coléoptile. Cette germination se réalise sous l'effet conjugué de l'eau, de la température et de l'oxygène. Toutefois, pour les grains de riz, elle ne nécessite que peu d'oxygène par rapport aux autres plantes (Angladette, 1966). Au cours de cette période, la reprise des phénomènes métaboliques au sein du grain s'accompagne de l'activité de nombreuses enzymes. Par ailleurs, il a été remarqué que l'activité enzymatique est plus élevée lorsque le grain est placé en terre humide qu'en terre submergée. Ce qui confirme le besoin en oxygène au cours de la germination. Par ailleurs, la jeune plantule formée en absence d'oxygène présente davantage d'anomalies.

Etant donné que la jeune plantule ne dispose pas encore d'un appareil photosynthétique capable de lui fournir tous les éléments nécessaires à son développement, le plant de riz assure le développement de ses organes et ses besoins nutritionnels par l'utilisation des réserves contenues dans le grain. La contribution de la photosynthèse dans la croissance de la plante, au cours des premières semaines après la germination, permet de mieux conceptualiser cette notion (tab n°9). Proportionnellement au pourcentage de la photosynthèse au cours la croissance de la plantule, l'importance des traumatismes qui peuvent survenir augmente au fur et à mesure que l'âge au repiquage est plus élevé. Par ailleurs, les organes qui se sont formés avant la transplantation dégénèrent pour permettre la formation de nouveaux organes, une fois un certain stade de croissance écoulé (Centre FAFIALA, 1993).

Tableau n°9 : Pourcentage de la croissance dû à la photosynthèse (adapté de Yoshida, 1981)

Période considérée	Part de la photosynthèse dans la croissance (% de la croissance)
1 ^{ère} semaine après la germination	30
2 ^{ème} semaine après la germination	84
3 ^{ème} semaine après la germination	100

En général, le jeune plant se développe totalement à partir des réserves de la graine pendant les cinq premiers jours. A partir du dixième jour, la plantule peut être totalement sevrée de ses réserves sans risques majeurs (Angladette, 1966).

La germination est favorisée par la température et l'humidité, mais elle n'est pas influencée par la lumière. En général, une température de 10 à 40°C avec une humidité suffisante favorise ce phénomène. Durant les premières heures, le grain se gonfle rapidement et suivant son taux d'humidité, les différents stades physiologiques vont démarrer (tab n°10). Sur la base de cette connaissance, il est recommandé de tremper préalablement les semences dans de l'eau. Ensuite, les grains sont placés dans un endroit chaud, de préférence près du foyer ou dans un trou, ... avant de les semer. Dans ce cas, l'effet attendu est une anticipation de la germination qui permet de juguler l'éventualité des effets adverses du milieu, et d'aboutir à un taux de reprise de végétation plus important.

Tableau n°10 : Correspondance entre le taux d'humidité des grains et le stade physiologique du grain en germination (adapté de Yoshida, 1981)

Taux d'humidité (%)	Stade physiologique
10 à 30	Imbibition
30 à 35	Activation
35 et plus	Post-germination

L'imbibition correspond à une forte absorption d'eau durant les 18 premières heures suivant l'humectation du grain. Elle est indépendante de la température et peut se réaliser en absence d'oxygène. En effet, il a été remarqué que les inhibiteurs de la respiration n'ont aucun effet sur ce stade (Yoshida, 1981).

L'activation est vitale au développement du grain. Au cours de ce stade se réalisent des changements métaboliques considérés comme la cause principale de la germination (Takahashi, 1965 cité par Yoshida, 1981). Le grain n'absorbe que très peu d'eau par rapport au stade précédent. Par contre, les phénomènes physiologiques qui accompagnent ce stade dépendent de la température. Cela suppose le début d'une activité enzymatique pour l'hydrolyse des réserves. A la fin de ce stade, la coléoptile émerge de la coque.

La post-germination se poursuit par la croissance de la coléoptile et l'apparition de la première feuille. Puis la formation des différentes feuilles de la plantule se réalise dans l'ordre suivant :

- la première feuille apparaît lorsque la coléoptile atteint 1 cm de long ;
- la deuxième apparaît avant la fin de l'élongation de la première ; et
- les autres apparaissent après que les précédentes auront terminé leur élongation.

b. Le stade plantule :

Il couvre la période suivant la levée et jusqu'à la formation de la cinquième feuille. Il peut durer de vingt (20) à vingt-cinq (25) jours à compter de la date de semis. Deux intervalles de temps sont à distinguer au cours de cette période :

- Le premier intervalle précédant la formation de la troisième feuille et au cours duquel le plant se nourrit exclusivement des réserves du grain : les premiers organes végétatifs se forment par l'utilisation de ces substances. L'intérêt immédiat qui en découle est la possibilité de réduction du stress subi par la plante au cours de la transplantation. En effet, il a été constaté que lorsque la transplantation est effectuée à un âge précoce, la reprise est plus rapide, car les mécanismes métaboliques évoluant dans la plante ne dépendent pas des facteurs extérieurs (lumière, éléments nutritifs du sol ...). Il faut ajouter à cela que les jeunes tissus de la plantule se cicatrisent plus vite que ceux des plants beaucoup plus âgés. Toutefois, même si la jeune plantule peut recouvrer des meurtrissures de la transplantation, elle reste vulnérable à la destruction de ses organes. Aussi, des précautions doivent-elles être prises pour s'assurer que la plantule reste toujours dans un bon état général. A ce titre, il faut veiller à ce que le repiquage soit effectué très peu de temps après le départ en pépinière des plants de riz.
- Le deuxième intervalle à compter de la formation de la troisième feuille où l'appareil photosynthétique du plant de riz devient entièrement fonctionnel et autonome : la plantule est alors capable de subvenir à ses propres besoins. Les réactions de synthèse organique régissent alors définitivement la vie de la plantule. Il

s'agit de la photosynthèse qui assure déjà plus de 90% des besoins liés à la croissance au début de la formation de la quatrième feuille (Yoshida, 1981). Le passage de la troisième à la quatrième feuille marque le début d'un phénomène d'une importance capitale pour le riz. En effet, la première talle du brin maître se forme et, se rapportant au modèle de tallage de KATAYMA (cf. 1.2.1.), cette première talle représente une part importante du rendement (39% environ).

c. Le tallage :

Le tallage correspond au phénomène qui permet aux entrenoeuds situés à la base des plants de donner des talles secondaires (six par talle au maximum). Celles-ci se forment de façon concentrique et suivant une direction centrifuge. Chaque talle formée devient, par la suite, génératrice d'autres talles. Dans le cas particulier de la pratique du repiquage, cette phase est d'une importance capitale. En fait, l'optimisation du tallage, recommandée pour compenser la perte de rendement due à une plus faible densité de plantation, ne sera possible que par une bonne végétation.

Le tallage peut être affecté par plusieurs facteurs tels que la lumière, la chaleur, la richesse du sol en éléments fertilisants. Si une compétition pour l'un ou plusieurs de ces facteurs se pose entre les plants de riz, le tallage s'en trouve affecté plus ou moins sévèrement suivant leur degré d'incidence du ou des paramètres concernés.

1.4.2.1.2. Le stade reproducteur

Ce stade débute au moment de l'initiation paniculaire. Il comprend les différentes phases suivantes :

- l'initiation paniculaire,
- la montaison,
- l'épiaison,
- la floraison,
- la maturation

a. L'initiation paniculaire :

Cette phase débute avec la formation de l'ébauche de la panicule au niveau du nœud supérieur de la talle. Elle est difficile à reconnaître à l'œil nu : seules des observations fines au microscope permettent d'identifier les primordia paniculaires. Cependant, des signes externes particuliers l'accompagnent, comme le début de l'élongation des chaumes qui se poursuit jusqu'à l'épiaison.

b. La montaison :

Elle est caractérisée par le gonflement de la tige par suite de la formation et de la migration des organes de réserves. A ce stade, la feuille paniculaire est déjà entièrement formée. La montaison est plus visible que la phase précédente, et est souvent utilisée par les paysans comme référence pour identifier le début de la phase reproductive. Elle marque également un changement dans le mode de gestion de l'eau. En effet, entre la montaison et début de la maturation, la rizière reçoit davantage d'eau pour assurer une bonne circulation des réserves qui viennent s'accumuler dans les grains.

c. L'épiaison :

L'épiaison se matérialise par l'émergence de la panicule de la gaine. En pratique, elle est assimilée à l'émergence de la moitié des panicules et s'effectue pendant une période de dix (10) à quatorze (14) jours, variable suivant la vitesse d'émergence des panicules et le nombre de plants. Si le tallage est moyen, les panicules d'une même touffe émergent de façon plus ou moins simultanée, mais dans le cas d'un important tallage, elles apparaissent successivement et en direction centrifuge. L'épiaison exige une moyenne de température de 22°C. Parfois, les dernières talles formées sont stériles. De l'initiation paniculaire à l'épiaison, on compte en général trente (30) jours (Yoshida, 1981).

d. La floraison :

Au cours de cette phase s'effectue l'anthèse : les glumelles s'écartent, permettant la sortie des étamines. L'anthère s'ouvre par la suite et la pollinisation s'effectue durant les heures qui suivent. Il s'ensuit une fermeture de la glumelle laissant les étamines à l'extérieur où ils se dessèchent et tombent. Au sein d'une panicule, l'anthèse dure sept (07) à dix (10) jours. En région tropicale, elle s'effectue le matin (de 8.00 à 13.00), et rarement l'après-midi, sauf si la température est basse en début de journée ; dans ce cas l'anthèse peut se poursuivre jusqu'à une heure tardive de la journée.

e. La maturation :

Les grains se remplissent et acquièrent leur maturité en passant du stade laiteux (grain rempli de substance aqueuse incolore) au stade pâteux (grain rempli de pâte molle), et enfin au stade mûr (grain plein et résistant). Arrivé à ce dernier niveau, le poids des grains fait incurver la panicule. Ce signe est très utilisé par les producteurs pour déterminer la période de récolte, qui se situe quelques jours après. La maturation des grains dure environ trente (30) jours (Yoshida, 1981) et peut être activée par l'assèchement des rizières. La maturation est identifiable au jaunissement de l'extrémité de la feuille paniculaire et du rachis, ainsi que des glumelles, en commençant par les épillets supérieurs. Une fois ce stade atteint, la rizière prend une couleur dorée caractéristique.

1.4.2.2. Les perspectives biologiques offertes par le SRI

En se référant à la seule augmentation du rendement en SRI, il paraît assez prétentieux de parler de « miracle » proprement dit. Cependant, les résultats capitalisés permettent d'avancer de nouvelles perspectives qui sont en discordance, même « partielle », avec les notions antérieures en la matière. Des connaissances antérieures énoncent clairement une corrélation négative entre le nombre de talles et celui des grains par panicule. Or, dès les premiers essais expérimentaux, le fait contraire a été observé avec une corrélation positive de 0.65 (Joelibarison, 1998). Autrement dit, la plante donne davantage de panicules même avec un nombre important de talles.

a. Stimulation des activités microbiennes dans le sol

Le sol contient une multitude de microorganismes qui peuvent être favorables ou pathogènes aux plantes. En général, cette microflore est classée en deux catégories (Girard et Rougieux, 1963) :

- la microflore zymogène (les saprophytes et les parasites) pour laquelle le sol n'est qu'un substrat en attendant de meilleures conditions d'existence ;
- la microflore autochtone (les hétérotrophes et les autotrophes) qui participe activement dans les grands cycles bio-géochimiques du sol.

La microflore autochtone intéresse davantage le SRI. En effet, si ces mêmes microorganismes se développent de façon optimale dans le sol, ils seraient capables de mettre à la disposition de la plante une quantité de plus en plus importante d'éléments fertilisants. L'objectif est donc de rassembler ces conditions dans le sol des rizières par la mise en œuvre de différentes pratiques culturales. Cependant pour y arriver, il faut comprendre leur métabolisme et leur dynamique d'évolution dans le sol.

Les microorganismes peuvent utiliser la matière organique du sol. Ils la dégradent plus ou moins rapidement (glucides, protides) ou très lentement (lignines, phénols, paraffines, cellulose ...). Toutefois, la nature de la substance organique en présence a un effet de sélection sur les microorganismes. Ces derniers peuvent intervenir, soit directement en transformant la matière organique, soit indirectement par les actions enzymatiques. Au point de vue importance, ils représentent en moyenne 2 à 5% de la matière organique totale du sol, mais cette proportion peut augmenter considérablement après l'introduction de matière organique fraîche très fermentescible et riche en azote (Duchaufour, 1997)

Les bactéries, fraction importante des microorganismes responsables de la dégradation de la matière organique, se développent mieux en milieu peu acide et riche en azote, pour la plupart. Elles se trouvent en abondance autour des racines de certaines plantes (graminées, légumineuses). Par ailleurs, le compost véhicule aussi un nombre, actuellement non quantifié, de microorganismes, et apporte en même temps une quantité d'éléments fertilisants, variable suivant les matières premières utilisées pour sa fabrication et les conditions de compostage. Ces éléments, complexés sous différentes formes dans le sol, vont être libérés progressivement et servir aux besoins de la plante.

Un autre grand avantage de l'amendement organique résulte du fait que, au cours de la dégradation de la matière organique, il y a élaboration d'acides aminés et de substances de croissance utilisables par les microorganismes du sol (Mustin, 1987). Cela a un effet immédiat sur la population microbienne du sol qui se retrouve très vite redynamisée. Pour l'heure, toute affirmation sur la nature des relations entre la population microbienne du sol et la plante doit être relativisée faute de connaissances approfondies dans ce domaine.

b. Fixation biologique de l'azote

Elle fera l'objet d'une partie à part entière (cf. Partie 3).

1.4.3. Les critères d'évaluations de bons rendements

Pour sa part, le SRI s'appuie sur un bon développement des talles pour assurer une production optimale. Ceci s'accompagne naturellement d'un fort enracinement du plant de riz

qui développe un vaste réseau de système racinaire (Joelibarison, 1998). Il en découle que les plants de riz s'y rapportant ont de meilleures conditions de nutrition.

1.4.3.1. Un bon développement des talles

Le tallage est un des critères essentiels pour l'élaboration du rendement. Ceci résulte du fait que la quantité de panicules formées va dépendre de l'importance et de la fertilité des talles, lesquelles panicules vont constituer plus tard le rendement. La morphologie des tiges montre une série de six nœuds rapprochés situés à la base, et de six autres nœuds plus distancés en hauteur. Les talles prennent naissance à partir de chaque nœud basal du brin considéré. Parallèlement à cette formation des talles, des racines partent également des nœuds et alimentent la partie de tige correspondante. Par conséquent, chaque talle formée peut être à l'origine d'autres nouvelles talles et ainsi de suite jusqu'à l'arrêt du tallage. Toutefois, le tallage est précoce pour le riz en semis direct car la croissance est continue, et entraînant un nombre réduit de talles, environ 2 à 5 (Yoshida, 1981) alors qu'il a une signification particulièrement importante en riz repiqué, et même davantage en SRI. En effet, il est préconisé de repiquer le riz suivant des dispositions spatiales régulières, de 20 à 30 cm et parfois plus entre les plants, suivant deux directions orthogonales. Mais cette technique entraîne une diminution de la densité de plantation qui devra être compensée par un plus grand nombre de talles, si l'on espère obtenir u moins le même rendement en riz. Cette importante formation de talles requiert, en principe, une quantité considérable d'éléments fertilisants dont l'azote en particulier. Le tallage étant principalement actif à partir du repiquage, cela justifie l'apport d'engrais immédiatement après la transplantation afin de mieux pourvoir aux besoins du riz.

Le modèle de KATAYAMA apporte une compréhension du tallage en fonction du nombre de phyllochrone ayant affecté le brin principal (tab n°11)

Tableau n°11 : Modèle de tallage de KATAYAMA

Phyllochrone	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
Brin principal		1												1
Talles 1 ^{er} rang					1	1	1	1	1	1				6
Talles 2 ^{ème} rang							1	2	3	4	5	6	5	26
Talles 3 ^{ème} rang									1	3	6	10	15	35
Talles 4 ^{ème} rang											1	4	10	15
Talles 5 ^{ème} rang													1	1
Total	0	1	0	0	1	1	2	3	5	8	12	20	31	84
Talles formées à chaque phyllochrone	0	1	1	1	2	3	5	8	13	21	33	53	84	

Le phyllochrone correspond à l'intervalle de temps entre l'apparition de deux feuilles de même rang sur le brin principal. La vitesse de formation de ces feuilles est en relation

étroite avec la température. Il faut en général une certaine somme de température pour développer entièrement une feuille. Toutefois, elle est variable suivant le stade de développement (cf. tab n°12). De la même façon, la durée de formation d'une feuille est variable suivant les conditions locales de température.

Tableau n°12 : Température totale requise et durée moyenne pour la formation d'une feuille (adapté de Yoshida, 1981)

Stade physiologique	Stade végétatif	Stade reproducteur
Température totale (°j)	100	170
Durée moyenne (j)	4 à 5	7 à 8

Le SRI préconise une transplantation avant l'apparition du troisième phyllochrone (Joelbarison, 1998) afin d'éviter la perte des talles de premier rang qui représentent une part importante de la production potentielle d'un plant de riz. D'après le modèle de KATAYMA, les trois premières talles du brin maître comptent respectivement pour 39, 25 et 15% du nombre potentiel de talles issues du brin principal (tab n°13). Cela est particulièrement courant pour les plants âgés de plus de vingt (20) jours au repiquage, et pour lesquels les deux talles de premier rang se dégénèrent après le repiquage.

Tableau n°13 : Nombre théorique de talles portées par chaque talle du brin principal (Centre FAFIALA, 1993)

Talles du brin principal	1	2	3	4	5	6
Talles totales portées	33	21	13	8	5	3
Talles (%)	39.75	25.3	15.66	9.63	6.02	3.64

Au cours du tallage, les produits photosynthétiques de la tige principale peuvent être acheminés vers les jeunes talles, sous certaines conditions. En principe, cette disposition permet aux talles nouvellement formées de constituer les organes dont elles ont besoin (racines, tiges et feuilles). Puis, elles deviennent photosynthétiquement indépendantes, et ce, surtout à compter de la fin de tallage. Il s'ensuit qu'un fort développement du tallage entraîne assez souvent un certain nombre de talles stériles, lesquelles n'ont pas pu former les organes leur permettant d'être indépendantes.

La morphologie de chaque talle est très révélatrice des fonctions assurées par chaque élément constitutif :

- Les six entrenœuds à la base donnent naissance aux racines et constituent aussi le point d'insertion des talles ;
- Les six entrenœuds supérieurs donnent les feuilles, dont les trois supérieures, appelées centre actif assurent en grande partie la production de matière sèche pour les panicules, alors que les autres feuilles à la base fournissent les éléments nécessaires à la nutrition du système racinaire.

1.4.3.2. Une prolifération racinaire

Avec cette nouvelle façon de gérer l'eau (cf. 1.2.2.3. a), les racines reçoivent de l'air en quantité suffisante. Cet approvisionnement en oxygène est assuré par la succession d'irrigation et de drainage appliquée à la rizière. Pendant l'assèchement, l'eau se retire des macropores et laisse un espace disponible pour l'air. Ce phénomène s'explique par l'effet du

ressuyage. En effet, la pression exercée par le retrait d'eau aspire l'air en surface et entraîne un renouvellement de l'air dans le sol. De plus, le mouvement de l'eau favorise son aération, en apportant une quantité supplémentaire d'oxygène dissous dans le sol.

Etant donné que les racines ont un certain chimiotactisme pour l'oxygène, une plus grande disponibilité de ce gaz leur permet d'explorer tout le volume de terre à leur disposition, et de profiter en conséquence de toute la richesse du sol. De plus, avec l'absence de déformation des tissus du cortex racinaire, pour le cas du riz en submersion, l'absorption de certains éléments, dont phosphore notamment, est plus facile. En effet, la submersion continue entraîne la formation de gaine ferrique autour des racines. Cette gaine fixe le phosphore et empêche son absorption par les racines. Etant donné le rôle du phosphore sur les racines (cf. 1.4.3.3.b.), il s'ensuit une meilleure prolifération de celles-ci.

1.4.3.3. Une bonne nutrition des plants

La nutrition se définit comme le mécanisme qui permet à la plante de trouver, dans son environnement, et d'absorber les éléments nécessaires à sa croissance et son développement (De Datta, 1981). Ce sont des substances que la plante est incapable de synthétiser mais qui lui sont indispensables. Plusieurs éléments entrent dans cette catégorie, mais trois d'entre eux intéressent les producteurs : l'azote, le phosphore et le potassium (tab n°14). Etant donné leur importance pour la production, il faut s'efforcer, au moment opportun, d'apporter ces éléments à la plante, en quantité suffisante et sous leur forme assimilable.

Tableau n°14 : Quantité d'éléments majeurs exportés par niveau de rendement (RAZAFIMAHERY, 1976)

Eléments fertilisants (en kg/ha)	Récolte de 3 t/ha	Récolte de 6 t/ha	Récolte de 9 t/ha
AZOTE (N)	50 – 60	100 – 130	150 – 190
PHOSPHORE (P ₂ O ₅)	25 – 30	55 – 60	80 – 90
POTASSIUM (K ₂ O)	55 – 110	110 – 230	165 – 340

Pour le cas des végétaux, la nutrition est en relation directe avec la photosynthèse. Cette dernière leur permet de produire de la matière sèche par la transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique et l'absorption des éléments minéraux dans le sol.

Pour le riz, cette production de matière sèche diffère suivant les stades de développement, et ainsi, la nutrition minérale présente aussi des différences notables. A partir de cette notion, il sera plus aisé de répondre au mieux aux besoins de la plante par des techniques d'apports fertilisants plus appropriées.

a. La nutrition azotée :

L'azote est nécessaire pour :

- produire suffisamment de chlorophylle, responsable de la photosynthèse ;
- assurer une croissance rapide des organes végétatifs ; et
- augmenter le taux de protéine dans le grain (caractère nutritionnel intéressant dans un pays où l'essentiel de l'alimentation de la majorité de la population est le riz).

L'azote est requis en quantité importante, surtout au cours de la phase de croissance végétative. La plante en absorbe une quantité importante au début et à la fin du tallage. Ces deux périodes correspondent respectivement à la production de talles et à la production de panicules. L'azote s'accumule alors dans les organes végétatifs. Après la floraison, l'azote suit une translocation des organes végétatifs vers les grains.

La nutrition azotée répond également à un besoin important en protéine par la plante au cours de la croissance végétative. Au cours des stades physiologiques qui suivent, la synthèse de protéine continue, alors que d'autres réactions prennent de l'importance comme la production de cellulose, de lignine et d'amidon, par exemple.

b. La nutrition phosphatée

Le phosphore est d'abord un élément important dans les mécanismes de fourniture et de transfert d'énergie au cours des réactions biochimiques dans la plante. Avec l'azote et le soufre, le phosphore est aussi un composant entrant dans la synthèse des protéines. A ce titre, il est aussi rapidement absorbé par le riz au cours de la phase végétative, puis subit une translocation vers les organes de réserves après la floraison. Le phosphore est un élément doué d'une très grande mobilité dans le riz (De Datta, 1981).

Le phosphore assure également d'autres rôles :

- il stimule le développement des jeunes tissus, en particulier ceux des racines ;
- il stimule aussi la floraison et la maturation en période froide ;
- il favorise le tallage et constitue un élément déterminant dans la reprise des activités métaboliques, après un stress provoqué par les effets adverses des facteurs du milieu ; et
- il favorise le développement du grain et en améliore la qualité (teneur élevée en phosphore)

Au stade plantule, la quantité de phosphore dans la plante augmente au fur et à mesure que la croissance progresse, puis atteint une valeur maximale. Le taux de phosphore dans la plante décroît rapidement après la transplantation. Elle augmente progressivement jusqu'à un maximum, au moment de la floraison, et ainsi jusqu'au stade de grain pâteux. Cela coïncide avec la translocation et l'accumulation d'amidon dans les grains (cf. 1.2.3.), mettant en évidence la relation entre le métabolisme des hydrates de carbone et le phosphore (De Datta, 1981). Par ailleurs, la translocation du phosphore des feuilles vers les grains continue jusqu'au stade de grain pâteux, et la déficience en phosphore se traduit généralement par une diminution du rendement.

c. La nutrition potassique

Le potassium n'entre pas dans la composition des organes de réserves de la plante et ne subit pas de translocation. Il participe à plusieurs réactions dans la plante en étant cofacteur de plus de quarante (40) enzymes. Pendant la croissance végétative, il est absorbé au même rythme que la production de matière sèche qui fait intervenir un certain nombre de réactions enzymatiques. Avec le calcium, il régule divers mécanismes métaboliques. Le taux de potassium dans la plante est important, surtout après la floraison.

Par ailleurs, le potassium assure plusieurs rôles au sein de la plante :

- il favorise le tallage et l'augmentation de la taille et du poids des grains ;
- il intervient dans la régulation de l'ouverture et de la fermeture des stomates (et donc la photosynthèse), et par conséquent, intervient indirectement sur la production de matière sèche ; et
- il augmente la résistance des plantes aux maladies.

d. La synthèse des hydrates de carbone

Les hydrates de carbone, objet de l'activité photosynthétique, s'accumulent d'abord dans les feuilles. Suivant le stade végétatif et la position de chaque feuille, ces substances subissent une translocation suivant la théorie « source-sink » vers les organes de réserves (cf. tab n°15)

Tableau n°15 : Epoque de la translocation des hydrates de carbone à partir chaque feuille (Yoshida, 1981)

Feuilles	Epoque de la translocation	Destination
Trois premières feuilles	Après l'épiaison	Panicules
Trois dernières feuilles	Dès le début de croissance	Racines

Les sucres sont transportés sous forme de sucrose dans les lames foliaires vers les gaines foliaires et les épillets. Puis, ces sucroses se transforment en sucre réducteur par hydrolyse, et l'amidon s'élabore par un mécanisme de phosphorylation (cf. 1.2.1.2.). Il s'ensuit qu'à cette période, le riz est très fortement demandeur en azote et en phosphore.

Lorsque, avec une forte activité photosynthétique, les possibilités d'accumulation des hydrates de carbone dans les panicules sont dépassées, on en retrouve en excès dans les tiges. Une pareille importance de matière élaborée est susceptible d'attirer les ravageurs et de favoriser l'attaque de maladies si aucune précaution préalable n'est prise (traitement des semences ...).

D'après Matsuo (cité par Angladette, 1966), les protéines, puis les matériaux essentiels à la construction du futur végétal (embryon du grain), et enfin les hydrates de carbone (amidon essentiellement) s'accumulent successivement.

CONCLUSION PARTIELLE

La riziculture constitue sans nul doute une des rares activités économiques qui reflètent, de manière très précise, non seulement le passé historique de la nation, mais surtout les efforts de développement entrepris par les différents responsables. Dans le temps, le riz a été à la base de la politique économique du pays. Maintenant, il devrait encore être le leitmotiv de tout effort de développement. Pour le cas particulier de la province d'Antananarivo, elle a le devoir de remporter cette « bataille du riz » à laquelle son aïeul Andrianampoinimerina s'est farouchement attaché (Rasoloarivony, 2000).

Les évolutions dans le domaine de la riziculture ont certes eu des impacts positifs à une époque donnée, mais elles n'ont pas su répondre aux exigences du long terme, celles d'assurer une autosuffisance à sa population. Actuellement, l'ampleur des difficultés alimentaires et la baisse du revenu des paysans remettent au premier plan la question du riz. Cette pauvreté grandissante et l'insécurité alimentaire qui l'accompagne rendent capitale la recherche d'une alternative efficace, et ayant des résultats immédiats sur l'économie de la région.

Toutes les alternatives doivent faire l'objet d'une étude approfondie afin de déterminer toutes les utilités et de pouvoir les proposer à tous ceux, pour qui elles peuvent apporter un soulagement. En effet, l'expansion ne devra pas être envisagée aux dépens d'autres catégories de la population.

Aujourd'hui, quand on parle de riz, le SRI suscite beaucoup de questions de la part des différentes composantes de la société. Les connaissances dans ce domaine viennent progressivement apporter les explications nécessaires à une meilleure compréhension du mécanisme qui le régit. Toutefois, il faut approcher cette notion à toute l'étendue des réalités locales pour en comprendre, à la fois les limites et les possibilités. En effet, il sera essentiellement question d'opportunité. Une technique valable à différents points de vue, mais difficilement applicable, ne sera d'aucune utilité.

2. EXPERIMENTATIONS BASEES SUR LES FACTEURS DE RENDEMENT EN SRI

Le travail a consisté essentiellement en la mise en place d'un essai en milieu paysan. Le lieu d'implantation est Anjomakely, une localité située à 17 km environ sur la RN 7. Toutes les conditions de culture ont été identifiées à ceux des paysans des alentours (calendrier cultural, semences ...). Seules les variables d'étude ont été différentes. L'expérimentation a été conduite au cours de la campagne 2000/2001

2.1. Méthodologie

Pour la conception et la mise en place de l'essai, les principes scientifiques des expérimentations agronomiques ont été appliqués. Ces principes se résument essentiellement au :

- principe de la seule différence
- principe de la répétition

2.1.1. Essais en milieu paysan

Les essais ont été conduits en présence de producteurs locaux afin qu'ils constatent d'eux-mêmes les résultats obtenus à partir des essais.

2.1.1.1. Choix du site expérimental

Le site expérimental comporte deux sous-unités dont le choix a été dicté principalement par :

a. Le type de sol :

Bien que situé dans une même zone, les deux sites ont attiré l'attention du fait de leur nature différente. En effet, du point de vue propriété physique (tab n°16), ils semblent représenter les principaux types de sol de rizières sur les hautes terres. L'intérêt d'un tel essai découle alors du fait de la possibilité d'évaluer le comportement du SRI suivant ces sols, et sous les conditions agro-pédologiques locales.

Tableau n°16 : Caractéristiques physico-chimiques des sols des sites (Laboratoire Sols-Plantes/ESSA-Agri)

SITE	Caractéristique physique			Composition chimique								
	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	BD (me/100)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (me/100)	MH (%)	N (%)	C (%)	C/N
NORD	22 à 32,5	20 à 30	33 à 37	6,5	6,7	6	0,12	2,8	3	1,5	24	16
SUD	15 à 24,5	30 à 34	34 à 37,5	6,5	6,4	6,5	0,18	3,2	4,5	1,2	22,8	19

La classe texturale correspondante à chaque site, d'après le diagramme de texture du laboratoire des sols de Versailles est définie ainsi :

- Le sol du site NORD correspond à une texture *limono-argileuse*. Cette caractéristique lui confère une plus grande disposition à la riziculture de submersion. De par sa plus grande teneur en argile, il a un pouvoir de rétention en eau plus élevé que le sol du site SUD, et il est capable de garder une certaine humidité en profondeur toute l'année. Par conséquent, les activités microbiennes peuvent continuer dans le sol même en absence d'alimentation en eau en surface. Cela explique la différence de rapport C/N entre les deux sols.
- Le sol du site SUD se révèle davantage être un sol *limono-sableux* ou *sablo-limoneux*. Par rapport au premier, il a une moindre capacité de rétention en eau, ce qui le rend vulnérable au moindre déficit hydrique. Par ailleurs, les limons n'ayant pas une propriété colloïdale capable de rassembler les particules de sol en agrégats, il s'ensuit une forte tendance au compactage qui, d'une part, s'avère asphyxiant et, d'autre part, peut nuire au développement des racines par la résistance physique que le sol oppose à leur pénétration.

Du point de vue chimique, les deux sols ont pratiquement la même richesse en éléments fertilisants. L'influence du type de sol sur le rendement être essentiellement liés aux différences de propriétés physiques.

b. L'alimentation en eau :

Afin de limiter les variabilités aux seules caractéristiques de sol, le choix des sites devait respecter une autre condition : être soumis aux mêmes paramètres d'alimentation en eau. Cela a été rendu possible car le canal d'amenée d'eau est situé aux abords immédiats de chacune des deux sous-unités. Etant donné qu'il s'agit d'un même réseau hydraulique, la courte distance entre les sites (500 m à vol d'oiseau environ) et la faible pente d'écoulement permettent de considérer que le régime des eaux restent vraisemblablement le même aux environs des deux sites.

c. L'exposition à la lumière :

Le riz étant une plante héliophile par excellence, la même condition d'exposition au soleil était essentielle pour le choix des sites. Heureusement, ils présentent en même temps cet avantage de recevoir pratiquement toute la lumière quotidienne du soleil car aucun obstacle ne s'y oppose. Par ailleurs, le fait qu'ils soient situés dans un même plan de vallée offre pratiquement la même durée d'exposition à la lumière.

2.1.1.2. Dispositif expérimental

Les essais ont porté sur les unités sus-mentionnées. Etant donné que les objectifs fixés étaient d'étudier le comportement du SRI sous les conditions de culture des hautes terres, le schéma de la mise en place des essais devait respecter cette particularité.

a. Le matériel végétal :

Etant donné la faible importance de l'usage de variété améliorée par les paysans, il semble plus judicieux dans le cas présent de conduire les essais avec une variété de riz traditionnelle (riz rouge). De la sorte, il sera possible d'évaluer les retombées positives éventuelles de la pratique du SRI si l'accès aux variétés à haut rendement se révèle

difficile pour ces mêmes paysans. Toutefois, afin de réduire les variabilités dues à la pureté de la semence, une sélection massale a été effectuée avant la mise en pépinière.

b. Les variables de l'expérimentation :

Trois (03) variables de plantation ont été retenues pour les traitements :

- L'âge des plants à la transplantation : 8 jours et 20 jours après semis,
- Le nombre de brins par touffe au repiquage : 1 brin et 3 brins
- L'écartement entre les plants : 25 cm x 25 cm et 30 cm x 30 cm

La combinaison de ces variables avec leur niveau respectif a conduit à huit (08) traitements :

- T1 : 8 jours – 1 brin – 25 cm x 25 cm
- T2 : 8 jours – 3 brins – 25 cm x 25 cm
- T3 : 8 jours – 1 brin – 30 cm x 30 cm
- T4 : 8 jours – 3 brins – 30 cm x 30 cm
- T5 : 20 jours – 1 brin – 25 cm x 25 cm
- T6 : 20 jours – 3 brins – 25 cm x 25 cm
- T7 : 20 jours – 1 brin – 30 cm x 30 cm
- T8 : 20 jours – 3 brins – 30 cm x 30 cm

b. Les programmes des essais :

Chacun des traitements cités précédemment a été testé dans le cadre de programmes résultant de la combinaison de trois autres facteurs de milieu :

- Le type de fertilisation : sans (SSF), NPK, Compost (CPT)
- La maîtrise de l'eau : sans maîtrise de l'eau (SME), avec maîtrise de l'eau (AME)
- Le type de sol : limono-sableux (SUD) ou argilo-limoneux.(NORD)

Cela nous amène à avoir normalement douze programmes. Or, l'étroitesse du site SUD n'a permis pas d'implanter l'ensemble des programmes. Aussi, deux niveaux de fertilisation seulement ont-ils été applicables. Ce qui réduit le nombre de programmes sur ce site à quatre. L'ensemble de ces programmes sont :

- PRF : NORD – SSF – SME
- PRW : NORD – SSF – AME
- PR1 : NORD – NPK – SME
- PR2 : NORD - NPK – AME
- PR3 : NORD - CPT – SME
- PR4 : NORD - CPT – AME
- PR5 : SUD - NPK – SME
- PR6 : SUD - NPK – AME
- PR7 : SUD - CPT – SME
- PR 8 : SUD - CPT – AME

c. La disposition générale des parcelles :

Chaque traitement a été appliqué sur une parcelle élémentaire mesurant 2,5 m x 2,5 m. Un espace de 0,5 m de large a été aménagé entre les parcelles. Toutefois, les paysans très largement intéressés par l'expérimentation ont maladroïtement interprété la disposition en petites parcelles avec de larges espaces entre elles. Beaucoup d'entre eux n'ont pas réussi à

comprendre l'utilité scientifique du dispositif. Aussi, afin de garder un aspect plus homogène au niveau des parcelles, l'initiative de mettre des plants de 8 jours – 1 brin sur ces espaces vides a-t-elle été prise.

Par la suite, les huit (08) traitements ont été disposés de façon aléatoire dans chaque bloc correspondant à une répétition. Puis, trois répétitions ont été appliquées à chaque programme. Ce qui nous conduit à un nombre de 240 parcelles élémentaires pour l'ensemble des programmes.

2.1.2. Mise en place de l'expérimentation

La mise en place de l'expérimentation a suscité l'intérêt des paysans. En effet, les nouvelles façons de concevoir le schéma type de la rizière ne les ont pas laissés indifférents. (préparation semis en Annexe n°9)

2.1.2.1. La préparation du sol

La préparation du sol a été réalisée suivant les techniques actuelles des paysans. Un labour à l' « angady » un mois avant la mise en place de la culture a été réalisé. La profondeur de labour est d'environ 30 cm. Une dizaine de jours avant le repiquage, le sol est submergé pour ramollir les mottes. Ces dernières sont débitées jusqu'à l'obtention d'une boue liquide favorable au repiquage des jeunes plants de riz. Cette dernière opération est faite préférentiellement la veille du jour de repiquage. Le planage de la rizière est réalisé en même temps que l'émottage.

Le jour du repiquage, la rizière doit être suffisamment plane pour éviter toute dépression pouvant aboutir à une accumulation d'eau en surface. Si le cas se présente, il est préférable de réaliser quelques aplanissements supplémentaires.

2.1.2.2. Les aménagements requis par les essais

Deux sortes d'aménagements s'imposaient. D'abord au niveau des pépinières, le terrain choisi doit être exondé. Les semences sont installées sur une terre meuble amendée, à proximité d'une source d'approvisionnement en eau.

Ensuite, pour la rizière, un système d'arrivée et de sortie d'eau a été installé faute de pouvoir aménager un véritable système de drainage et d'irrigation. L'eau est prise au niveau du canal situé à côté des rizières. Elle passe ensuite par un réseau primaire. D'autres branchements apportent l'eau dans les différentes parties du site afin d'homogénéiser les conditions réelles d'alimentation en eau des parcelles. Un autre réseau collecte l'eau rejetée et l'achemine vers la rizière voisine située en contre bas ou le canal en aval. De cette façon, l'eau issue de chaque parcelle expérimentale ne se mélange pas. De tels aménagements ont été conçus afin de limiter les risques liés aux essais de fertilisation : solubilisation des engrais et diffusion vers les autres parcelles, entre autres.

Et enfin, dans le but encore de rendre les tests de fertilisation plus fiables, une bande de végétation (*Aristida* essentiellement) large de 50 cm sépare les différents programmes. Elle est installée en surélévation par rapport à la rizière. Cette bande est supposée constituer une barrière pour le transfert latéral des éléments fertilisants. De plus, les transferts en profondeur devront être limités par le système racinaire de ces plantes.

2.1.2.3. La mise en place de l'essai

Le semis a été effectué le 21 Décembre 2000. Le repiquage des plants a été réalisé en deux étapes (le 29 Décembre pour les plants de 8 jours et le 11 Janvier pour les plants de 20 jours). Cela vient du fait qu'il était assez difficile d'organiser le travail sur deux sites en même temps et qu'il a fallu garder une certaine rigueur dans l'exécution du travail.

Un problème majeur a été rencontré à ce niveau. Le repiquage a été suivi par la période de forte pluie. Heureusement, les plants ont majoritairement résisté à une submersion temporaire et ce, grâce au système d'évacuation d'eau aménagé auparavant. Cela confirme d'ailleurs l'utilité de ce système dans les conditions de culture des hautes terres. En effet, pour la région d'Antananarivo par exemple, une grande partie de la quantité annuelle de pluie tombe entre Décembre et Février. Par conséquent, cette particularité doit être prise en compte dans le choix de la date de repiquage. Pour cette expérimentation, le retard au niveau du repiquage a été dû en partie au retard de l'arrivée des pluies.

Plusieurs paysans ont participé à la mise en place. Mais pour garder une homogénéité entre les manipulations, les mêmes personnes ont été appelées pour les deux repiquages. Une attention particulière a été portée sur la conduite du repiquage. Il est réalisé à l'aide d'une corde aux mesures de la taille des parcelles. Des nœuds figurant sur la corde marquent les écartements d'implantation des plants. Les paysans évoluent en reculant par rapport à la partie repiquée.

2.1.3. Collecte des données

Cette étape est très délicate par le fait que la fiabilité des résultats obtenus à partir des essais en dépend. Il a donc été nécessaire d'adopter une démarche rigoureuse et rationnelle pour sa mise en œuvre. Trois conditions s'imposaient pour cela :

- la pertinence du choix des variables à mesurer ;
- la valeur de leur signification par un choix judicieux du temps de collecte ; et
- la cohérence des mesures entre elles afin de fournir une information aussi précise que significative.

2.1.3.1. Choix des variables mesurées

Plusieurs catégories de variables auraient pu être mesurées à travers cette expérimentation. Toutefois, il a fallu opérer un choix parmi celles-ci afin de rester dans le domaine pratique des réalisables. Ces variables sont essentiellement :

a. Le nombre de talles fertiles

Il correspond à l'une des premières composantes du rendement appréciable sur le terrain (Moreau, 1987). Le nombre de talles fertiles traduit de prime abord la capacité potentielle de production. En effet, le rendement en SRI va dépendre en premier lieu de l'importance des talles fertiles par touffe de riz. Celui-ci doit pouvoir donner une idée générale du niveau possible de rendement. Par conséquent, il donne une information intéressante sur les effets stimulateurs ou contraignants de chaque variable dans le processus

de tallage et par la même, la fertilité des talles. Il peut en résulter, mais en filigrane, la réaction même de la plante vis-à-vis de ces variables.

b. Le nombre de grains pleins par panicule

Il correspond au maillon final des composantes du rendement. Etant donné que l'élément principal de la récolte réside dans les grains, les valeurs issues de cette mesure informent sur les capacités réelles de rendement pour chaque combinaison de facteurs.

D'une certaine façon, l'importance du nombre de grains pleins par panicule combinée à celle des talles fertiles peuvent être des indicateurs fiables d'une bonne nutrition générale du riz. En effet, cela vient du fait que l'importance des organes de réserve dépend, d'une part, de la capacité photosynthétique de la plante et, d'autre part, de l'absorption des éléments fertilisants du sol participant à l'élaboration de ces carbohydrates.

c. La quantité de riz récoltée par parcelle (en kg)

Elle mesure de manière définitive la production pour une surface donnée. Pour avoir le rendement, il suffit de ramener cette valeur à la valeur correspondante à l'unité de surface voulue. Pour le cas de cette expérimentation, le rendement sera donné par la formule De Laulanié - Moreau :

$$R \text{ (t/ha)} = K \times P \text{ (kg)}$$

où :

R : rendement à l'hectare

K : coefficient déterminé pour un taux d'humidité donné et une surface donnée

P : récolte pour la surface donnée

d. La densité racinaire

Les racines jouent un rôle important dans le développement de la plante. S'agissant de l'organe principal d'absorption des éléments nutritifs du sol, l'importance de leur système va être déterminante pour la croissance et le développement du riz. Il s'avère donc nécessaire de vérifier la relation de correspondance entre la densité racinaire et le rendement. Cela étayera davantage l'hypothèse d'une bonne nutrition du plant de riz soumis au SRI.

2.1.3.2. Mise en œuvre de la collecte de données

Les variables sitôt définies, avec leurs conditions respectives de collecte, il s'agit alors de procéder à l'exécution sur le terrain, en essayant au maximum de rapporter des données aussi proches que possible de la réalité. Il est évident que la qualité des informations fournies par l'expérimentation va dépendre essentiellement de la qualité de la prise des données, et de la fidélité de la transcription faite des réalités observées sur le terrain.

a. Organisation temporelle de la collecte de données

Pour avoir une valeur d'information, chaque mesure doit être faite à un moment précis dans le temps (tab n°17). La détermination de cet instant relève d'une bonne connaissance théorique et pratique des différentes étapes physiologiques subies par la plante. Pour cela, les connaissances scientifiques théoriques ont été confrontées aux perceptions paysannes afin de donner un concept pratique fiable et utilisable par l'expérimentateur, au cours de ses investigations. La détermination des différents stades physiologiques a donc été facilitée par cette approche, ce qui a permis l'organisation matérielle des mesures.

Tableau n°17 : Planning^(*) initial de la collecte des données (adapté de De Datta, 1981)

Variables à mesurer	Stade correspondant	Epoque (nombre de jours après le semis)
Talles fertiles	Maturation	135
Grains par panicule	Maturation	135
Récolte parcellaire	Récolte	150
Densité racinaire	Récolte	150

^(*) Basé sur un cycle de 150 jours

b. Organisation matérielle de la collecte de données

Etant donné la spécificité de chacune des variables mesurées, différents outils ont été nécessaires pour mener à bien les opérations de collecte (tab n°18)

Tableau n°18 : Spécificités de chaque variable avec les outils nécessaires

Variables mesurées	Spécificité relative à la mesure	Outils	Réalisation de mesure
Talles fertiles	Nombre		Comptage manuel et marquage des touffes par un ruban de couleur
Récolte parcellaire	Poids avec une certaine humidité	Sacs, sachets, balance	<ul style="list-style-type: none">• Mise en sac individuel des panicules issues d'une même parcelle, mise en sachet des grains après dépiquage et finalement pesage• Détermination du taux d'humidité par prélèvement d'échantillon
Grains par panicule		Sachets	Mise en sachets munis des numéros de parcelle des panicules prélevées
Densité racinaire		Dynamomètre de capacité 100 kg	Extirpation des touffes

c. Réalisation des mesures

Devant l'impossibilité pratique de mesurer toute la population, un préalable s'impose, c'est à dire qu'il faut procéder à un échantillonnage. Cette démarche requiert beaucoup

d'attention de la part de l'opérateur ; Il s'agit en fait d'effectuer une sélection d'éléments végétaux capables de faire ressortir l'image de l'ensemble.

Pour les talles, un inventaire préalable des plants de riz a été réalisé pour avoir une idée sur les traits principaux de la population, objet de l'étude. Le comptage des talles a donc été effectué proportionnellement à l'importance de chacune des catégories de touffe dégagées par l'inventaire.

Pour la quantité parcellaire de riz produit, la récolte a été effectuée sur une surface de 2 m x 2 m. Le reste se trouvant sur une bande externe de 0,5 m ne figure pas dans la détermination du rendement. Cette précaution est prise afin d'éliminer les effets de bordure.

Pour le nombre de grains par panicule, on a procédé au prélèvement sur un des plants marqués pour le comptage des talles fertiles. Ainsi, trois panicules ont été prélevées pour déterminer la valeur qui se rapproche le plus des valeurs réelles. Ce plant doit avoir un nombre de talles proche de celui de la moyenne de la population.

Pour la densité racinaire, la mesure sera faite à l'aide d'un dynamomètre. La balance est fixée à une extrémité par une sorte de manche portée par deux hommes. A l'autre extrémité est accroché un fil retenu par le collet du plant. Il suffit alors d'arracher la racine. Lorsque le point de rupture est pratiquement atteint, la lecture sur la balance donne la Résistance des Racines à l'Extirpation (Root-Pulling Resistance) qui est positivement corrélée avec le rendement (O'Toole et al, 1986 cité par Joelibarson, 1998).

2.2. Résultats et interprétations

Le regroupement de résultats est essentiel dans l'analyse. Dans un premier temps, il faut essayer d'évaluer l'importance respective des variables de rendement en SRI. Nous allons pour cela, comparer les rendements entre eux. Par hypothèse, nous allons comparer les rendements obtenus avec la combinaison totale ou partielle des variables de rendement avec la méthode conventionnelle (SRA) qui figure parmi les combinaisons adoptées pour l'expérimentation. Par la suite, nous étudierons les interactions entre les composantes du rendement et les différents facteurs d'intervention.

2.2.1. Les effets des différentes variables de rendement en SRI

Les effets des six variables de rendement n'ont pas pu être entièrement évalués. L'étude s'est limitée à quelques-unes d'entre elles à savoir :

- l'âge de transplantation
- la maîtrise de l'eau
- l'application de compost
- le nombre de brin par touffe
- l'écartement

Pour cette dernière variable, les écartements adoptés n'ont pas donné de résultats suffisamment différents pour que ce caractère figure parmi les analyses. De même, l'étude de l'effet de différents passages pour le sarclage a été volontairement abandonnée pour éviter d'avoir des parcelles d'expérimentation de l'ordre de 500 environ.

2.2.1.1. Les effets de l'âge de transplantation

L'âge de transplantation recommandée par le SRI est de 8 jours. Les rendements obtenus avec les différents traitements montrent des réponses différentes du SRI selon l'âge de transplantation et le type de sol (argilo-limoneux au site NORD et limono-sableux au site SUD)(tab n°19)

Tableau n°19 : Rendements obtenus suivant l'âge de transplantation

Rendement (t/ha)	8 jours	20 jours	Différence (t/ha)	Différence (% par rapport à 8 jours)	Quotient (8 jours/20 jours)
Site NORD	7,38	4,45	2,93	39,70	1,65
Site SUD	4,62	2,80	1,82	39,39	1,65
Quotient (NORD/SUD)	1,60	1,59			

A partir de ces résultats, plusieurs constatations peuvent être dégagées :

- Les plants de 8 jours donnent les meilleurs rendements, avec une moyenne de 7,38 t/ha sur sol argileux (NORD) et 4,62 t/ha sur sol limoneux (SUD).
- Les rendements obtenus avec les plants de 20 jours, sur sol argileux, correspondent bien aux rendements moyens obtenus avec le SRA tel qu'il a été défini par Mayer et Bonnefond en 1963. En effet, ils stipulaient un rendement de 4,5 t/ha environ, avec la méthode améliorée. Seulement, ce rendement est réduit de plus du tiers (37,07% de diminution) lorsque le sol est de nature limoneuse.
- Le net avantage obtenu avec le sol argileux correspond bien à la différence de nature physique observée lors des analyses de sol. De plus, les proportions entre les résultats sont pratiquement constantes. Ainsi, le sol argileux, bien que présentant la même composition chimique que le sol limoneux, donne un rendement de 1,6 fois supérieur à ce dernier. Il y a donc entre ces deux sols une différence de comportement des plants de riz. Etant donné que les traitements appliqués étaient les mêmes sur les deux sols, ces différences ne pouvaient que résulter des propriétés des sols et de leur aptitude à répondre aux besoins de la plante.

A la lecture de ces observations, une première conclusion peut être retenue. Les différences de rendement confirment la diminution de rendement due à la perte des talles du premier rang. En effet, les études théoriques sur le modèle de tallage de KATAYAMA évaluaient cette perte à environ 39,75% du rendement optimal avec les plants repiqués avant le 3^{ème} phyllochrone (cf. 1.4.3.1. et tab n°11). On retrouve cette même valeur ici.

Dans une seconde approche, il convient de rappeler les besoins essentiels des plantes. En effet, pour bien se développer, la plante a besoin d'un bon équilibre entre sa partie aérienne et ses racines. Etant donné que les conditions optimales de développement des parties aériennes peuvent être considérées comme remplies (cf. 1.1), seules les conditions de sol vont être déterminantes. Parmi ces conditions, il faut citer le besoin d'eau et d'oxygène. Puisque l'eau n'est pas considérée comme un facteur limitant au cours de cette expérimentation, il reste à déterminer l'approvisionnement en oxygène.

L'oxygène étant principalement inclus dans les pores de la structure du sol, un sol avec une structure à tendance compacte ne laisse que très peu de place à l'oxygène. Par

conséquent, cet oxygène s'épuise vite, et l'approvisionnement des racines de la plante s'en retrouve diminué. Et même si la plante peut morphologiquement apporter de l'oxygène au niveau des racines, par le biais des lacunes aérifères, la résistance physique du sol ne permet pas à la plante d'explorer tout le volume de terre mis à sa disposition.

2.2.1.2. Les effets de la maîtrise de l'eau

Avec la maîtrise d'eau, la plante sera assurée tout au moins d'un approvisionnement en oxygène. Les résultats sont à première vue plus élevés avec que sans maîtrise d'eau (tab n°20)

Tableau n°20 : Rendements suivant le niveau de maîtrise de l'eau

Rendement (t/ha)	Avec maîtrise	Sans maîtrise	Différence (t/ha)	Différence (% de avec maîtrise)	Quotient (Avec/Sans)
Site NORD	6,72	5,12	1,60	23,80	1,31
Site SUD	4,28	3,15	1,13	26,40	1,35
Quotient (NORD/SUD)	1,57	1,62			

Les principales constatations qui découlent de ces résultats sont :

- Même en absence de maîtrise d'eau, la moyenne obtenue est plus élevée par rapport au rendement moyen national de 2,1 t/ha.
- Entre les deux sites, la perte de rendement due à l'absence de maîtrise d'eau est évaluée au quart de la production.
- Les rendements obtenus avec les deux sols sont toujours de l'ordre de 1,6 fois supérieur en faveur du sol argileux.

Les renseignements que l'on peut tirer de ces résultats sont d'abord les effets positifs de la maîtrise de l'eau. L'augmentation de rendement est, pour une part, due à l'aération des racines qui peuvent désormais se développer plus facilement, et atteindre tout le volume de terre laissé à leur disposition. Elle correspond également à la minéralisation moins lente des réserves organiques du sol, entraînant la mise à disposition de la plante d'une quantité plus importante d'éléments fertilisants.

Le taux de perte semble être légèrement plus élevé avec le sol limoneux, si la maîtrise d'eau n'est pas réalisée. Ceci paraît toujours être en relation avec les propriétés des sols. En effet, le caractère asphyxiant des sols limoneux est apparemment atténué par la maîtrise d'eau. Ainsi, les rendements obtenus respectent toujours les proportions constatées auparavant.

Le fait que l'absence de maîtrise de l'eau n'ait pas ramené le rendement à un niveau proche de la moyenne nationale laisse supposer que les autres facteurs gardent toujours leur effet. Il est donc évident que chaque facteur compte, pour une part déterminée dans l'élaboration du rendement.

2.2.1.3. Les effets de la fertilisation

La fertilisation constitue l'objet d'une attention particulière des producteurs. En effet, il ne suffit plus seulement de disposer d'engrais pour augmenter sa production, mais il faut surtout trouver la meilleure forme d'apport, dans la limite des possibilités, pour répondre aux besoins du producteur.

Les résultats des essais montrent un meilleur résultat avec l'apport de compost (tab n°21).

Deux points essentiels attirent l'attention au vu de ces résultats :

- En absence de fertilisation, le riz donne encore des résultats « raisonnables » par rapport au rendement moyen national. Toutefois, aucune comparaison n'a pu être faite avec le site SUD du fait de l'exiguïté de la parcelle.
- La réponse à la fertilisation est nette pour les deux apports. Seulement, la part d'augmentation est plus élevée pour le compost.

Tableau n°21: Rendements suivant le type de fertilisation

Rendement (t/ha)	Sans fertilisation	NPK	COMPOST (CPT)	Différence (CPT-NPK) (t/ha)	Différence (%) par rapport à CPT)	Quotient
Site NORD	4,25	6,42	7,07	0,65	9,19	1,10
Site SUD		3,53	3,90	0,37	9,48	1,10
Quotient (NORD/SUD)		1,81	1,81			

Pour ces observations, nous pouvons émettre quelques réflexions. En premier lieu, l'absence de moyen pour s'approvisionner en engrais ne devrait donc pas être un facteur limitant de la production. Seulement, on n'est pas en mesure de déterminer si cela peut être valable après plusieurs années et pour tous les types de sol. Nous pouvons toutefois penser que, mises à part les propriétés des sols mentionnées auparavant, la richesse du sol en éléments fertilisants doit jouer un rôle régulateur sur l'expression du potentiel de production de la plante. La grande incompréhension reste toujours au niveau du renouvellement de la fertilité. Pour le cas des hautes terres malgaches, la notion d' « érosion utile » (Raison, 1991) semble être la plus appropriée pour l'instant. Le décapage des profils de sol sur les collines apporte en permanence une quantité d'éléments fertilisants dans les bas fonds.

Ensuite, le quotient des rendements obtenus sur les deux sites semble varier par rapport aux précédents. Pour cela, trois hypothèses peuvent être posées : soit le site SUD répond mal aux traitements fertilisants, soit le site NORD réagit mieux à ceux-ci, soit les deux situations surviennent en même temps. Par contre, cette dernière hypothèse est difficile à délimiter.

Ce qui paraît le plus probable est l'omniprésence de contraintes physiques pour le sol limoneux du site SUD. Les difficultés subies par les racines, pour se développer, peuvent avoir des impacts sur la réponse aux engrais et au compost. De plus, on sait que les sols argileux peuvent fixer certains éléments fertilisants sur leur complexe argilo-humique. Il y a donc moins de perte pour les sols argileux et par conséquent une meilleure disponibilité pour la plante.

2.2.1.4. Les effets du nombre de brins par touffe

A la mise en place des essais, ce critère a été le plus contesté par les paysans riverains. Effectivement lorsque les parcelles ont été repiquées, il était pratiquement impossible de distinguer la présence des jeunes plants qui faisaient à peine 8 cm de long. Des l'apparition des premières talles toutefois, aucune distinction n'a pu être faite

entre les plants de 1 brin et de 3 brins. Au niveau du rendement, la différence est à l'avantage des plants repiqués à 1 brin (tab n°22).

Tableau n°22 : Rendements suivant le nombre de brins par touffe

Rendement (t/ha)	1 brin	3 brins	Différence (t/ha)	Différence (% par rapport à 1 brin)	Quotient
Site NORD	6,35	5,48	0,86	15,69	1,15
Site SUD	4,03	3,39	0,64	15,88	1,18
Quotient (NORD/SUD)	1,57	1,61			

Les observations concernant ces résultats sont de plusieurs sortes :

- Les résultats obtenus peuvent tous être considérés comme supérieurs au rendement moyen national.
- Les deux sites, une fois de plus, réagissent conformément aux résultats précédemment observés (même quotient entre 1 brin et 3 brins, de même entre NORD et SUD)
- La perte de rendement, lorsque des touffes de 3 brins sont repiquées, varie de 640 kg (sol limoneux) à 860 kg (sols argileux). Etant donné la part que cela représente en matière de consommation alimentaire, il faut une longue réflexion dans le choix des combinaisons.

Ces résultats suscitent quelques observations. En premier lieu, il semble y avoir une compétition entre les plants de riz mis ensemble. Celle-ci se résume principalement à la compétition pour la lumière, les éléments fertilisants et l'eau. Les racines s'enchevêtrent et peuvent facilement se gêner. Cette situation agit immédiatement sur les résultats, en réduisant la part de rendement obtenue par chaque plant repiqué.

2.2.1.5. Les effets de l'écartement

Lors de la conception du dispositif expérimental, les deux écartements pris comme variables étaient trop proches l'un de l'autre, si bien que les résultats sont pratiquement similaires (tab n°23)

Tableau n°23 : Rendements suivant l'écartement entre les plants

Rendement (t/ha)	25 x 25	30 x 30	Différence	Différence	Quotient
Site NORD	6,7	6,79	0,09	1,32	1,01
Site SUD	3,68	3,73	0,05	1,34	1,01
Quotient (NORD/SUD)	1,82	1,82			

De nouveau, les variables de rendement en SRI permettent toujours d'améliorer plus ou moins sensiblement le rendement. La différence entre les deux sols est, une fois encore, plus importante que précédemment. Les observations menées dans les parcelles de culture ont permis de détecter des différences de comportement du sol. L'écartement utilisé dans l'expérimentation s'avère trop important face à la réponse de la plante vis-à-vis des caractères du sol. Sur le site SUD, les talles ont très vite cessé de croître, et le stade de reproduction commence.

2.2.2. La synergie entre les variables de rendement :

Au vu de tout ce qui précède, il est clair que chaque variable revêt une importance particulière dans l'élaboration du rendement. L'augmentation de rendement obtenue, avec chaque variable prise en considération (tab n°24), témoigne d'une certaine hiérarchie entre les variables.

Tableau n°24 : Augmentation de rendement obtenue avec chacune des variables prises individuellement

Variabes	Augmentation de rendement (t/ha)	Nombre de parcelles mesurées
AGE DES PLANTS	+ 2,48	240
MAITRISE EAU	+ 1,41	240
COMPOST	+ 1,01	192 (*)
NOMBRE DE BRIN	+ 0,78	240

(*) les parcelles correspondantes aux traitements « sans fertilisation » n'ont pas été considérées.

2.2.2.1. Les effets de l'adoption d'un seul facteur du SRI :

Avec l'extrême diversité du monde rural, la disponibilité des ressources et les conditions locales de production limitent les marges de manœuvre. Dans les conditions les plus défavorables, il est possible qu'une seule de toutes les variables susmentionnées peut être envisagée. Aussi, est-il essentiel de considérer le cas où une variable seulement pourrait être prise en compte. Les résultats obtenus donnent déjà des résultats raisonnables pouvant résoudre les problèmes d'un grand nombre d'exploitations agricoles (tab n°25). Dans cette étude, la combinaison de base considérée est :

- plants de 20 jours (20j)
- 3 brins par touffe (3b)
- NPK (NPK)
- Sans maîtrise de l'eau (SME)

Cette combinaison nous donne des rendements de 3 t/ha (NORD) et 2,04 t/ha (SUD). La comparaison sera établie par différence avec cette combinaison qu'il convient d'appeler « conventionnelle ».

Tableau n°25 : Rendements moyens obtenus par l'adoption d'une seule variable su SRI

Combinaison	Sols Argileux (NORD)	Sols limoneux (SUD)	Moyenne
20j/3b/SME/CPT	3,71	2,03	
20j/1b/SME/NPK	5,04	2,78	
8j/3b/SME/NPK	7,16	3,89	
20j/3b/AME/NPK	5,08	2,60	
Rendement moyen (t/ha)	4,25	2,83	3,54
Augmentation (t/ha)	1,25	0,79	1,02
Augmentation (%)	41,66	38,72	40,5

Avec un seul facteur de rendement, le paysan peut espérer une augmentation de sa production de l'ordre de 35 à 45%, soit un accroissement de 1 t/ha environ. S'agissant d'une moyenne, certaines combinaisons offrent des améliorations beaucoup plus avantageuses, notamment le repiquage de jeunes plants de 8 jours, à trois brins, sans maîtrise d'eau mais avec NPK. Le rendement obtenu est de l'ordre de 7 t/ha. Pour rassurer les paysans les plus sceptiques vis-à-vis du SRI,

cette combinaison est peut-être la voie qui leur permettra d'en faire la découverte. Toutefois, les sols limoneux doivent faire l'objet d'une remarque supplémentaire : les résultats sont légèrement inférieurs à la moyenne, d'où la prudence est de rigueur pour les affirmations, lorsque la connaissance des propriétés du sol est insuffisante.

2.2.2.2. Les effets de l'adoption de deux facteurs

Les rendements obtenus avec les deux facteurs du SRI sont consignés dans le tableau n°26.

Tableau n°26 : Rendements moyens obtenus par adoption de deux variables du SRI

Combinaison	Sols Argileux (NORD)	Sols limoneux (SUD)	Moyenne
20j/1b/SME/CPT	4,50	2,44	
8j/3b/SME/CPT	6,86	3,61	
20j/1b/AME/NPK	6,07	3,15	
20j/3b/AME/CPT	6,72	3,41	
8j/1b/SME/NPK	8,13	4,36	
8j/3b/AME/NPK	8,15	4,44	
Rendements moyens (t/ha)	6,74	3,57	5,16
Augmentation (t/ha)	2,49	0,74	1,62
Augmentation (%)	58,58	26,14	45,8

Lorsque les conditions permettent de réunir deux facteurs de rendement, ce dernier augmente encore de manière tout aussi significative qu'auparavant (tab n°26). Les augmentations figurant dans ce tableau sont prises par rapport à celle précédemment obtenue avec un seul facteur. Avec ces deux facteurs, l'augmentation est très importante pour le sol argileux (2,49 t/ha). Pour le sol limoneux, l'accroissement moyen du rendement reste quasiment le même (0,79 t/ha). Par rapport à la combinaison conventionnelle, le niveau de rendement a quasiment doublé, surtout pour le sol argileux. Il semble que, plus de nombre de facteurs du SRI augmente, plus on se rapproche du potentiel de production de la plante. L'explication en est que l'on tend vers les conditions optimales de développement de la plante.

2.2.2.3. Les effets de l'adoption de trois facteurs du SRI

Les rendements obtenus suivant chaque combinaison sont résumés dans le tableau n°27.

Tableau n°27 : Rendements moyens obtenus par adoption de trois variables du SRI

Combinaison	Sols argileux (NORD)	Sols limoneux (SUD)	Moyenne
8j/1b/SME/CPT	7,70	4,07	
20j/1b/AME/CPT	7,45	4,10	
8j/3b/AME/CPT	9,32	5,17	
8j/1b/AME/NPK	8,77	5,00	
Rendements moyens (t/ha)	8,31	4,59	6,45
Augmentation (t/ha)	1,57	1,02	1,29
Augmentation (%)	23,29	28,57	25

Avec trois facteurs de rendement, les résultats ne sont plus comparables avec le rendement moyen national (tab n°28). Toutes les combinaisons affichent des rendements de plus de 4 t/ha. Mais, celle qui risque d'attirer beaucoup de gens sera certainement les plants de 8 jours,

repiqués à 3 brins, avec maîtrise d'eau et du compost. Si le paysan dispose des moyens pour combiner les trois facteurs simultanément, après une première année de découverte du système, il pourra adopter cette nouvelle combinaison qui lui fournira plus de 9 t/ha. Ainsi, s'il ne dispose que de trente (30) ares de rizières, il obtiendra 3 tonnes. Cela peut couvrir les besoins d'une famille de six (06) à huit (08) personnes avec un surplus net de riz commercialisable, de 1 tonne environ.

2.2.2.4. Les effets de l'adoption de toutes les variables du SRI

La combinaison de 8j/1b/AME/CPT donne le meilleur rendement moyen de 10,35 t/ha (NORD) et 6.39 t/ha (SUD), soit une moyenne de 8,37 t/ha équivalente à une augmentation de 1,92 t/ha par rapport à la combinaison de trois (03) facteurs.

Cette augmentation de rendement représente normalement le potentiel de production du SRI, sous les conditions des hautes terres, si les paramètres pour son obtention sont réunies.

La combinaison de tous les facteurs est donc le meilleur gage du succès, avec une moyenne de 10 t/ha environ sur les sols argilo-limoneux.

2.3. Recommandations

Il est donc vivement recommandé de bien connaître le type de sol avant l'adoption du SRI. Sinon, les rendements obtenus risquent de ne pas correspondre aux attentes. Les rendements obtenus lors de ces expérimentations correspondent aux sols argilo-limoneux et limono-sableux d'Anjomakely. Pour l'extrapolation aux autres situations, il faut considérer en même temps les conditions climatiques, édaphiques, hydrologiques ... qui peuvent toutes avoir des influences sur le rendement.

Pour l'adoption du SRI, il faut commencer sur une plus petite surface (en général, les paysans adoptent le 1/3 de la rizière). Une fois que la technique est acquise, il suffit de bien organiser le travail et remplir ensuite toutes les conditions requises, pour chaque facteur et pour chaque opération culturale.

La réalisation des trois sarclages pendant les 30 à 40 jours suivant le repiquage est, certes difficile à assurer, mais est indispensable pour permettre un bon développement de la plante. En effet, en maintenant le sol de rizière tout juste humide pendant la phase végétative, on favorise des adventices herbacées. Comme ces dernières sont à un niveau presque au ras du sol, il faut passer d'une manière plus « énergique » pour les arracher. Ceci n'est pas parfaitement réalisé avec le sarclage manuel. Le passage de la houe sarcleuse est donc impératif.

CONCLUSION PARTIELLE

Avec les résultats de ces expérimentations, les hypothèses de départ s'avèrent valables. L'augmentation de rendement avec le SRI est encore une fois vérifiée sous les conditions des hautes. Les différents facteurs de rendement du SRI ont chacun une influence dont l'importance a été précisée par les rendements obtenus.

Ainsi, dans l'ordre décroissant, l'âge de transplantation contribue à la plus importante augmentation du rendement. La maîtrise de l'eau est essentielle. Le recours aux amendements organiques s'avère aussi efficace que le NPK. Ensuite, le nombre de brins par touffe peut encore apporter des améliorations au rendement.

Les deux types de sols choisis pour les expérimentations ont montré différentes réactions vis-à-vis des traitements appliqués. Dans l'ensemble, le SRI a permis, à chaque fois, une amélioration du rendement. Toutefois, les meilleurs résultats ont été obtenus avec les sols argileux.

3. IMPORTANCE DE LA FIXATION BIOLOGIQUE DE L'AZOTE SUR LE RIZ EN SRI

La fixation biologique de l'azote marque un point déterminant dans le domaine de la production agricole. Sa compréhension a été perçue comme un grand événement scientifique. Elle est envisagée pour procurer des économies dans la pratique de la fertilisation. Elle semble correspondre à une sorte d'alternative aux producteurs des pays en voie de développement souffrant d'un accès limité aux intrants. Pour certains auteurs, la fixation biologique de l'azote est la seule et unique alternative pour l'augmentation croissante du coût des engrais sans perte de rendement (Dobereiner, 1987). Malgré tout, la fixation biologique de l'azote est un domaine de recherche encore vaste dans lequel de nombreux chercheurs et équipes de chercheurs travaillent activement.

3.1. Le mécanisme de la fixation biologique de l'azote

La fixation biologique de l'azote est l'œuvre de bactéries. Elle constitue l'une des voies biologiques de restitution de l'azote atmosphérique au niveau de la terre. De nombreuses études ont ouvert la voie de la mise en valeur de cette propriété dans la production agricole, notamment pour le cas des légumineuses. Les résultats obtenus sont spectaculaires (rendement meilleur, faible apport d'intrant) et les possibilités d'action ont été multipliées (régénération et protection des sols, améliorations des sols, intégration dans les rotations culturales ...).

Actuellement, de nouvelles perspectives semblent ouvrir la voie sur les éventualités de l'existence d'une forme de fixation d'azote de l'air sur les plantes non légumineuses. La forme la plus connue chez les plantes non légumineuses est le cas de la canne à sucre. Cette principale culture du Brésil a été étudiée spécialement et un modèle de fixation tout à fait performant a permis à ce pays de remplacer progressivement la fertilisation azotée par la fixation biologique de l'azote.

3.1.1. La réduction de l'azote

L'azote est un des éléments les plus importants pour la vie des plantes. Toutefois, la plupart d'entre elles n'utilisent que l'azote combiné avec d'autres atomes (tels ammoniums, nitrates ...). Pourtant, la plus grande concentration d'azote sur terre est celle de l'atmosphère (environ 80%). Certes, il existe des processus naturels qui permettent de tirer profit de cette importante source et de combler d'une façon naturelle les pertes dues aux conditions actuelles de production (lessivage, dénitrification ...). Cette restitution sur terre se réalise suivant des voies physique ou biologique. Le mécanisme biologique de cette restitution est la réduction de l'azote moléculaire par les bactéries (symbiotique, associative ou libre) par l'action d'une enzyme : la nitrogénase.

3.1.1.1. La structure de la nitrogénase

La nitrogénase est l'enzyme connue chez les fixateurs et intervenant dans la fixation biologique de l'azote. Jusqu'à une époque récente, on a pensé qu'il n'existe qu'une seule

nitrogénase : la molybdène nitrogénase. Maintenant, deux autres nitrogénases ont été trouvées chez *Azotobacter* : Vanadium nitrogénase et une « troisième » (Giller et Wilson, 1993).

La structure de la nitrogénase a été largement étudiée sur *Klebsiella pneumoniae*. Elle comprend deux unités :

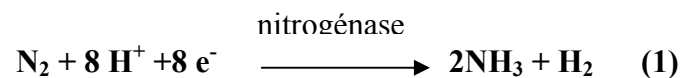
- Une unité avec le site actif de la réduction de l'azote atmosphérique : elle est aussi appelée dinitrogénase ou MoFe-protéine ;
- Une autre unité qui fournit des électrons à la première pour la réduction de l'azote moléculaire : elle est appelée dinitrogénase réductase ou Fe-protéine.

La dinitrogénase est un tétramère formée de deux sous-unités « alpha » codé par le gène *nifD* et de deux sous-unités « beta » codé par le gène *nifK*. Par contre, la dinitrogénase réductase est un homodimère codé par le gène *nifH*.

Chaque composante de la nitrogénase est en fait une protéine contenant du fer (Fe) et du soufre (S) et pouvant comporter un site porteur d'électrons. La dinitrogénase réductase ne peut transporter qu'un électron à la fois. Ainsi, on pense qu'elle sert probablement à l'emménagement temporaire de l'électron. Par contre, la dinitrogénase comporte deux autres sites métalliques (FeMoCo) qui sont considérés comme les véritables sites de la fixation d'azote.

3.1.1.2. La réduction de l'azote en ammoniac

La réaction de base est la suivante :



L'azote est d'abord réduit en ammoniac. Ce dernier sera mis à disposition de la plante (cas des bactéries symbiotiques) ou utilisé par les microorganismes et libéré après (cas des fixateurs libres). Cette réaction nécessite de l'énergie que les bactéries reçoivent de la plante hôte (cas de la symbiose), ou qu'elles tirent à partir de l'oxydation des exsudats racinaires ou des substrats carbonés présents dans le sol.

La fixation débute avec l'acquisition d'électrons par la dinitrogénase réductase, à partir d'un donneur d'électrons. En général, ces donneurs font partie du groupe des ferredoxines ou flavodoxines. Les premiers sont des protéines comportant des sites capables de transférer un électron à chaque fois (Giller and Wilson, 1993), alors que les derniers sont capables de transférer deux électrons. Ces électrons sont ensuite fournis à la dinitrogénase réductase et transférés à la dinitrogénase avec une hydrolyse parallèle d'ATP en ADP. Cette dernière réaction fournit l'énergie nécessaire à la fixation biologique de l'azote.

Ce transfert d'électrons s'accompagne normalement d'un autre concernant les protons (d'après la réaction de base). Il faut en effet un nombre égal de protons et d'électrons pour aboutir aux résultats de la fixation. La provenance réelle de ces protons est encore mal connue.

3.1.1.3. Le métabolisme de l'azote fixé

La fixation d'azote aboutit en premier lieu à la formation de l'ammoniac. Puis, ce dernier intègre le métabolisme de la plante et s'incorpore dans l'acide glutamique par l'intervention de la glutamine synthétase (GS). Cette réaction s'accompagne d'une hydrolyse parallèle d'ATP. La glutamine ainsi formée sert pour l'amination de alpha-cétoglutarate. Cette dernière réaction est sous contrôle de la glutamine-2-oxoglutarate-amino-transférase (GOGAT). Deux moles de glutamates sont produits et peuvent être réutilisés soit dans la formation de glutamine, soit dans d'autres réactions métaboliques.

L'azote fixé n'est pas utilisé par les bactéries pour le cas de la symbiose. Sitôt l'ammoniac formé, des mécanismes de contrôle inhibent l'activité de la GS de la bactérie. L'ammoniac est alors exporté vers la cellule de la plante hôte, en vue d'une incorporation avec la GS et la GOGAT. Par la suite, l'azote fixé est acheminé dans les différentes parties de la plante par des transporteurs du groupe des amides (asparagine, glutamine ...)

3.1.2. La fixation biologique: cas des légumineuses

Le modèle de fixation chez cette famille de plantes étant le plus étudié jusqu'à présent (Looze, 1984), cette partie de l'étude lui sera consacrée pour mieux comprendre l'interaction entre la plante et les bactéries fixatrices en général. C'est plus simple pour ce cas de caractériser l'interaction entre la plante et la bactérie, par l'apparition de nodulation au niveau des racines. Ainsi, cette nodulation est le critère de détermination de l'activité des agents fixateurs. La connaissance du déterminisme de la fixation permettra alors de mieux identifier les voies de manifestation de la fixation biologique de l'azote chez les plantes non légumineuses.

3.1.2.1. Les premiers signaux

Les racines rejettent par leur métabolisme normal, des substances qui ont des effets attracteurs sur certains microorganismes du sol. Certaines d'entre elles appartiennent aux groupes des flavonoïdes tels les flavones, isoflavones, flavonones ... pour les bactéries fixatrices d'azote (Heller et Lance, 2000). A la suite de leur sécrétion, il y a accumulation de bactéries autour des poils absorbants. Ce phénomène correspond à un effet rhizosphérique exercé par les racines des plantes (cf. 3.3.3.3.). Ensuite, les poils se recourbent sous l'action des bactéries. Par hydrolyse de la paroi cellulaire, celles-ci pénètrent à l'intérieur des racines, au niveau des poils absorbants.

3.1.2.2. La production des facteurs de nodulation

Les flavonoïdes sont en fait des mélanges d'inhibiteurs ou d'inducteurs du gène de la nodulation. En réponse à ces flavonoïdes, les bactéries sécrètent des facteurs de nodulation. Ces facteurs sont codés par les gènes des bactéries. Comme il s'agit également d'un mélange de facteurs, leur composition va déterminer la reconnaissance du *Rhizobium* par la plante. Certains facteurs peuvent être actifs positivement alors que d'autres antagonistes. L'équilibre entre ces facteurs détermine la reconnaissance du *Rhizobium* par la plante. Cette reconnaissance est essentielle pour la plante. En effet, puisque la symbiose représente une dépense énergétique pour la plante, il lui faut déterminer avec certitude le partenaire idéal, capable de lui fournir l'azote nécessaire.

De leur côté, les facteurs actifs vont induire la déformation de la racine. Les bactéries évoluent dans un cordon d'infection. Lorsque celui-ci atteint les cellules du cortex, des bactéries sont libérées et induisent une intense multiplication mitotique de celles-ci.

3.1.2.3. La nodulation

La nodule prend forme avec la multiplication des cellules du cortex. Elle se charge de pigments appelés « leghémoglobine », synthétisés à l'intérieur du cytoplasme des cellules de la plante. Ces pigments ne pénètrent pas dans le cytoplasme des bactéries, ils restent dissous dans le cytosol. Ce sont des caractéristiques de l'activité des nodules.

La nodule peut prendre différentes formes : souterraine (cas de la plupart des légumineuses) et aérienne (cas de *Sesbania rostrata*). Elle peut avoir des formes de croissance déterminée ou indéterminée. En principe, son principal rôle est de restreindre la pression partielle d'oxygène du milieu ambiant, au minimum exigé par la respiration et la fixation d'azote (cf. 3.1.3.1.)

3.1.3. Les facteurs de la régulation

La fixation de l'azote atmosphérique, de par sa nature biologique, répond à des conditions particulières de réalisation.

3.1.3.1. Teneur en oxygène du milieu

La nitrogénase, principale enzyme de la fixation, est extrêmement sensible à l'oxygène. C'est peut-être dû à l'évolution des bactéries, à une époque où l'atmosphère terrestre n'en contenait que faiblement (Giller et Wilson, 1993). Avec la concentration actuelle en oxygène de l'air, les bactéries devaient développer des moyens de protection de la nitrogénase :

- Pour les anaérobies stricts, le problème est plus simple : cas de *Clostridium pasteurianum*. En effet, comme ces bactéries n'évoluent qu'en absence d'oxygène, la nitrogénase ne risque pas d'être affectée par l'oxygène.
- Pour les anaérobies facultatifs, le mécanisme de protection est de nature génétique. L'expression de la fixation d'azote dépend d'abord de l'activité de la nitrogénase. Or, dans le cas présent, il n'y a de synthèse de nitrogénase qu'à une concentration déterminée d'oxygène (Gussin et al, 1986 cité par Giller et Wilson, 1993), cas de *Klebsiella pneumonia* avec une tension d'oxygène optimale de 0,03 μM pour la fixation (la tension dans l'eau saturée d'oxygène étant de 225 μM [Hill, 1992 cité par Giller et Wilson, 1993])
- Pour les aérobies stricts, la fixation résulte d'un paradoxe : ces bactéries ont besoin d'oxygène pour leur respiration (et la synthèse d'ATP, nécessaire à la fixation), alors qu'une forte concentration inhibe l'enzyme. Les conditions optimales de la fixation se situent là où le niveau d'apport d'oxygène correspond exactement aux besoins de la respiration. Si l'apport est insuffisant, la respiration et la fixation se trouvent réduites ; par contre, s'il dépasse le niveau requis par la respiration, la nitrogénase sera

inactivée. Par conséquent, les bactéries aérobies strictes ne fixent l'azote qu'aux conditions microaérophiles (tension d'oxygène largement inférieure à celle de l'atmosphère). A cet effet de fixation, elles adoptent diverses stratégies :

- Certaines migrent vers les faibles concentrations pour pouvoir effectuer la fixation (cas de *Azospirillum sp.*). Lorsque le niveau de concentration idéal est atteint, les bactéries s'établissent et forment parfois une sorte de voile protecteur en culture.
- D'autres s'agglutinent en colonie, où la tension d'oxygène reste faible en son milieu (caractéristique de *Derxia gummosa*). Seul ce milieu reste actif pour la fixation d'azote.

A cause de la variabilité des groupes bactériens capables de la réduction de l'azote moléculaire (vis-à-vis de l'oxygène), les conditions d'aérations du sol déterminent les genres qui peuvent y subsister. Aussi, l'anaérobiose créée en riziculture de submersion ne permet-elle que l'établissement de bactéries supportant l'absence d'oxygène comme celles du Genre *Clostridium*. Dans ce cas, la capacité de fixation est très limitée (5 à 10 kg/ha). En adoptant un régime successif journalier d'assèchement et de mise en eau, le SRI crée des conditions microaérophiles dans la couche de sol directement exploitable par les racines. Cette situation favorise l'activité de la nitrogénase chez les fixateurs des deux derniers groupes cités précédemment, au voisinage direct des racines.

3.1.3.2. La présence d'azote dans le sol

La fixation d'azote résulte d'un mécanisme évolutif qui a permis aux bactéries d'utiliser l'azote de l'air. Toutefois, cette réaction requiert une importante quantité d'énergie : 16 moles d'ATP nécessaires pour la réduction d'une mole d'azote moléculaire. Seulement, en tenant compte des conditions réelles, cette dépense peut atteindre facilement 28 moles d'ATP (Saari et Ludden, 1986 cité par Giller et Wilson, 1993). Cette valeur représente environ 33% des photosynthétats lorsqu'on considère le coût total de la fixation et l'énergie dépensée pour la translocation.

La présence d'azote (sous forme minérale ou organique) dans le sol rend cette dépense énergétique inutile. En effet, il est plus raisonnable à la bactérie d'utiliser cet azote qui lui coûte moins cher en énergie. Ce mécanisme a été largement étudié chez *Klebsiella pneumoniae*. Un moyen de contrôle moléculaire permet à cette bactérie de déterminer le niveau de concentration d'azote dans le milieu.

La richesse du sol en azote devient alors un facteur inhibiteur de la fixation biologique de l'azote. La synthèse de la nitrogénase est inhibée par la présence d'ions ammoniums ou nitrates à un certain degré, dans le sol. C'est ainsi que s'expliquent les effets dépressifs des engrais azotés sur la fixation de l'azote de l'air.

La teneur en Molybdène du sol peut aussi être un facteur limitant de la fixation, puisque la structure de la nitrogénase comprend un complexe métallique de Molybdène (ou de Fer-Molybdène), dont la carence rendrait impossible la synthèse de l'enzyme.

3.1.3.3. La présence de souches spécifiques

Les souches microbiennes spécifiques à chaque espèce végétale cultivée ont fait l'objet de nombreuses études (surtout pour les légumineuses). Il faut savoir que certaines souches sont capables de s'associer à un large spectre de plante alors que d'autres ne le sont

pas. Cela dépend de leur affinité respective. Ainsi, la connaissance de cette spécificité pour chaque plante et pour chaque souche bactérienne capable de former avec elle un complexe de fixation, s'avère donc nécessaire.

Etant donné le nombre élevé de microorganismes dans le sol, l'établissement du complexe de fixation est le résultat d'une compétition entre les agents fixateurs et les autres microorganismes. Il faut donc que les bactéries fixatrices spécifiques de la plante soient présentes et capables de s'exprimer face à cette masse microbienne. Pour cela, un mécanisme sélectif est exercé par la plante, afin de déterminer la bactérie susceptible de se constituer en un complexe symbiotique avec elle. Cette sélection s'effectue par l'intermédiaire des facteurs de nodulation émis par la bactérie (cf. 3.1.2.2.).

Cette propriété donne lieu à l'identification des souches spécifiques pour chaque culture. Ainsi, on peut donner une avance pour ces souches par l'inoculation des semences avant le semis. Comme la semence est associée à un cortège bactérien de fixateurs spécifiques, ces bactéries peuvent, dès les premiers stades végétatifs, infecter la plante.

Par ailleurs, la notion de spécificité permet également d'expliquer l'absence de nodulation de certaines légumineuses sous certains sols. Après inoculation, ces mêmes sols permettaient l'établissement de la fixation. L'absence de nodulation chez la plante peut se traduire par, soit l'absence de son homologue bactérien du milieu, soit par son incapacité de se manifester.

3.2. La BNF et les plantes non légumineuses : cas des *Azospirillum*

Avec la découverte de la fixation symbiotique de l'azote chez les légumineuses et les récentes recherches réalisées dans ce domaine, l'extension de cette propriété à d'autres plantes a été envisagée. Le mécanisme de la fixation étant principalement sous contrôle génétique, de nombreuses recherches ont permis de déterminer une partie des gènes bactériens responsables de cette fixation. En outre, des genres bactériens capables de fixer l'azote ont été identifiés actuellement en association avec les racines de quelques plantes non légumineuses. L'*Azospirillum* est le genre le plus important et susceptible d'intéresser le riz. Des recherches ont été effectuées sur l'association entre cette bactérie et le riz. Cette étude réalisée dans le cadre du SRI devra apporter des renseignements complémentaires dans ce domaine.

3.2.1. Les étapes importantes de la BNF

Au niveau international, les recherches basées sur la fixation biologique de l'azote ont connu un essor considérable depuis les crises pétrolières des années 70. En effet, étant donné que les engrais azotés sont obtenus par synthèse, leur production représentait alors une consommation importante en produits pétroliers. De plus, pour la synthèse d'une tonne d'engrais azotés, il faut dépenser environ une tonne de pétrole et une autre tonne pour le transport et l'épandage (Denarié, 1994). Ainsi, pour les 80 millions de tonnes de consommation d'engrais azotés dans le monde, il faut presque 160 millions de tonnes de pétrole (Looze, 1994). Avant la crise pétrolière, l'achat d'engrais azotés représentait déjà 25 %

des dépenses de l'agriculture. La flambée du prix du pétrole a entraîné un « surcoût » insupportable pour l'agriculture.

Parmi les cultures les plus touchées par cette crise, les céréales attirent l'attention des responsables, car étant les plus grands consommateurs d'engrais azotés. Sur le plan énergétique, la dépense pour la fertilisation occupe une place importante dans le budget d'exploitation agricole (tab n°28). Les céréales consomment beaucoup plus d'énergie que les légumineuses, du fait que ces dernières peuvent se procurer elles-mêmes une partie de leurs besoins azotés (Vilain, 1997).

Tableau n°28 : Dépenses énergétiques pour chaque type de culture dans les pays développés (1000 Kcal/ha)

	Céréales	Légumineuses
Travail du sol	0,6	0,5
Fertilisation	2,3	0,6
Semis	0,5	0,7
Entretien	0,4	0,2
Récolte	0,1	0,1

La découverte d'une partie des gènes de la fixation symbiotique de l'azote (gène *nif*) sur la bactérie *Klebsiella pneumonia*, a permis de nouvelles perspectives. Plusieurs projets ont été lancés en Europe et aux Etats-Unis pour trouver principalement une alternative à la fertilisation azotée sur les céréales.

Entre 1983 et 1990, les bases de données de la « Commonwealth Agricultural Bureau » (CAB) ont rapporté 5 600 publications se rapportant à la fixation biologique de l'azote. Au cours de la même période, le nombre de brevets établis dans ce domaine s'élève à 84 (environ 7,5% de l'ensemble des brevets en biotechnologies végétales). Cela nous donne une moyenne d'environ 500 publications par an, sur les résultats de recherche ou des perspectives d'avenir.

3.2.2. Les complexes fixateurs et les voies de recherche envisagées

Pour le cas des céréales, les recherches sont relativement peu nombreuses. Les grands laboratoires de recherche se sont davantage focalisés sur la fixation symbiotique de l'azote qui s'avérait plus efficace, pour le cas des légumineuses (Looze, 1994). Les premiers résultats ont montré que la symbiose avec les légumineuses est capable de fixer plus de 100 kg d'azote par hectare alors que la fixation associative n'a qu'une faible capacité de 5 à 10 kg par hectare. Les voies de recherche envisagées par les chercheurs sont orientées vers le transfert des gènes *nif* aux céréales afin que celles-ci fixent toute la quantité d'azote nécessaire.

Les recherches réalisées dans ce domaine (depuis les années 70) ont établi les principaux modèles de fixation d'azote sur les plantes non-légumineuses à trois types :

3.2.2.1. La fixation libre

C'est le cas de *Clostridium* (anaérobie) et d'*Azotobacter* (aérobie). Dans ce modèle, les bactéries vivent indépendamment de la plante. Elles fixent l'azote pour leur besoin. Toutefois, le niveau de cette fixation reste faible (5 à 10 kg/ha).

Les fixateurs libres utilisent directement l'azote qu'ils ont réduit. A ce titre, ils peuvent être considérés comme perspectives futures pour les plantes non-légumineuses car le mécanisme ne nécessite, ni d'association, ni de symbiose.

Un autre problème rencontré avec les fixateurs libres concerne leur incapacité à s'établir dans la rhizosphère. Si le même mécanisme que chez les légumineuses s'applique à ces fixateurs, il semble qu'il n'y ait pas de correspondance entre le signal émis par la plante et ces bactéries (cf. 3.1.2.).

3.2.2.2. La fixation symbiotique

A vrai dire, aucun modèle faisant interagir directement en symbiose une plante non-légumineuse et une bactérie n'a pu être identifié. Le seul modèle connu, présentant un caractère symbiotique, est le complexe *Anabaena-Azolla*. Ce modèle est principalement exploité en Asie pour apporter de l'azote aux rizières. Cette fixation a aussi fait l'objet d'un projet de vulgarisation à Madagascar (à travers les actions de l'ONG Ramilamina).

La particularité de cette symbiose est que l'azote fixé par l'ensemble n'est pas libéré immédiatement dans l'eau ou dans la rizière. Il faut attendre la mort et la décomposition du complexe avant que l'azote ne soit mis à disposition de la plante. L'effet d'une telle technique est similaire à l'application d'une dose de 30 kg N/ha sur douze (12) sites expérimentaux en Asie (tab n°29)

Tableau n°29 : Rendements obtenus avec la fertilisation minérale et l'utilisation d'azolla (Watanabe, 1982)

Traitements	Rendements moyens obtenus (t/ha)
Témoin	2,6
30 kg N/ha	3,2
Azolla cultivé après repiquage	3,1

3.2.2.3. La fixation associative (essentiellement par le genre *Azospirillum*)

Azospirillum a fait l'objet d'études particulières sur les sols tropicaux (en particulier les travaux de Dobereiner en Amérique latine). Ce sont des bactéries gram-négatif, très mobiles qui vivent en général en aérobie, mais leur propriété fixatrice d'azote ne se développe que sous certaines conditions particulières.

Puisque les *Azospirillum* qu'ils n'ont pas de structure particulière pour la protection de la nitrogénase, ils n'expriment leur potentiel de fixation que lorsque les conditions d'aération requises sont remplies.

En général, les plantes rejettent par leurs racines des substances carbonées, utilisées par les microorganismes pour leur croissance (la biotine, par exemple)

3.3. La liaison entre la BNF et le SRI : analyses faites aux laboratoires de microbiologie

La fixation biologique de l'azote sur le SRI est une hypothèse qui a été lancée au niveau de l'ESSA/Agriculture comme une explication complémentaire du haut rendement obtenu avec un minimum de fertilisation du sol. Des travaux de recherches ont déjà été lancés dans le domaine des céréales, pour la détermination du complexe de fixation d'azote. Sur la base des résultats obtenus, cette étude a essayé de déterminer les opportunités réelles de la fixation d'azote, sur le double plan de la science et de la technique, pour le cas du SRI.

3.3.1. Les observations faites

Maintenant une nouvelle voie semble s'ouvrir avec les résultats du SRI. En effet, en se basant sur l'une des notions fondamentales de l'agriculture que représente la restitution en matière de fertilisation. Le SRI semble pourtant déroger à cette loi. En particulier, s'il a été toujours recommandé d'apporter au sol l'équivalent en unité fertilisante de la part prélevée par la plante, le SRI continue de donner des rendements spectaculaires avec un minimum d'apport. Des essais menés à la station de BEFORONA durant la saison culturale 1999/2000 montrent qu'un apport de 2 t/ha de fumier, avec enfouissement de la paille, pouvait avoir le même effet que d'autres doses plus élevées (tab n°30).

Tableau n°30 : Rendements du SRI sous différents traitements à la station CDIA/BEFORONA (Raobelison, 2000)

<i>TRAITEMENTS</i>	<i>PLANTS DE 8 JOURS</i>	<i>PLANTS DE 20 JOURS</i>
Paille enfouie	7.87	7.48
Paille + Fumier 2 t/ha	8.99	7.65
Paille + Fumier 4 t/ha	9.81	7.99
Paille + Fumier 8 t/ha	10.20	8.19

De plus, les éléments d'études capitalisés actuellement portent à croire que des phénomènes externes à la plante contribuent à la mise à disposition d'une quantité supplémentaire d'azote pour son développement.

3.3.2. Les hypothèses

Les mêmes résultats obtenus à Beforona ont été complétés par des suivis expérimentaux de l'évolution du taux d'azote dans la rhizosphère, combinés avec les observations du développement de la plante. Par la suite, il a été confirmé l'hypothèse selon laquelle, seul un apport externe d'azote pourrait expliquer le phénomène. En effet, le taux d'azote ne semble guère changer au moment où les besoins azotés du riz sont les plus importants, c'est à dire entre le maximum de tallage et la montaison (tab n°31). On pourrait croire que la plante n'a pratiquement pas prélevé l'azote du sol, comme dans le cas de difficulté d'absorption d'azote ou carence du sol en cet élément. Des signes symptomatiques, en guise de preuve, auraient dû apparaître. Pourtant, le riz semblait bien se porter avec des

rendements très élevés (cf. tab n°31). On peut en déduire qu'un apport supplémentaire d'azote a dû se réaliser et qu'il serait probablement d'origine atmosphérique.

Tableau n°31 : Evolution du taux d'azote dans le sol durant un cycle de développement du riz dans la station CDIA/BEFORONA, sur plusieurs traitements (Raobelison, 2000)

<i>TRAITEMENT</i>	INITIAL	TALLAGE	MONTAISON	FLORAISON	MATURATION
Paille enfouie(1)	2.4	2.07	4.03	3.77	3.07
(1)+fumier 2t/ha	3.0	3.64	2.98	4.31	2.72
(1)+fumier 4t/ha	4.1	4.13	4.01	3.75	3.27
(1)+fumier 8t/ha	5.0	3.48	3.74	4.35	3.31

Les acquis de ces recherches laissent entrevoir un espoir de confirmation d'un modèle de fixation plus performant pour le cas du SRI. Etant donné la complexité des recherches à envisager, il est impératif de bien comprendre les mécanismes physiologiques d'élaboration du rendement pour le riz et d'évaluer prospectivement l'effet de la fixation d'azote sur le rendement.

3.3.3. Les analyses de BNF faites sur des racines de riz sous SRI et sous culture traditionnelle à Anjomakely

Ces analyses microbiologiques ont porté essentiellement sur les bactéries fixatrices d'azote dans les racines du riz. En milieu Dobereiner, l'objectif était tout d'abord de confirmer l'existence ou non de ces bactéries dans les racines. Ensuite, il faut déterminer dans quelle partie des racines elles sont localisées principalement (rhizosphère ou intérieur des racines). Puis, finalement, en mettant en correspondance ces résultats avec les rendements obtenus, une partie des énigmes du SRI peut être mise à jour.

Néanmoins, ces résultats doivent être pris avec précaution car l'isolement d'*Azospirillum* au niveau des racines ne renseigne que très peu sur la nature de leurs relations avec le riz. La caractérisation de cette relation est déjà complexe du fait de l'absence de modifications morphologiques visibles, (comme les nodules chez les légumineuse) provoquées par l'interaction entre les bactéries et la plante. De plus, comme la colonisation du milieu racinaire s'effectue avant les effets sur la croissance de la plante (Douglas et al, 1985 cité par Dobereiner, 1987), la seule présence de bactéries dans le milieu peut constituer une étape intermédiaire quant à la mise en place de l'association.

3.3.3.1. La méthodologie d'analyse

Les résultats de l'analyse doivent pouvoir renseigner sur les hypothèses d'une fixation biologique de l'azote avec le SRI. A ce titre, l'étendue de l'étude sera limitée aux bactéries fixatrices d'azote. Toutefois, étant donné la diversité des agents fixateurs d'azote connus et identifiables, l'analyse sera orientée sur les *Azospirillum*.

a. Echantillonnage

Au vu du nombre de parcelles d'expérimentation et du nombre limité d'analyses possibles, le choix des plants a été soumis aux principes ci-après :

- Certains échantillons doivent représenter l'essentiel des pratiques recommandées par le SRI. En effet, cette condition est essentielle pour pouvoir affirmer ou infirmer l'hypothèse de la fixation biologique de l'azote atmosphérique avec le SRI ;
- Entre les échantillons, les variantes de fertilisation utilisées doivent être représentées. Cela doit amener à distinguer leur effet respectif sur le mécanisme de la fixation ;
- Certains échantillons doivent figurer pour la diversité des pratiques rizicoles environnantes. Cette diversité inclut la nature du sol, et les différences d'itinéraire technique.

Le nombre d'échantillon a été défini à six (06), et correspond aux critères définis dans le tableau n°32.

Tous ces échantillons, à l'exception du n°6.TRAD, sont des plants âgés de 8 jours, repiqués à 1 brin avec un écartement de 30 cm x 30 cm. Ils ont été prélevés au stade fin tallage - début montaison durant lequel la plante exprime un important besoin en azote.

Tableau n°32: Caractéristiques des échantillons prélevés pour analyse microbiologique (*)

Echantillons	Programmes	Talles totales	Rendement	Remarques
1. CPT/S	SUD – CPT – AME	47	6,62	
2. SSF/S	SUD – SSF – AME	32	2,1	Prélevé sur les espaces situés en bordure des plans expérimentaux
3. CPT/N	NORD – CPT – AME	78	10,47	
4. SSF/N	NORD – SSF – AME	45	2,65	
5. NPK/N	NORD – NPK – AME	68	9,04	
6. TRAD	Traditionnel	17	1,8	Prélevé sur une rizière voisine

(*) CPT : compost, AME : avec maîtrise d'eau, SSF : sans fertilisation, N : site NORD (argilo-limoneux), S : site SUD (limono-sableux), TRAD : traditionnel

b. Principes de l'analyse

Les principes de l'analyse reposent sur les propriétés sélectives d'un milieu spécialement identifié pour la culture des *Azospirillum sp.* En fait, les bactéries ont différentes réponses par rapport à où leur environnement. Lorsque les substances essentielles à leur métabolisme sont réunies dans le milieu, elles se développent normalement. Inversement, lorsque ces conditions ne sont pas remplies, ces mêmes bactéries ne peuvent pas se développer, et d'autres bactéries prolifèrent. Pour cette analyse, le milieu de Dobereiner a été choisi car il répond aux attentes formulées précédemment.

Afin de rendre le maximum d'information possible sur les différentes voies de fixation par *Azospirillum sp.*, deux niveaux d'analyse ont été effectués à savoir :

- La détermination de la population fixatrice présente au niveau de la rhizosphère : l'objectif est de savoir si, à ce niveau, les conditions sont réunies pour une fixation d'azote. Dans ce cas, on adoptera l'hypothèse suivante : si les résultats du

dénombrement démontrent une plus forte présence d'*Azospirillum sp* dans la rhizosphère que dans les racines, alors la part de fixation y est plus importante.

- Les fixateurs intra-racinaires : les résultats doivent pouvoir renseigner sur les facultés des *Azospirillum sp* à pénétrer les racines. Dans l'hypothèse où les bactéries seraient en plus forte concentration à ce niveau que dans la rhizosphère, alors la fixation serait plus active à l'intérieur des racines. Une exploration approfondie devrait pouvoir expliquer ce phénomène. Cependant, la présente étude ne pourra pas apporter ces informations.

3.3.3.2. Les résultats obtenus

Pour identifier la présence ou non des bactéries, des suspension-dilution de solution rhizosphérique et intra-racinaire ont été réalisées. Ces suspension-dilution sont ensuite testées sur le milieu sélectif (liquide). A partir des réponses obtenues par niveau de dilutions successives, le nombre de bactéries par unité de volume de solution est donnée par la table de Mac Grady établi spécialement pour ce genre de dénombrement. Les résultats se présentent comme le montre le tableau n°33.

Tableau n°33 : Dénombrement des bactéries (Laboratoire de microbiologie, FOFIFA)

Echantillons	Rhizosphère (10 ³ par ml de solution rhizosphérique)	Intra-racinaire (10 ³ par mg de broyat)	Rendement (t/ha)
TRAD	25	65	1,8 ^(*)
SSF SUD	25	75	2,1 ^(*)
NPK NORD	25	450	9,04
SSF NORD	25	1100	2,65
CPT NORD	25	1400	10,47
CPT SUD	25	2000	6,62

(*) Notre estimation

En ce qui concerne l'importance de la population bactérienne, on peut avancer doré et déjà trois remarques :

- Dans l'environnement rhizosphérique, la population bactérienne fixatrice d'azote a pratiquement la même importance. Ainsi, les différents traitements fertilisants appliqués n'ont pas d'influence majeure sur l'ensemble.
- Dans la zone intra-racinaire, des différences plus importantes sont observables. La plus importante densité de population se rencontre avec les échantillons sous compost (CPT). Les facteurs ayant un effet limitant sur la prolifération de ces bactéries sont les engrais chimiques et la méthode traditionnelle.
- En absence de fertilisation, la population microbienne est moins importante que celle des échantillons sous compost (CPT) mais plus importantes que sous NPK. Malheureusement, cela n'a pas pu être vérifié pour le site SUD car il manque les résultats sous NPK.

Pour l'ensemble de ces résultats, le CPT NORD donne un meilleur rendement que le CPT SUD. Lors des observations sur terrain, on a constaté une accélération de la maturation des plants du site SUD, où la récolte est aussi moins importante. Le compost n'a donc pas le même effet sur les deux sites. L'incitation bactérienne attendue s'est apparemment atténuée,

et la plante a formé rapidement ses organes reproducteurs, comme si elle s'est trouvée en état de stress.

En absence de fertilisation, le rendement du site SUD reste proche du rendement national. Puisque le nombre de fixateurs est faible, seul le sol a assuré l'approvisionnement du plant de riz en azote. Ceci ramène la situation à celle de la plupart des riziculteurs malgaches. Le nombre de bactéries pour les deux niveaux d'analyse est pratiquement identique. Sans amendement, il est donc impossible de bénéficier de la fixation biologique de l'azote.

L'application de NPK donne des rendements élevés, mais le nombre de fixateurs est réduit par rapport à celui des plants sous compost. La prolifération bactérienne est donc limitée par l'apport d'engrais. Il y a cinq fois moins de fixateurs sur les plants avec NPK, comparé aux plants sous compost. Si les deux types de fertilisation donnent les mêmes rendements, la dépense monétaire résultant de l'application de NPK affecte davantage le budget de l'exploitation.

A ce stade, les explications de ces phénomènes reposent sur les pratiques culturales adoptées. En effet, comme tous les échantillons sont issus des parcelles soumises à la maîtrise de l'eau, l'environnement rhizosphérique a une pression partielle d'oxygène trop élevée pour que les bactéries puissent s'y établir. D'après les recherches faites par Dobereiner, les *Azospirillum* requièrent des conditions microaérophiles pour mieux se développer. De plus, la nitrogénase étant très sensible à l'oxygène, un taux élevé d'oxygène inhibe sa propriété réductrice de l'azote moléculaire.

Cependant, cette fixation biologique de l'azote représente une assez importante dépense d'énergie pour la plante (cf. 1.3.2.). Par conséquent, lorsque l'environnement est suffisamment enrichi en azote, l'association cesse de fonctionner et la plante se cantonne à son absorption.

Les *Azospirillum* ont besoin d'une quantité d'azote incitative pour leur développement (Dobereiner, 1987), avant que la fixation ne s'établisse. Une fois que cette source commence à s'épuiser, le complexe de la fixation se met en place pour approvisionner toute la bactérie et la plante qui lui est associée. En contre partie, la plante fournit à la bactérie des substances carbonées pour ses besoins métaboliques. Ceci explique la différence entre les échantillons SSF et CPT. En effet, le compost a un effet incitateur sur les fixateurs, et en absence de toute fertilisation, la bactérie doit d'abord essayer de survivre, et surtout subir la compétition des autres colonies bactériennes dans le sol à la fois pour le carbone et l'azote.

3.3.3.3. Caractérisation des souches

Puisque les fixateurs existent dans les racines du riz, surtout en SRI, il s'agit maintenant d'essayer de déterminer la composition de la population présente au niveau de chaque échantillon. Après la suspension-dilution, les bactéries ont été mises en culture sur milieu solide en boîte de pétris. Puis, chaque colonie bactérienne a été isolée et purifiée. Trois souches de fixateurs ont été ainsi isolées (tab n°34) à défaut de l'identification qui ne peut pas être réalisée sur place.

Tableau n°34 : Composition des colonies bactériennes dans chaque échantillon (*)
(Laboratoire de microbiologie, FOFIFA)

Echantillon	Souche A	Souche B	Souche C	Localisation	Rendement
-------------	----------	----------	----------	--------------	-----------

TRAD	X	X		Rhizosphère	1,8
SSF SUD	X	X		Rhizosphère	2,1
NPK	X	X	X	Racine	9,04
SSF NORD	X	X		Racine	2,65
CPT NORD	X	X	X	Racine	10,47
CPT SUD	X	X		Rhizosphère	6,62

(*) X signifie présence

A partir de ces résultats, plusieurs constatations peuvent être formulées :

- La présence des souches dans la racine est déterminée par le SRI et le site NORD. Les échantillons issus de la méthode traditionnelle et du site SUD ne permettent pas à ces souches de pénétrer l'intérieur des racines.
- La souche C est absente sur le site SUD, sur tous les SSF et sur l'échantillon issue de la méthode traditionnelle.
- Les meilleurs rendements sont obtenus en présence de la souche C. Par ailleurs, toutes les souches se localisent à l'intérieur des racines. Par la mise en correspondance du nombre de fixateurs au rendement réalisé, on suppose que l'effet des bactéries doit être plus important avec le CPT NORD qu'avec le NPK.
- Avec le CPT SUD, les bactéries sont restées au niveau de la rhizosphère. La fixation sera donc réduite car la nitrogénase est exposée à l'oxygène. Cependant, l'importance numérique des bactéries peut s'envisager comme une protection de la nitrogénase (cf. 3.1.3.1. agglutination en colonie). Ainsi, le rendement obtenu se révèle moins important qu'avec le CPT NORD.

Une première explication peut être envisagée dans la mesure où la pénétration à l'intérieur des racines est régulée par des facteurs génétiques et/ou moléculaires. Comme pour le cas des légumineuses, des enzymes pectinolytiques ont été identifiées parmi le complexe enzymatique des *Azospirillum*. Elles leur permettent d'hydrolyser la paroi racinaire et de pénétrer à l'intérieur des racines. Toutefois, cette action doit être une réponse à la sécrétion de substances racinaires par la plante, ayant pour effet l'agglutination des bactéries autour des racines (Heller et Lance, 2000).

Effectivement, la rhizosphère exerce une action d'enrichissement sélectif dans la zone proximale des racines. Comme toute plante libère dans le sol des substrats carbonés spécifiques à une population microbienne, sa présence détermine une prolifération marquée de ces microorganismes. Pour le cas de l'association *Azospirillum*-Riz, la seule sécrétion racinaire qui a un effet attractif sur la bactérie est l'oxalate (Dobereiner, 1987). Comme cette substance provient du métabolisme de la plante, il est possible que l'oxalate est libéré sous des circonstances particulières, liées à la végétation. On pense que lorsque la plante ne peut couvrir ses besoins en azote à partir du sol, elle cède une importante quantité d'oxalate qui déclenche l'établissement de l'association avec *Azospirillum*. Autrement, une telle libération constituerait une dépense inutile d'énergie.

Etant donné que les plants issus du site NORD ont reçu de bonnes conditions pour une bonne végétation, la sécrétion d'oxalate par les racines y est probablement plus élevée. Il y aurait eu par conséquent agglutination d'un nombre plus important d'*Azospirillum* autour des racines et pénétration à l'intérieur. Le mécanisme enzymatique et moléculaire de ce phénomène n'est pas encore précisé.

Actuellement, la recherche a permis d'identifier quatre espèces d'*Azospirillum*. Trois d'entre elles colonisent la plupart des sols alors que la dernière ne se développe que dans les sols salés. Ces trois espèces sont respectivement :

- *Azospirillum lipoferum* (la première espèce identifiée),
- *Azospirillum brasilense*,
- *Azospirillum amazonense*.

Azospirillum amazonense est toujours en nombre réduit par rapport aux deux premiers. En outre, il est moins commun, les premiers ayant été isolés de la surface des racines de plusieurs plantes tropicales (tab n°35).

Tableau n°35 : Présence des différentes espèces d'*Azospirillum* dans des échantillons de racines de plantes tropicales (Dobereiner, 1987)

	Sur racines lavées	Sur racines stérilisées
Nombre d'échantillons	138	77
Echantillons avec A. <i>lipoferum</i> et A. <i>brasilense</i>	85	45
Echantillons avec A. <i>amazonense</i> (en sus)	53	32

Les résultats obtenus avec cette expérimentation sont similaires aux observations faites par Dobereiner. S'agissant toutefois² de trois souches isolées et purifiées, sans identification spécifique, il est difficile de les assimiler tout de suite aux trois espèces sus-mentionnées. Toutefois, une similitude qui semble caractériser l'une de ces souches est sa présence conditionnelle. Le taux de présence d'A. *amazonense* dans le sol est de 39 à 41%. Cette valeur est pratiquement retrouvée chez la souche C avec un taux de 34% environ.

Une deuxième similitude résulte de l'association fréquente entre A. *lipoferum* et A. *Brazilense*. Il a été rapporté que ces deux espèces présentaient aussi des caractères similaires les rendant pratiquement présentes à chaque fois que certaines conditions communes aux deux sont remplies.

CONCLUSION PARTIELLE

La fixation d'azote par les *Azospirillum* est en partie confirmée. L'identification des conditions favorables au développement de ces bactéries sur SRI a apporté des notions et des voies de recherche possibles pour le futur.

Les étapes de la fixation sont similaires à celle des légumineuses. Cependant à la place de la nodulation, aucune structure visible ne se manifeste. L'idée de l'interaction entre la plante et la bactérie a été élaborée à partir de la confrontation des résultats d'analyses et des rendements obtenus. Les meilleurs rendements ont également présenté les plus importantes concentrations bactériennes. La nature de cette relation doit être précisée dans l'avenir. Les deux niveaux d'analyse réalisés ont montré nettement une capacité des *Azospirillum* à coloniser l'intérieur des racines. De plus, là où les meilleurs rendements ont été obtenus, les bactéries ont été identifiées à l'intérieur des racines. Il semble donc que deux niveaux d'investigation doivent être pris en compte dans l'avenir : l'importance des bactéries dans l'environnement racinaire et leur aptitude à pénétrer les tissus racinaires.

La fixation biologique de l'azote associée avec le SRI peut maintenant faire l'objet d'une étude plus approfondie. La présence des bactéries à l'intérieur des racines soulève une grande question. Ces résultats demandent d'autres confirmations. Mais dès lors, une question mérite d'être abordée : celle de savoir si ces bactéries sont effectivement actives.

4. ETUDE ECONOMIQUE

L'objet de cette partie est d'apporter une justification économique au choix du paysan qui décidera d'adopter le SRI. Elle pourra aussi servir à évaluer les performances de ce système d'intensification afin de mieux le situer dans le contexte agro-économique global des paysans des hautes terres. Deux axes principaux vont intéresser cette étude :

- Le concept de « coût d'opportunité » selon lequel le bénéfice réalisé par augmentation unitaire des intrants sera optimisé. Dans ce cas, il ne sera pas tenu compte des systèmes connexes qui forment l'ensemble de l'exploitation agricole.
- Le concept de « système » dans lequel des considérations plus générales vont être intégrées dans l'analyse.

4.1. Les conditions de production

En intégrant cette première partie dans l'étude économique, l'objectif est de déterminer le contexte réel dans lequel évoluent les paysans riziculteurs. Il est évident qu'il ne sera pas possible de juger la performance d'une nouvelle technique de production si les principales préoccupations des intéressés ne sont pas appréhendées de manière précise. En outre, la finalité est de pouvoir proposer une voie possible d'évolution pour chaque type d'exploitation susceptible d'adopter le SRI.

4.1.1. La dotation matérielle des exploitations agricoles

Les exploitations agricoles malgaches demeurent des plus démunies au monde si l'on en juge à leur dotation capitalistique. Cette caractéristique est fondamentale dans la conceptualisation de leur schéma de développement.

4.1.1.1. La dotation foncière

Le foncier est le premier obstacle auquel le développeur fait face. Les terrains de culture sont étroits (tab n°36). Par rapport à la catégorie d'âge des chefs d'exploitation, les plus jeunes sont les moins dotés. Pourtant, ils doivent subvenir aux besoins croissants d'une famille grandissante.

Tableau n°36 : Distribution des rizières : cas des hautes terres (Place, 1991)

Superficie cultivée (ares)	Répartition (% exploitation)
0 à 40	54,6
40 à 60	23,1
60 à 100	14,3
Plus de 100	8,0

Tel que rapporté par Razafimahery en 1976, le niveau de consommation de riz par individu serait équivalent à environ 210 kg par an environ. Rapporté au niveau moyen du rendement actuel, il faudrait un ratio d'environ 10 ares de rizières par individu consommateur pour y arriver. Cette dernière constatation soulève trois grandes questions :

a. L'extension des surfaces cultivées est-elle possible ?

En premier lieu, il semble que les étendues de terrains ne manquent pas. Les possibilités d'extension ne posent donc pas de problèmes majeurs en terme de surface disponible. Le seul obstacle est de nature technique et financière. En effet, il faut envisager les moyens de mettre en valeur ces terres (investissement en capital, en outillage, en intrants ...). Seulement, pour s'y faire, il faudrait l'intervention de structure d'encadrement et d'appui afin de focaliser les objectifs de production sur une logique de profits.

Le corollaire d'une telle action revient à la notion de productivité même des exploitations. Etant donné que le secteur rizicole occupe le plus grand nombre d'actifs (tab n°37), l'amélioration de la productivité va entraîner, à terme, une libération massive de la main d'œuvre agricole qu'il faudra orienter vers d'autres secteurs d'activité.

Tableau n°37 : Répartition des exploitations et de la superficie (Place, 1991)

Type de production	% des exploitations	% de la superficie
Riz	99,1	44,4

Lorsque l'on se réfère à la croissance des activités par secteur de production, le secteur des services, télécommunication comprise, s'avère le plus performant (11% environ en 1999 contre 4,1% pour le secteur primaire, d'après le STA). Pourtant, cette branche n'emploie qu'une faible proportion de main d'œuvre non qualifiée. Dans cette hypothèse, le seul exutoire pour cette main d'œuvre est donc le salariat agricole (FAO et Jureco, 1988).

b. Peut-on facilement accéder à la terre ?

Le marché du foncier est une notion très floue en milieu rural. Les conflits entre le droit moderne et le droit coutumier n'aidant pas, la situation de la terre reste pour le moins dans un immobilisme séculaire. Le plus paradoxal dans cette situation est le mode de transmission de la terre. Il arrive souvent qu'à la suite d'une succession, la terre se trouve morcelée entre différents propriétaires. Les étendues ainsi éclatées deviennent plus difficiles à rentabiliser. Cela n'affecte pourtant pas l'attachement des malgaches à cette « terre des ancêtres ». Seulement, la conséquence d'une telle situation n'est ressentie que par ceux qui s'investissent réellement dans les activités agricoles. Ils ne pourront pas produire suffisamment pour couvrir leurs besoins et devront envisager des solutions alternatives.

c. Quelles sont les alternatives possibles ?

Dans l'espoir d'accroître leur production par l'extension des surfaces cultivées, beaucoup de paysans s'établissent en contrat de métayage avec des propriétaires terriens. Le système en soi n'est pas condamnable, mais c'est la redistribution de la production qui handicape le producteur. Le contrat de métayage, bien que n'ayant plus une raison d'être, sur le plan juridique, est toujours pérennisé dans les campagnes malgaches. Aujourd'hui encore, la répartition de la production reste toujours la formule du 1/3 au propriétaire - 2/3 au métayer. Avec sa faible production, le paysan n'est même pas capable de nourrir sa famille avec la part de récolte qui lui revient. Cela l'oblige à rechercher des activités d'appoint et principalement, il est le plus intéressé par le salariat agricole.

4.1.1.2. La dotation financière des exploitations agricoles

Le système de crédit forme une autre zone d'ombre en milieu rural. Il faut noter que le système de production ne peut fonctionner avec des perspectives à long terme, sans un moyen de financement viable des activités. Dans les conditions actuelles, deux types de crédits constituent l'essentiel du marché des crédits en milieu rural (FAO et Jureco, 1988) :

a. Le crédit à la pauvreté

Ce type de crédit sert surtout à assurer la survie des paysans pendant la période dite de « soudure ». Il s'opère en général dans le cadre de relations lignagères dont le remboursement sera effectué sous forme d'équivalent en riz (ou autre produit) à la prochaine récolte. Avec la diminution de plus en plus accentuée de la production par exploitation, une augmentation du volume de ce type de crédit devrait être perceptible dans les années à venir.

b. Le crédit à la production

C'est un des plus grands maux en milieu rural. En principe, ce type de crédit devrait permettre aux producteurs de mettre en œuvre une stratégie, avec des objectifs clairs de profits escomptés. Mais différentes contraintes ne peuvent pas être sous-estimées.

En premier lieu, il faut noter l'absence d'institutions de crédit spécialisées. Les crédits bancaires classiques exigent des conditions souvent inaccessibles aux paysans (garantie, caution). Cela met le paysan dans une situation d'incapacité d'investissement. Maintenant, les crédits mutualistes prennent le relais en essayant de combler ce vide institutionnel. Mais leur impact reste très négligeable : seuls 3% des riziculteurs ont bénéficié de tels crédits en 1999 (Projet MADIO, 2000). Les projections établies pour l'expansion de ces établissements témoignent toujours de cette incapacité à répondre aux besoins (tab n°38)

Tableau n°38 : Réalisations et projections financières des réseaux OTIV Madagascar (Midi économie du 6-02-2001)

<u>Années</u>	1996	2000	2003	2005
Membres	6 475	45 794	85 514	105 758
Epargne (millions de Fmg)	804,00	29 033,10	35 550,00	89 387,00
Crédit (millions de Fmg)	232,50	14 553,20	29 834,50	80 102,00

Sous ces conditions, le paysan a le plus souvent recours aux crédits informels avec des taux usuraires allant de 100 à 150%. Il s'ensuit un surendettement des paysans et une dépendance vis-à-vis du créancier.

4.1.2. Contraintes structurelles globales

Les contraintes se résument par l'absence de professionnalisation du secteur de la production. Dans la logique des choses, les matières relatives au secteur rizicole doivent être soumises à l'approbation des principaux concernés. Seulement, l'inexistence d'interlocuteurs institutionnalisés réduit le mécanisme à un sens. Il en résulte trois conséquences :

4.1.2.1. Des paysans marginalisés

Lorsque la problématique du développement a été envisagée hors cadre de la participation des concernés, la logique de ces derniers peut toujours se révéler comme un élément impondérable. Même si les efforts consentis par les autorités visent une meilleure perspective pour les producteurs, ils opposent toujours une certaine méfiance à leur égard. Cela vient du fait qu'ils étaient longtemps mis à l'écart des préoccupations premières des responsables. Logiquement, ils se sont forgés pratiquement une culture de l'autarcie (Rollin, 1994). Ce qui fait que leur logique productive échappe au raisonnement « scientifique ».

4.1.2.2. Des inégalités partout

Entre producteurs, la grande variété des conditions socio-économiques entre les zones de production aboutit à une inégalité chronique. Certaines régions regorgent de contextes favorables et peuvent jouir pleinement des avantages de l'instant (cas des grandes plaines rizicoles de l'Alaotra), alors que d'autres luttent farouchement pour leur survie. Cette situation est d'autant plus accentuée, du fait de l'absence de structure efficace d'encadrement et d'orientation économique globale, pour chaque zone.

Ensuite, dans le cadre des échanges, la situation entre consommateur et producteurs locaux pourrait être assimilée à la détérioration des termes de l'échange, comme dans le cas du commerce international des produits agricoles. Au niveau local, cela prend une forme très significative : le producteur ne peut intervenir sur le prix de leur produit et subit les effets pervers d'un échange dicté de façon unidirectionnelle par les consommateurs. La loi du marché est loin d'être une réalité ; en effet, ce sont les consommateurs qui tiennent une place dominante dans les rapports d'échange. Les producteurs n'obtiennent qu'une part négligeable du bénéfice réalisé par la filière, et ce, au bénéfice des intermédiaires et des collecteurs (tab n°39).

Tableau n°39 : Evolution parallèle du prix du riz aux producteurs et aux consommateurs de la province d'Antananarivo (Annuaire des Statistiques Agricoles, 1999)

Années	1997	1998	1999
Prix vary gasy (consommateurs)	2006	1772	2188
Prix du paddy (producteurs)	858	1070	1100

4.1.2.3. Un second souffle ?

La filière riz malgache en général est en crise, surtout en cette période de libéralisation (Rakotomalala, 2001). Sur le plan national, la production a été estimée à 2,5 millions de tonnes en 2000, avec une croissance moyenne annuelle de 1,72% entre 1972 et 1998 et un taux de croissance démographique annuel moyen de 2,8% pour la même période (Projet MADIO, 2000). Le déficit de la production s'est traduit par une diminution de la consommation de riz par habitant par an (de 142,5kg à 107kg entre 1962 et 1994), et entraîne, par la suite, une importation croissante de riz (186 000 tonnes en 1999).

Le niveau du rendement national, actuellement estimé aux environs de 2,1t/ha (Enquête UPDR/FAO, 1999), atteste l'existence d'un grand malaise dans la filière (tab n°40)

Tableau n°40 : Rendements des principaux systèmes de riziculture sur le plan national (source : Enquête UPDR/FAO 99)

Rendement(t/ha)	Nord	Nord Ouest	Centre Ouest	Hautes terres	Est	Alaotra	Moyenne
Submersion	1,5	1,4	2,0	3,2	1,7	2,6	2,1
Pluvial	0,8	0,8	1,2	2,6	1,7	2,0	1,5
Tavy	1,0	-	-	-	0,7	0,6	0,8

La superficie cultivée n'a guère augmenté (tab n°41) avec une évolution annuelle moyenne de 0,4% faute d'investissement et de politique de réforme agraire bien définie, et le taux d'utilisation des intrants reste très faible : environ 10kg/ha/an sur le plan national, contre 60 à 80kg/ha/an dans le Lac Alaotra (Rakotomalala, 2001).

Tableau n°41 : Evolution de la surface rizicole nationale de 1995 à 2000 (Source : Ministère de l'Agriculture)

Années	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Superficie cultivée (ha)	1 150 000	1 140 000	1 176 800	1 203 000	1 207 500	1 206 940

Les paysans, en général, n'ont pas accès à un crédit leur permettant de développer leur activité. Pour l'année 1999, seuls 3% des riziculteurs ont pu bénéficier des crédits des secteurs financiers formels, la plupart étant passés par des emprunts informels avec souvent des taux usuraires qui entretiennent l'insuffisance de la production et l'incapacité d'investissement (Projet MADIO, 2000).

Pour le cas particulier d'Antananarivo et de ses environs, la détérioration des ouvrages hydroagricoles, consécutivement au processus de désengagement de l'Etat du système productif, a entraîné la perte de plusieurs surfaces cultivables. De plus, avec le fort développement du secteur immobilier, de nombreux propriétaires ont reconverti leur rizière en un site de fabrication de briques et de tuiles en terre cuite. Ce phénomène perturbe le système hydraulique local, par suite de dénivellation localisée, et nuit au maintien de l'activité rizicole aux abords immédiats. Il en résulte une diminution progressive de la surface cultivable ainsi que celle de la production. L'approvisionnement en riz des marchés d'Antananarivo fait appel aux surplus d'ailleurs, le principal fournisseur étant l'Alaotra, ou à l'importation, pays d'Asie en général. Les riziculteurs des hautes terres ne peuvent actuellement mettre sur le marché que 13% de leur production, le reste étant autoconsommé (tab n°42)

Tableau n°42 : Part de production autoconsommée pour deux zones productrices de riz (Rakotomalala, 2001)

Zones	Alaotra	Hautes terres
Autoconsommation (% de la production)	21	87

Les principales catégories de riziculteurs recensés dans la grande île classent les riziculteurs des hautes terres parmi les « micro-producteurs », avec une stratégie de subsistance. L'exiguïté de la surface à disposition, et la disponibilité d'une main d'œuvre familiale plus ou moins nombreuse (la taille moyenne d'une famille en milieu rural étant

égale à 5,7 sur les hautes terres, d'après le Projet MADIO, 1999), sont des facteurs qui devraient faire préférer le SRI à ces paysans.

4.2. Comparaison avec les autres méthodes de culture

Après avoir défini les conditions réelles de production des riziculteurs malgaches, les principaux traits sur les difficultés qu'ils rencontrent deviennent plus faciles à appréhender. La prochaine étape consiste à essayer de proposer des solutions alternatives répondant aux multiples contraintes du secteur. A juste titre, la comparaison intervient ici comme un instrument de prise de connaissance des possibilités de gains et de pertes par chacune des méthodes susceptibles d'être adoptées. On procédera dans ce cas à l'analyse des coûts de production et des bénéfices.

4.2.1. Comparaison entre la méthode traditionnelle et SRI

La délimitation précise de l'agriculture traditionnelle est difficile. Toutefois, dans l'esprit d'apporter le maximum de concision par rapport à l'approche, nous convenons d'adopter la définition suivante : « C'est une méthode de riziculture essentiellement manuelle, pratiquant le repiquage de plants âgés de deux (02) à trois (03) mois, avec une disposition en foule et un renouvellement de la fertilité du sol par amendement organique. Au cours de son développement, le riz évolue sous des conditions de submersion continue jusqu'à la récolte ».

Cette définition n'est certes pas parfaite, étant donné l'extrême variété des pratiques et les différentes conditions de culture. Seulement, elle permet d'évoquer les principales caractéristiques qui vont servir à catégoriser les pratiques aux fins de comparaison.

4.2.1.1. Les besoins en main d'œuvre

L'opinion publique reproche souvent au SRI de demander des efforts « surhumains » pour la réalisation de la culture. Toutefois, cette affirmation devra être relativisée dans le contexte de la mise en œuvre de la méthode. En effet, certains travaux requièrent davantage d'efforts physiques de la part du paysan, alors que d'autres se trouvent simplifiés. Il faut alors déterminer la résultante de l'ensemble.

Une première certitude vient de la situation générale des campagnes malgaches. La main d'œuvre est toujours le principal facteur disponible et à coût relativement faible (Jureco, 1988). Si le schéma d'intensification envisagé a plus souvent recours à celle-ci, cela découle de l'analyse de la disponibilité et des possibilités de mobilisation des ressources

Une autre réalité doit être intégrée dans cette notion. Le fait de recourir à une main d'œuvre abondante n'est pas forcément un paradoxe mais tout dépend de la part de bénéfice qu'on dégage de chaque unité supplémentaire de travail. Autrement dit, il revient au paysan de juger de l'opportunité qui lui est offerte tout en sachant la part de « sacrifice » qu'il lui faut fournir à un moment déterminé.

a. L'utilisation de la main d'œuvre par poste dans l'itinéraire technique

Les opérations culturales diffèrent à plusieurs niveaux. Le SRI, comme toute forme d'intensification, mise sur l'optimisation de l'utilisation d'un facteur jugé limitant. Dans le

contexte malgache, il s'agit principalement du facteur sol (cf. 4.1.1.1.). Le système traditionnel ne mise pas sur cette option. Au contraire, il opte pour une réduction des risques (minimum d'investissement). Cette première notion est clairement établie à partir de la lecture de l'itinéraire technique des deux méthodes (tab n°43)

Tableau n°43 : Itinéraire technique et besoin en main d'œuvre des deux systèmes de riziculture Traditionnel et SRI pour 1 ha de rizière (Razafimahery, 1976 ; Association Tefy Saina, 1992 ; Rakotomalala, 1998)

Opérations culturales	Traditionnel (hj)	SRI (hj)	Surplus de travail demandé par le SRI (hj)
Préparation de la pépinière			
- Labour	10	1	
- Arrosage	-	2	
- Semis	0,2	0,1	
SOUS TOTAL	7,2	3,1	0
Préparation du sol			
- Labour	60	60	
- Epannage fumure	2	6	
- Emottage	30	60	
- Planage	-	10	
SOUS TOTAL	92	136	44
Transplantation			
- Arrachage des plants	2	1	
- Repiquage	40	40	
SOUS TOTAL	42	41	0
Sarclage			
• Manuel (1 passage)	40		
• A la houe (3 passages)		60	
SOUS TOTAL	40	60	20
Récolte (a)	12 (b)	46 (c)	34
Battage (d)	20	80	60
TOTAL GENERAL	213,2	366,1	152,9

(a) vitesse de récolte à raison de 25 kg/h/personne

(b) rendement de 2 t/ha

(c) rendement de 8 t/ha

(d) vitesse de battage à raison de 100 kg/j/personne

A partir de ces données, deux différences notables peuvent être décelées :

- La quantité de travail fourni est différente : pour le SRI un surplus de travail commence dès la préparation du sol. A ce stade, la principale différence est due à plusieurs hersages recommandés pour le SRI afin d'avoir une boue liquide apte à recevoir les jeunes plants de riz. Ensuite, lors du repiquage, il faut davantage de gens car la manipulation de la jeune plantule nécessite beaucoup plus de précautions. Puis, les trois passages à la houe sarcleuse recommandée par le SRI nécessitent plusieurs jours de travail supplémentaires.
- L'importance accordée à chaque poste traduit des différences de stratégie : avec le SRI, la préparation du sol est une condition première de réussite. En plus, il faut veiller à un planage plus ou moins parfait. Ceci n'est pas obligatoirement vrai avec la méthode traditionnelle qui utilise des plants suffisamment longs pour mieux résister

dans un milieu mal aplani. De plus, l'importance de la densité de plantation appliquée avec la méthode traditionnelle compense les pertes au repiquage. Pour les autres postes, la variation est moins marquée et, de plus elle est due, soit à la différence de pratique (sarclage par exemple), soit à la différence de quantité traitée (récolte et battage, notamment)

b. Répartition du travail dans le temps

Il faut surtout remarquer que cette répartition par poste de travail ne suffit pas pour comparer les deux méthodes. Il faut pouvoir estimer la répartition réelle, dans le temps, des travaux de culture et d'entretien. Pour cela, il faut se baser sur le calendrier cultural, et considérer ensuite la période optimale de réalisation de l'opération avec la quantité de travail nécessaire pour cela. Il sera alors possible de déterminer la pointe de travail dans le temps (tab n°44)

Tableau n°44 : Comparaison de la répartition du travail dans le temps (*) (Traditionnel-SRI)

Opérations	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J
Préparation du sol		<i>62</i> 66			<i>30</i> 70							
Préparation de la pépinière		<i>7,2</i> 3,1										
Transplantation					<i>42</i> 41							
Sarclage						40	<i>40</i> 20		<i>12</i> 46			
Récolte									<i>20</i> 80			
Battage												
Compostage	12	2	2									

(*) Traditionnel en *italique* et SRI en **gras**

4.2.1.2. Les coûts de production

Etant donné qu'il s'agit d'une comparaison, il faut définir des bases de comparaison communes afin de ne pas biaiser la réflexion. Ainsi, nous allons adopter les références suivantes :

- La journée de travail dure environ 6 heures par jour et est rémunérée à 6000 Fmg.
- Le prix des intrants est évalué au prix actuel du marché. Seulement, comme il n'existe pas un véritable marché de compost en milieu rural, il a fallu calculer le coût de fabrication du compost.
- Les frais de transport n'ont pas été intégrés du fait de la grande variabilité de la distance entre les rizières et les lieux d'habitation.

a. Le coût de la main d'œuvre

La quantité de main d'œuvre nécessaire pour l'exécution des travaux a été déterminée auparavant (cf. 4.2.1.1.). Il faut maintenant l'évaluer en terme d'investissement financier afin de l'intégrer dans le calcul des coûts (tab n°45)

Tableau n°45 : Comparaison du coût de la main d'œuvre (Traditionnel-SRI)

	Traditionnel (1)	SRI (2)	Différence (2) - (1)
Temps de travail (hj)	213,2	366,1	152,9
Coût (Fmg)	1 279 200	2 196 600	917 400

La valeur du surplus de main d'œuvre demandé par le SRI est presque équivalente à celle de du système traditionnel. Autrement dit, si le paysan dispose d'une telle quantité supplémentaire de travail, il est pratiquement capable de valoriser deux (02) hectares. Malheureusement, le principal résultat qu'il tire de cet investissement est tout simplement limité au doublement de sa production.

b. Le coût des autres intrants

Bien que d'importance quasiment négligeable, les intrants doivent être considérés dans la structure des coûts. Les principaux coûts d'intrants sont ceux des amendements organiques (tab n°46). Pour le SRI, le coût de fabrication du compost doit être réalisé à part (Annexe n°2).

Tableau n°46 : Comparaison du coût des intrants (Traditionnel-SRI)

	Traditionnel (1)	SRI (2)	Différence (2) - (1)
Nature des intrants	Fumier	Compost	
Quantité	10 charretées/ha	5 t/ha	
Prix unitaire	50 000 Fmg	121 000 Fmg	
Coût total	500 000 Fmg	605 000 Fmg	105 000 Fmg

La lecture de ce tableau permet d'évoquer deux réflexions :

- Par rapport au SRI, le système traditionnel n'impose pas la fabrication d'un compost. Aussi, l'approvisionnement en fumier est-il plus aisé du fait qu'il peut être, soit obtenu à partir de l'étable de l'exploitation, soit acheté auprès d'autres éleveurs. De plus, cette dernière option ne nécessite pas une dépense supplémentaire en temps de travail (constitution de litière dans les étables, entre autres).
- Pour les deux systèmes, la quantité d'intrants reste pratiquement la même. Seulement, leur coût respectif ne peut pas être considéré comme élément de référence. Pour cela, il faudrait comparer le coût de l'unité fertilisante, ce qui dépasse largement le cadre de cette étude.

c. Le coût de production par unité de surface et par unité de production

Dans cette partie, l'objectif est de déterminer l'importance relative des dépenses en leur équivalent monétaire. Ce coût se limitera aux dépenses en main d'œuvre et en intrants (tab n°47). Les autres dépenses (location de terrain, renouvellement des matériels ...) ne sont pas prises en considération du fait qu'ils entrent également dans le cadre des autres activités de culture, et que la détermination de la part de la riziculture obligerait à une étude des systèmes de culture formant l'ensemble de l'exploitation.

Tableau n°47 : Comparaison des coûts de production (Traditionnel-SRI)

Coût de production (Fmg)	Traditionnel (1)		SRI (2)	
	Par hectare	Par tonne	Par hectare	Par tonne
Main d'œuvre	1 279 200	639 600	2 196 600	274 575
Intrants	500 000	250 000	605 000	75 625
TOTAL	1 779 200	839 600	2 801 600	350 200

Le rapport entre le coût de production à l'hectare du SRI et celui de la méthode traditionnelle est de l'ordre de 1,57. Le rapport (1)/(2) passe à 2,4 pour le coût de production par tonne soit une différence de 0,83 fois entre les coûts à la tonne de paddy. Ainsi, pour un même prix au producteur et pour une même quantité vendue, le paysan qui adopte le SRI pourra épargner davantage que celui qui valorise ses terres suivant la méthode traditionnelle. De plus, si la surface exploitée est la même, celui qui adopte le SRI va disposer d'une quantité plus importante de production à commercialiser.

Une première possibilité peut être adoptée avec cette notion : l'introduction d'un assolement avec le riz. Vu les conditions d'accès à la terre, et le prix modeste du riz dans certaines régions, le paysan pourra essayer de mettre en culture chaque année une surface correspondant tout juste nécessaire à la production des besoins de la famille. Les autres étendues disponibles pourront alors être reconverties en culture maraîchère, pour dégager de revenus complémentaires.

Une dernière stratégie consiste à adopter une rotation culturale pluriannuelle basée sur un cycle de riz, une culture améliorante (légumineuse) et une culture de contre saison. La culture améliorante sert à la fois à la production de biomasse pour la fabrication de compost mais surtout entretient les activités microbiennes dans le sol (développement des relations de symbiose). En effet, si le paysan arrive à produire, au cours d'une année, l'équivalent de trois années de riz, il peut facilement s'abstenir de cultiver du riz la saison suivante, et valoriser ses terres par d'autres cultures

4.2.2. Comparaison entre la riziculture améliorée (SRA) et le SRI

La riziculture améliorée a été lancée avec l'Opération Productivité Rizicole des années 60. Elle correspond principalement à l'introduction du repiquage en ligne et de la fertilisation chimique. Les principaux aspects qui distinguent le SRA du SRI se résument aux quelques points suivants :

- les plants repiqués sont assez jeunes (20 à 30 jours) mais pas suffisamment pour répondre au critère de « phyllochrone » recommandé par le SRI,
- le nombre de brins par touffe au repiquage varie de 3 à 5 environ,
- les plants sont repiqués avec un écartement régulier mais souvent suivant une seule direction,
- le mode de fertilisation est basée principalement sur la fumure minérale,
- la conduite de l'eau est toujours à la submersion totale de la rizière.

Toutefois, le même problème se pose avec cette méthode de riziculture. Bien que les résultats acquis au moment de vulgarisation de cette technique vantait un rendement de 4,5 t/ha (Mayer et Bonnefond, 1973), actuellement, il a tendance à se ramener au niveau du rendement des années 50 (Andrianarisoa, 1998), tout juste supérieur à celui de la méthode traditionnelle. Plusieurs raisons sont évoquées pour cela :

- En premier lieu, la faiblesse d'utilisation des intrants, entre autres les engrais chimiques qui sont soit « hors de portée » des paysans, soit de disponibilité limitée ayant pour effet de réduire la quantité apportée dans les rizières. Il faut ajouter la mauvaise réputation des engrais chimiques auprès des paysans qui a dû certainement porté préjudice à leur utilisation. En effet, d'après les dires de ces mêmes paysans ces engrais, appliqués dans les rizières, semblent durcir la terre et au bout de quelques années d'application, les rizières sont difficiles à travailler et par conséquent à mettre en culture.
- Ensuite, l'absence d'encadrement pendant presque deux décennies maintenant doit avoir eu de lourdes conséquences sur ces mêmes paysans. Au lieu de profiter des conseils de techniciens spécialisés, les paysans ont dû se contenter de reproduire les mêmes pratiques ou les innovations qui ont porté des fruits auprès d'autres paysans sans.

Toutefois, cette autre dimension du SRA ne correspond pas à l'objet de cette étude. Ces faits sont tout simplement évoqués afin de déterminer les solutions que pourrait apporter le SRI aux paysans par son adoption.

Cependant, pour bien figurer les avantages et inconvénient du SRI, il faut aboutir à une comparaison valable des deux systèmes.

4.2.2.1. Les besoins en main d'œuvre

L'objectif de cette partie est de pouvoir identifier les différences d'allocation des ressources « travail » par les deux techniques et de déterminer ensuite les logiques stratégiques qui en découlent. Pour cela, deux références vont être considérées :

a. L'utilisation de la main d'œuvre par poste dans l'itinéraire technique

SRA et SRI semblent proches l'un de l'autre par rapport à leur principe de base. Cette similitude devrait même se retrouver dans l'utilisation de la main d'œuvre (tab n°48).

Les différences les plus notables se situent au niveau de la préparation du sol où le planage demande toujours un surplus de travail. Pour le sarclage, les deux (02) passages requis par le SRA sont effectués : une première fois au bout de deux (02) semaines environ, après le repiquage, et une autre fois, au maximum de tallage, en même temps que l'épandage de l'engrais azoté (apport fractionné). A part la préparation du sol et le sarclage, les différences au niveau des autres postes sont surtout dues aux quantités à traiter.

L'ensemble de ces différences établirait en fait une sorte de transition entre les trois techniques. Ainsi, le SRA semble être une variante intermédiaire entre la riziculture traditionnelle et le SRI. Cette même caractéristique est décelable au niveau du rendement.

A partir de ces constatations, certains aspects des stratégies de production se dévoilent clairement :

- L'économie de semence est une priorité pour les deux systèmes. En effet, l'utilisation d'un plus grand écartement entre les plants favorise un meilleur tallage. Cela permet

de réduire le nombre de plants nécessaire au repiquage. Il s'ensuit une diminution de la taille des pépinières, et une économie de travail.

- L'intensification se traduit toujours par une plus importante utilisation de main d'œuvre (en supposant aucune forme de mécanisation). Cette logique résulte toujours du contexte général des producteurs (cf. 4.1.1)

Tableau n°48 : Itinéraire technique et besoin en main d'œuvre des deux systèmes de riziculture : SRA et SRI pour 1 ha de rizière (Mayer et Bonnefond, 1973 ; Association Tefy Saina, 1992 ; Rakotomalala, 1998)

Opérations culturales	SRA (hj)	SRI (hj)	Surplus de travail demandé par le SRI
Préparation de la pépinière			
- Labour	5	1	
- Arrosage	-	2	
- Semis	0,2	0,1	
SOUS TOTAL	5,2	3,1	0
Préparation du sol			
- Labour	60	60	
- Epannage fumure	3	6	
- Emottage	40	60	
- Planage	-	10	
SOUS TOTAL	102	136	34
Transplantation			
- Arrachage des plants	3	1	
- Repiquage	30	40	
SOUS TOTAL	39	41	2
Sarclage (à la houe)	40 (2 passages)	60 (3 passages)	
- Epannage fumure	2		
SOUS TOTAL	42	60	18
Récolte (*)	23 (**)	46 (***)	23
Battage (****)	40	80	40
TOTAL GENERAL	251,2	366,1	115,9

(*)vitesse de récolte à raison de 25 kg/h/personne

(**) rendement moyen de 4 t/ha

(***)rendement moyen de 8 t/ha

(****)vitesse de battage à raison de 100 kg/j/personne

b. La répartition du travail dans le temps

Etant donné la similitude globale sur la conduite des deux méthodes, la pointe de travail devrait se situer à la même période (tab n°49)

Tableau n°49 : Comparaison de la répartition du travail dans le temps (*) (SRA-SRI)

Opérations	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J
Préparation du sol		<i>63</i> 66			<i>40</i> 70							
Préparation de la pépinière		<i>5,2</i> 3,1										
Transplantation					<i>39</i> 41							
Sarclage						<i>20</i> 40	<i>20</i> 20					
Récolte									<i>23</i> 46			
Battage									<i>40</i> 80			
Compostage	12	2	2									

(*) SRA en italique et SRI en gras

4.2.2.2. Les coûts de production

Les mêmes bases de comparaison qu'au paragraphe 4.2.1.2. vont être retenues.

a. Le coût de la main d'œuvre

La quantité de main d'œuvre requise est définie précédemment. Le tableau n°50 montre les différences de coût.

Tableau n°50 : Comparaison du coût de la main d'œuvre

	SRA (1)	SRI (2)	Différence (2) – (1)
Temps de travail (hj)	251,2	366,1	
Coût (Fmg)	1 507 200 Fmg	2 196 600 Fmg	689 400 Fmg

Au vu de ce qui précède, le SRI engage davantage de dépense en main d'œuvre. Cette différence est presque équivalente à la moitié du besoin en main d'œuvre du SRI. Autrement dit, pour la quantité de main d'œuvre requis pour 1 ha de rizière en SRI, il est possible de mettre en culture 1,5 ha de rizières, en adoptant le SRA. Toutefois, cette différence ne peut être rapportée à la quantité totale de riz produite car le SRA donnera que 6 tonnes sur l'ensemble alors que le SRI reste à 8 tonnes

b. Le coût des autres intrants

Les principaux intrants utilisés par les deux systèmes sont limités à la fumure. Le tableau n°51 récapitule le coût respectif des intrants pour chaque système.

La différence de coût des intrants donne un avantage pour le SRI. Le paysan qui décide d'adopter le SRA devra se préparer à cette dépense monétaire. En conséquence, il doit avoir, soit épargné suffisamment au cours de la précédente campagne, soit emprunté auprès des établissements de crédits.

Tableau n°51 : Comparaison du coût des intrants (SRA et SRI)

	SRA (1)	SRI (2)	Différence (1) – (2)
Nature des intrants	NPK	Compost	
Quantité	300 kg/ha	5 t/ha	
Prix unitaire	2 600 Fmg	121 000 Fmg	
Coût total	780 000 Fmg	605 000 Fmg	175 000 Fmg

c. Le coût de production par unité de surface et par unité de production

Le calcul du coût de production est similaire à celui du paragraphe 4.2.1.2.c. Les résultats des calculs sont résumés dans le tableau n° 52.

Tableau n°52 : Comparaison des coûts de production (SRA-SRI)

Coût de production (Fmg)	SRA		SRI	
	Par hectare	Par tonne	Par hectare	Par tonne
Main d'œuvre	1 507 200	376 800	2 196 600	274 575
Intrants	780 000	195 000	605 000	75 625
TOTAL	2 287 000	571 800	2 801 600	350 200

A partir des coûts par unité de surface, le SRI peut ne pas être intéressant. Mais en analysant la répartition de ces dépenses, on retrouve que c'est la main d'œuvre qui engage le plus de frais. Or, on sait que dans les conditions actuelles des paysans, cette ressource est plus facile à mobiliser.

A partir des coûts par unité de production obtenus, il ressort toujours que le SRI non seulement coûte moins cher à l'unité de production mais surtout apporte davantage de production. Pour chaque tonne de riz produit, le paysan qui pratique le SRI gagne déjà l'équivalent de 600 kg de paddy, en différence de coût de production.

4.3. Opportunités offertes par le SRI

4.3.1. Justification du choix

D'après les analyses sus-mentionnées, le SRI permettra essentiellement aux paysans d'accroître le rendement de leur culture. D'autres raisons peuvent également amener le paysan à adopter le SRI. Parmi ces raisons, il faut noter plus particulièrement :

- La contribution à la stratégie anti-risque mis en œuvre par les paysans. Le paysan adopte cette stratégie pour limiter les impacts d'une mauvaise saison. Toutefois, il y a un moyen sûr de passer ces périodes critiques sans s'attacher à cette inertie : c'est la constitution d'une épargne pendant les périodes « favorables ». Lorsque les difficultés surviennent, il est possible de les juguler par la mobilisation de ces ressources. Pour sa part, le SRI peut apporter un soulagement aux paysans en leur offrant la possibilité de constituer une réserve monétaire soit directement (par la commercialisation du surplus rizicole) soit indirectement (par le revenu des cultures en rotation avec le riz).

4.3.1.1. Optimisation de l'utilisation des ressources

Optimiser l'utilisation des ressources ne suffit pas seulement d'essayer d'atteindre un niveau maximum de rendement possible, mais il est aussi question de les renouveler dans une perspective à long terme. Cette approche s'avère valable pour un pays comme Madagascar où la richesse biologique n'est plus un secret. Toutefois, les menaces qui pèsent sur ces ressources sont de nature à déstabiliser en permanence cet ensemble. C'est dans ce vaste ensemble d'inquiétudes que le SRI essaie d'apporter une part de contribution.

a. L'optimisation des ressources « terre »:

La terre est non seulement un élément majeur dans la production végétale, mais de plus, elle l'est à plusieurs titres : d'abord, c'est une surface de culture qu'il convient de valoriser pour assurer les besoins alimentaires d'une population, d'une communauté ou d'une famille ; ensuite, c'est un ensemble biologique qui fonctionne selon un mécanisme déterminé par la loi de l'action et de la réaction. L'action se résume aux interventions faites sur elle, alors que la réaction englobe tous les phénomènes résultant des modifications apportées par les soins de l'exploitant agricole (par exemple, baisse de la fertilité du sol, détérioration des propriétés physiques ...).

Etonnamment, le SRI répond à un grand nombre des soucis des producteurs dans ce domaine. En effet, lorsque la technique de production est bien maîtrisée, le SRI permet d'obtenir des rendements élevés, mais qui sont toutefois à relativiser suivant la nature et la richesse du sol. A ce niveau, la fonction principale de la terre a été assumée, celle-même de fournir de l'alimentation à la population. Par ailleurs, au vu des résultats acquis, il s'agit non seulement d'alimentation, mais également de surplus commercialisable.

Par rapport aux propriétés du sol, la première préoccupation du milieu scientifique est le renouvellement de sa fertilité. En effet, une production végétale aussi importante que le SRI doit être très épuisante pour le sol. D'après les théories, les années qui suivent la première culture ne donneront plus d'excellents résultats. Pourtant, les observations enregistrées autour du centre régional de recherche de Fianarantsoa confirment une continuité de progression du niveau de rendement, pendant les six (06) années à la suite de l'adoption du SRI (Andrianaivo, chercheur après du FOFIFA)

Une partie de l'explication de ce phénomène figure au paragraphe 2.2. Etant donné que la réflexion sur la notion de fertilité du sol repose principalement sur les trois éléments majeurs, cette approche sera adoptée pour l'étude de l'évolution de ces caractéristiques du sol. Pour l'azote, les premiers résultats sont consignés dans ce travail mais de nouvelles mesures et observations doivent être envisagées pour affiner davantage les connaissances dans le domaine. Pour le phosphore et le potassium, d'autres phénomènes doivent intervenir. Pour l'instant, aucune explication ne peut être apportée.

b. L'optimisation des ressources « travail »

Il serait ridicule de minimiser l'importance de la quantité de travail requis par le SRI, d'autant plus ridicule de vouloir l'ignorer alors que paysans et chercheurs en sont conscients. Ce qu'il faut savoir avant tout, c'est la valorisation réelle de ce surplus de travail. En effet, si au prix d'un plus grand effort, le résultat obtenu reste le même, n'y a-t-il pas lieu de se révolter contre le SRI ? Il va sans dire que le premier caractère du travail est sa productivité

c'est à dire la production par unité. Au stade actuel de la connaissance du SRI, il est possible de déterminer de manière symbolique la productivité du travail dans les trois systèmes (tab n°53)

Tableau n°53 : Productivité du travail entre les trois systèmes

	Traditionnel	SRA	SRI
Productivité (kg)	9,38	15,92	21,85
Productivité (Fmg)(*)	9 380,86	15 923,56	21 851,95

(*) prix du paddy aux producteurs environ 1000 Fmg (1999)

4.3.1.2. Possibilités de production de « riz biologique »

Des perspectives de production de riz biologique peuvent être envisagées avec le SRI. Seulement, il faut connaître toutes les conditions nécessaires s'y rattachant.

4.3.2. Extension de la riziculture

4.3.2.1. Scénarios

Dans cette partie, l'objectif est d'essayer d'envisager les voies d'évolution possible pour la filière riz en premier lieu. A partir de cette notion, il sera possible de déterminer à quel niveau, et sous quelles conditions le SRI devra intervenir, afin de mieux répondre aux besoins des paysans. Les schémas types suivants ont été évalués sur la base des conditions dans la province d'Antananarivo. Pour cette simulation, plusieurs hypothèses de départ doivent être définies (données de 1999)

- La population de la province est évaluée à environ 4 028 000 habitants avec une croissance démographique moyenne de 2,8% par an.
- La superficie cultivée en riz est de 194 310 ha avec une croissance moyenne annuelle de 1,2%.
- Les besoins en riz par habitant sont estimés annuellement à 200 kg.
- Les calculs sont faits sur la base d'une importation nulle à partir de 2005. Cela est pris sur la base d'une analyse faite par De Laulanié qui avait prédit une autosuffisance alimentaire en 2005 par l'adoption du SRI (Lakroan'i Madagasikara, 1994)

a. SCENARIO n° 1 : Aucun changement de la situation

Dans cette hypothèse, seules les variations moyennes de chaque poste de calcul ont été considérées. Cette approche permet de conceptualiser la situation actuelle de la filière riz dans la région et l'importance des besoins. La situation de la production au cours de cette période est résumée dans le tableau n°54.

En absence de changements susceptibles de faire basculer la situation, la province devra importer à partir des autres provinces annuellement 300 000 à 400 000 tonnes de riz à lui toute seule. Cela doit représenter une dépense monétaire importante. Si au lieu d'importer du riz, les paysans pouvaient répondre à cette demande, un grand soulagement serait senti partout : d'une part il y aura amélioration de leur revenu et d'autre part la lutte contre la pauvreté en milieu rural sera réalisable sans trop de difficultés.

Tableau n°54 : Etudes prospectives de la situation de la filière riz à l'horizon 2010 sans aucun changement envisagé

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Population (en milliers)	4141	4257	4376	4498	4623	4752	4885	5022	5162	5306
Besoins en riz (en milliers de tonnes)	828,2	851,4	875,2	899,6	924,6	950,4	977	1004,4	1033,4	1061,2
Surface (en milliers ha)	199	201,3	203,7	206,1	208,5	211	213,5	216	218,5	221,1
Rendement (t/ha)	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
Production (milliers t)	517,4	523,38	529,62	535,86	542,1	548,6	555,1	561,6	568,1	574,86
Importation (en milliers t)	310,8	328,02	345,58	363,74	382,5	401,8	421,9	442,8	465,3	486,34

Pour satisfaire à cette demande plusieurs options sont possibles : soit intervenir au niveau du rendement tel que défini par le SRI soit intervenir sur la surface mise en culture. Pour les distinguer, il faut des critères plus pertinents.

b. SCENARIO n° 2 : Extension des surfaces

Cette seconde hypothèse nous permet de voir les réalités si l'action devait porter sur l'augmentation des surfaces cultivables. Pour les estimations, l'aménagement d'environ 20% de la surface utile supplémentaire par an a été considéré. Le niveau de rendement est maintenu à son niveau actuellement. Les résultats des projections sont consignés dans le tableau n°55.

Sur la base de cette approche, il faut pratiquement doubler l'étendue des surfaces de cultures. Pour cela l'option de la mécanisation agricole doit être envisagée. Etant donné la répartition actuelle des surfaces disponibles, la seule véritable alternative pour cette option est l'aménagement des tanety. Seulement, il faut en même temps envisager le coût de tels aménagements sur l'économie régionale. L'option est certainement réalisable mais il faut une structure appropriée d'encadrement et de financement.

Tableau n°55 : Etudes prospectives de la situation de la filière riz à l'horizon 2010 : extension des surfaces cultivées

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Population (en milliers)	4141	4257	4376	4498	4623	4752	4885	5022	5162	5306
Besoins en riz (en milliers de tonnes)	828,2	851,4	875,2	899,6	924,6	950,4	977	1004,4	1033,4	1061,2
Production sans option (en milliers de tonnes)	517	524	530	536	543	549	556	562	569	576
Quantité à rechercher (en milliers de tonnes)	196	199	201,3	203,7	206,1	208,5	211	213,5	216	218,5
Surface totale avec une évolution normale (en milliers ha)	199	201	204	206	209	211	214	216	219	222
Surface utile supplémentaire (en milliers ha)	120	126	133	140	147	154	162	170	179	187
Surface à aménager (en milliers ha)	24	50	80	112	147	154	162	170	179	187
Quantité à importer	249	197	138	73	0	0	0	0	0	0

c. SCENARIO n° 3 : Amélioration du rendement

Dans cette optique, l'évolution normale des surfaces cultivées est maintenue, tandis que le rendement, seule variable, sera considéré comme facteur d'augmentation de la production totale. Pour cela, une partie seulement des surfaces cultivées pourra être touchée. La population ciblée sera les exploitations de moins de 40 ares (environ 54% de la surface totale). L'amélioration du rendement espéré est de 30% par an environ jusqu'en 2005, pour se stabiliser à ce niveau à partir de 2006 (tab n°56)

Le niveau de rendement utile pour l'ensemble des exploitations est d'environ 4,5t/ha. En comparant celui-ci avec les rendements obtenus par le SRI, il est pratiquement sûr de l'atteindre. Seulement, étant donné que tous les producteurs n'ont pas la même motivation quant aux exigences du SRI, seule la catégorie de producteurs correspondant à certains critères pourra l'adopter : petite surface, disponibilité de main d'œuvre, faible épargne ... A partir de 2005, la production totale permet de dégager un surplus commercialisable d'environ 180 000 tonnes par an.

Tableau n°56 : Etudes prospectives de la situation de la filière riz à l'horizon 2010 : amélioration du rendement

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Population (en milliers)	4141	4257	4376	4498	4623	4752	4885	5022	5162	5306
Besoins en riz (en milliers de tonnes)	828,2	851,4	875,2	899,6	924,6	950,4	977	1004,4	1033,4	1061,2
Surface totale de culture (en milliers ha)	199	201	204	206	209	211	214	216	219	222
Rendement moyen utile (t/ha)	4,2	4,2	4,3	4,4	4,4	4,5	4,6	4,6	4,7	4,8
Surface susceptible d'amélioration du rendement (milliers ha)	107	109	110	111	113	114	115	117	118	120
Rendement amélioré envisagé (t/ha)	2,6	3,4	4,4	5,7	7,4	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2
Production avec amélioration	279	368	484	636	837	932	947	958	969	981
Production des autres surfaces	238	241	244	247	250	253	256	259	262	265
Production totale	517,4	608,4	727,3	882,9	1086,6	1184,4	1202,2	1216,6	1231,2	1246,0
Solde (Besoin – Production totale)	310,8	243,0	147,9	16,7	-162,0	-234,0	-225,2	-212,2	-197,8	-184,8

Toutefois, avec les acquis actuels concernant le SRI, une augmentation indéfinie du rendement serait encore au stade de l'utopie. Il a été observé à certains endroits que le rendement augmente au fil des ans mais, à terme, un seuil pratique et technique devra être atteint. Aussi, à un moment donné, faudra-t-il, soit aménager de nouvelles surfaces de culture, soit augmenter les surfaces en SRI, soit les deux alternatives en même temps. Par conséquent, de nouvelles mesures doivent être étudiées pour cela.

4.3.2.2. Problèmes

Les adeptes du SRI trouveront dans ce système tous les bienfaits qu'il mérite. Seulement, étant donné la vocation du milieu intellectuel de faire état aussi bien des opportunités que des inconvénients d'une innovation, il est important d'avoir une vision critique sur ce système.

Etant donné l'absence de système d'assurance en milieu rural, les paysans sont obligés d'adopter une stratégie leur permettant de mieux supporter les risques de mauvaise saison (Mada économie, 1995). Pour cela, la polyculture est la forme la plus courante afin de garder une certaine stabilité au niveau du système de production. Ainsi, même si de graves accidents se produisent au cours d'une saison culturale, leurs effets sur l'ensemble du système de production restent faiblement significatifs. De cette situation découlent d'importantes contraintes lors de la vulgarisation de nouvelles techniques de production :

- La main d'œuvre agricole de chaque unité de production familiale est fortement utilisée pendant une certaine période de l'année. Les revenus de l'exploitation ne suffisent pas pour subvenir aux besoins alimentaires, en particulier, alors elle est obligée de vendre sa force de travail pour espérer gagner de l'argent.
- Dès lors que des investissements financiers sont nécessaires, les paysans ne peuvent pas y adhérer car les périodes d'investissements correspondent presque souvent à celles des rentrées scolaires, occasionnant par là même d'autres dépenses supplémentaires.
- L'augmentation de la production s'est souvent soldée par la diminution des prix aux producteurs, pénalisant systématiquement les exploitations de petite et moyenne taille, dont la faiblesse de la production ne permet pas de rivaliser avec les grosses exploitations. En vérité, ces petits producteurs font faillite pour cause de « surcoût ».

CONCLUSION PARTIELLE

L'étude économique a ouvert un chapitre sur les particularités du monde rural des hautes terres. Les difficultés que les paysans endurent exigent une action de la part de chaque entité, afin d'apporter des solutions. L'objectif est d'atteindre une autosuffisance alimentaire dans la région, et d'assurer une amélioration du revenu des paysans, et ce, en vue d'une meilleure lutte contre la pauvreté en milieu rural.

Les paysans opèrent dans un environnement de contraintes (terre, équipements, moyens financiers ...). De plus, ils ne bénéficient pas de conditions favorables sur le marché. Même s'ils ont la volonté de développer leur activité, ils sont « emprisonnés » dans ce contexte. Par conséquent, ils adoptent un mode de production tourné davantage vers l'autosuffisance.

En comparant les différentes méthodes de culture (traditionnelle, améliorée ou intensive), des avantages peuvent être attribués au SRI. Toutefois, ils ne pourront être atteints qu'avec une parfaite maîtrise des techniques y afférentes.

En connaissant les différents contextes rizicoles des hautes terres, l'esquisse de scénario par projection a permis de mettre en relief les enjeux du futur. Le SRI peut effectivement être intégré dans le schéma général de développement. Mais à lui seul, il ne pourra pas résoudre tous les problèmes en milieu rural (infrastructures, échanges, financement ...).

CONCLUSION GENERALE

Au cours de cette étude, les différents aspects de la production rizicole ont été abordés. Les liens entre le « Malgache » et le riz se sont bien marqués par l'histoire. En ce début du millénaire orienté vers la mondialisation tous azimuts, nous sommes obligés de valoriser notre agriculture, dans un contexte plus économique, d'autant plus que les activités rizicoles préoccupent près de 80% des paysans avec 40% du PIB agricole. Une analyse plus approfondie de la situation constituera un meilleur gage de succès.

La réalisation des objectifs de développement dépend essentiellement de la capacité de la nation à prendre toutes mesures appropriées dans le contexte socio-économique en vigueur. En effet, notre pays possède un grand potentiel grâce à la diversité biologique et sociologique. Dans les hautes terres, nous avons pensé que les efforts sur la riziculture ont été orientés vers l'intensification (GOPR, ODR ...) c'est-à-dire augmentation de la productivité. Nous possédons les techniques y afférentes (intensification, mécanisation ...) et nous savons également les exploiter. Il nous faut maintenant trouver la combinaison idéale pour un décollage rapide de notre économie et une lutte efficace contre la pauvreté.

D'une part, notre étude se propose de prouver que le SRI peut s'adapter parfaitement aux conditions des hautes terres malgaches : conditions écologiques, contexte technico-économique tel que étroitesse des parcelles, disponibilité de la main d'œuvre, faible utilisation d'intrants ... D'autre part, le SRI peut donner des rendements élevés : 6 t/ha sur sols limono-sableux et 10 t/ha sur sols argilo-limoneux, permettant aux paysans de disposer d'une quantité importante de riz. Toutefois, cela ne suffit pas car les conditions de culture sont variables d'une exploitation à l'autre et d'une zone à l'autre, selon la maîtrise de l'eau. Néanmoins, nous avons évalué les combinaisons basées sur les facteurs du rendement en SRI, et nous avons obtenu, à chaque fois, une amélioration « sensible » du rendement. Il faut noter toutefois que la meilleure combinaison reste le repiquage de plants de 8 jours à 1 brin avec une maîtrise de l'eau, associée à l'utilisation de compost et un écartement suffisant pour le bon développement de la plante : 25 cm x 25 cm pour les sols argileux et un peu moins pour les sols limoneux (probablement entre 15 cm x 15 cm et 20 cm x 20 cm).

Tous ces résultats ont été obtenus avec une variété traditionnelle (riz rouge) qui est plus rustique mais dont la réponse aux engrais minéraux est moindre. Si d'autres variétés plus performantes avaient été utilisées, des résultats encore plus surprenants auraient été observés. Mais là n'est pas l'objectif dans le court terme. Il semble plus judicieux de proposer des solutions capables de combiner à la fois les moyens actuels à disposition des paysans (petite surface, outillage manuel, amendement organique, variété traditionnelle, faible épargne ...) et les alternatives en mesure de leur apporter un surplus net agricole. Le SRI se positionne dans ce cas comme une proposition répondant à la plupart de ces conditions. Il intervient en optimisant l'utilisation des ressources de l'exploitation pour obtenir une augmentation « raisonnable » du rendement.

Les problèmes et obstacles à la diffusion de cette technique peuvent avoir différentes origines. Pour le cas des hautes terres, ils sont surtout liés à la maîtrise de l'eau. La quantité de pluie annuelle est largement suffisante pour satisfaire aux conditions exigées par la pratique du SRI ; seulement, les rizières n'ont pas été conçues pour drainer l'excès d'eau. Cela semble plus facile à réaliser dans les petites vallées alors que dans les grandes plaines telles que le « Betsimitatatra », les aménagements nécessitent une plus forte mobilisation. Malgré tout, en

se basant sur les résultats obtenus à partir de ces essais, il sera peut-être possible d'envisager un jour une variante encore plus efficace du SRI sur ces plaines où la maîtrise de l'eau prêle souvent à difficulté.

Sur le plan scientifique, une nouvelle perspective s'ouvre. Les premiers résultats sur la fixation biologique de l'azote avec le SRI confirment l'hypothèse de départ. Il est clair que la présence des *Azospirillum* dans les racines répond à des conditions particulières. L'apport de compost est indispensable à l'établissement d'un nombre important de bactéries. Les engrais chimiques de synthèse limitent leur développement. Les fixateurs sont très vulnérables à l'absence de fertilisation. Pour les années à venir, d'autres études plus approfondies seront nécessaires pour préciser davantage les observations et réflexions y afférentes.

Pour l'instant, il est évident que la fixation associative de l'azote atmosphérique est « acquise » pour le riz en SRI. Il reste alors à préciser, par d'autres méthodes d'investigation, que cette association contribue effectivement au rendement en SRI. Pendant longtemps, les chercheurs se sont heurtés à l'incapacité de ces *Azospirillum* à coloniser l'intérieur des racines. A la suite des analyses effectuées, non seulement ces bactéries étaient présentes dans les racines, mais simultanément, les hauts rendements, en relation avec l'importance de la colonisation des racines, surgissaient. Les trois souches qui ont été identifiées, isolées et purifiées sont toutes capables de pénétrer à l'intérieur des racines. Leur nature spécifique et leur performance n'ont pas pu être déterminées dans ce travail. Ce qui semble évident pour l'heure est qu'elles agissent en synergie. L'une des souches décelées, en association avec les deux autres, a été systématiquement retrouvée sur les plants à hauts rendements. Serait-ce cette souche la clé de voûte du haut rendement en SRI ? La question mérite une certaine attention.

L'objectif à moyen terme est de pouvoir tirer profit de cette propriété biologique aux fins d'un mieux être de la nation entière : c'est le devoir et la vocation de toute la communauté scientifique. Aussi, cette première étape dans l'exploration du vaste domaine de la fixation biologique de l'azote sur les plantes non-légumineuses n'est-elle qu'une modeste contribution à la compréhension du mécanisme d'action. Plusieurs questions restent encore sans réponse, et parmi elles on peut citer notamment : Quelle est la nature réelle des relations entre le riz en SRI et la fixation de l'azote ? Quel(s) facteur(s) entre(nt) dans la régulation du mécanisme ? Quelle autre possibilité peut être envisagée dans ce domaine ? Ce sont les défis pour le futur.

Pour terminer, nous pensons que le SRI peut aider certains paysans qui veulent capitaliser leurs efforts. Les surplus de main d'œuvre, et la peine requise dans l'« aération du sol » par les sarclouses mécaniques seront récompensés par l'obtention d'un surplus de riz. Ce qui n'est pas toujours évident aux yeux des grands exploitants. Il appartient à tout un chacun de trouver la solution appropriée à ses problèmes. Au point de vue paquet technique et scientifique, le SRI peut être considéré comme une alternative à l'augmentation de la production rizicole.

ANNEXE N°1

COMPOSITION DU MILIEU DOBEREINER

Pour 1 litre du milieu Dobereiner, il faut :

Constituants	<u>Quantité</u>
KH_2PO_4	0,4 g
K_2HPO_4	0,1 g
$\text{MgSO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$	0,2 g
<i>NaCl</i>	0,1 g
CaCl_2	0,02 g
FeCl_3	0,01 g
$\text{NaMoO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$	0,002 g
Fumarate	5,0 g
Glucose	1,0 g
H_2O (q.s.p)	1 l
Agar	15,5 g

ANNEXE N°2

COÛT DE FABRICATION DU COMPOST

Le coût de fabrication du compost comporte essentiellement deux postes de dépense :

- la main d'œuvre ; et
- la matière première.

Les détails de la main d'œuvre sont résumés dans le tableau suivant :

Opérations	Quantité (hj)	Prix Unitaire (Fmg)	TOTAL (Fmg)
Approvisionnement et broyage des matières vertes			
- Paille	3	6 000	18 000
- Tephrosia			
- Crotalaria	5	6 000	30 000
- Mimosa			
<i>Mise en place</i>	2	6 000	12 000
Entretien	6	6 000	36 000
TOTAL	16		96 000

Le détail des achats de matières premières sont résumés dans le tableau suivant :

Désignation	Quantité	Prix Unitaire	TOTAL
Fumier	½ charretée	50 000	25 000

Le coût de production totale compost est donné dans le tableau suivant :

Désignation	Pour 1 tonne		Pour le kilo	
	Quantité	Coût (Fmg)	Quantité	Coût (Fmg)
Main d'œuvre	16 hj	96 000	-	96
Matières premières				
- matières vertes	95 sacs	-	-	-
- fumier	½ charretée	25 000	-	25
TOTAL		121 000		121

ANNEXE N°3

SCHEMA DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL (SITE NORD)

1. NPK/SME

6	1	4	2	3	5	7	8
5	8	1	6	2	3	4	7
4	8	6	3	2	1	7	5

2. CPT/SME

3	4	8	1	2	7	6	5
2	5	7	3	6	7	8	1
6	4	8	5	3	2	7	1

3. SSF/SME

5	6	8	2	1	4	3	7
4	3	2	1	6	7	8	5
3	2	4	8	5	1	7	6

4. NPK/AME

1	2	3	4	5	6	7	8
2	3	4	5	6	7	8	1
3	4	5	6	7	8	1	2

5. CPT/AME

1	4	2	8	6	7	5	3
2	5	4	3	7	8	1	6
4	6	5	8	1	2	7	3

6. SSF/AME

7	5	2	3	8	6	4	1
8	4	7	5	6	3	1	2
6	2	3	4	1	5	7	8

ANNEXE N°4

SCHEMA DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL (SITE SUD)

1. NPK/AME

6	8	7	4	4	5
7	4	8	3	3	8
3	5	6	2	2	7
1	2	5	1	1	6

2. CPT/AME

8	5	7	1
2	3	4	6
6	8	1	2
3	4	7	8
6	7	2	8
1	5	4	3

3. CPT/SME

6	2	3	5	6
7	1	1	7	7
	5	2	8	3
	8	4	6	1
		3	5	8
			4	4
				2

4. NPK/SME

6	5	4
7	6	5
2	1	8
8	2	1
1	3	3
5	4	2
4	7	6
3	8	7

NOTE : 1 à 8 correspondent aux traitements T1 à T8, SSF : sans fertilisation, NPK : engrais ternaire 11.22.16, CPT : compost, SME : sans maîtrise de l'eau, AME : avec maîtrise de l'eau