

INTRODUCTION

A Madagascar, comme dans la majorité des pays en développement (PED), l'Agriculture, dépendante des ressources naturelles climato-sensibles reste au cœur de l'économie. Ce secteur contribue pour près de 30% au Produit Intérieur Brut (PIB) du pays et emploie plus de 80% de la population active. La sécurité alimentaire d'une population en forte croissance, en particulier, dans les zones rurales constitue un enjeu majeur du secteur agricole. Selon les statistiques de 2005, environ 25% des populations rurales du pays sont classées comme souffrant de l'insécurité alimentaire (Banque mondiale, 2016).

Les populations rurales pratiquent une agriculture essentiellement tournée vers l'autoconsommation et l'économie de subsistance.

Les performances du secteur agricole se heurtent à diverses contraintes. Parmi les contraintes qui sont à l'origine de la faiblesse de la productivité sont principalement, (i) celles liées à la dégradation des sols (érosion, baisse de la fertilité...), à l'amenuisement des ressources naturelles et engendrées par les fortes pressions et la mauvaise utilisation d'engrais minéraux, (ii) celles liées à l'augmentation d'évènements climatiques extrêmes (sécheresse, inondation...), (iii) celles liées à la faiblesse des revenus réels des paysans et par conséquent du pouvoir d'achat, et (iv) celles liées au transfert de technologie et de connaissances.

Dans ce contexte, l'agroécologie, se positionne comme un des modèles techniques permettant de valoriser au mieux les ressources locales, de manière à limiter les ressources importées qui doivent être utilisées avec une efficacité optimale. En effet, les ressources locales sont en raréfaction par rapport à la croissance démographique et à l'augmentation des superficies cultivées. En outre, le coût des ressources importées est en croissance régulière du fait de l'augmentation de la demande à l'échelle mondiale.

L'agroécologie peut être définie comme un ensemble de pratiques permettant de soutenir durablement les activités agricoles tout en réduisant les externalités négatives liées au recours à des intrants de synthèse suite à une réduction de la biodiversité dans les systèmes cultivés (Wezel, A., et al., 2009). Dans ce cadre, l'intensification écologique pour l'agriculture familiale tropicale peut être considérée comme un modèle technique permettant de produire plus à travers la combinaison des ressources locales et des intrants externes (Bonny, 2011). Il s'agit alors de maximiser les ressources disponibles à l'échelle de l'exploitation, de la région ou du pays, et de compléter si nécessaire par des intrants de synthèse. A Madagascar, les principaux intrants utilisés sont liés à la lutte contre les ravageurs des cultures et à l'apport d'engrais azotés notamment pour soutenir la production de riz, base de l'autoconsommation nationale.

L'agriculture de conservation a été promue depuis 1991 sur les plateaux malgaches. Elle est basée sur le travail minimal du sol et l'intégration de plantes de couverture aux cultures, le paillis ou les litières de résidus qui en sont issus se voient conférer différents rôles : accroissement annuel des teneurs de C et de N de l'horizon de surface par les activités biologiques et à caractère humifère plus

importants, réduction de l'érosion, du ruissellement et des pertes par évaporation directe de l'ensemble sol-systèmes (Scopel et al., 2005).

Pour une production durable, il est indispensable de préserver la fertilité du sol à long terme. De par le monde intertropical, il a été démontré par exemple que les légumineuses telles *Mucuna sp.* et le *Stylosanthes guianensis* sont intéressantes pour la rotation des cultures, le paillage (feuilles) et la remise en état des sols, car elles poussent rapidement et produisent une matière organique abondante. Les feuilles de *Mucuna sp.* sont riches en azote, en phosphore et en potassium (Eilittä et al., 2004).

Les légumineuses sont responsables de la fixation biologique de l'azote atmosphérique et de la solubilisation des ions phosphates. Outre, leur rôle dans les cycles de l'azote et du phosphore, elles jouent un rôle sur l'augmentation de la matière organique du sol (Boddey, R., et al., 1997), et de contrôle de certains ravageurs des cultures (Ratnadass A., et al., 2012)

Dans le cadre de l'intensification agroécologique, l'efficacité de l'azote apporté dans les agroécosystèmes malgaches sous forme d'engrais de synthèse doit être optimisée pour compléter l'azote d'origine organique et atmosphérique. De nombreuses études ont porté sur différentes formes d'amélioration de cette efficacité dont entre autres le fractionnement de l'apport avec des engrais simples, le contrôle de l'érosion, la limitation des pertes par lixiviation et émissions gazeuses, ainsi que des cultures et associations de cultures avec des systèmes racinaires puissants et complémentaires (Wezel, A., 2009 ; (Scopel, E., et al., 2013 ; Ranaivoson, L., et al., 2017). La présente étude se rapporte à la réalisation d'une synthèse des expérimentations agronomiques de différents projets sur une zone d'altitude moyenne (entre 800 et 1300 m). Le site de référence d'Ivory sert de base à ce référentiel de par son ancienneté (1998, ONG TAFA).

Ces études agronomiques accompagnent un programme de sélection variétale réalisé d'abord dans l'Unité de Recherche en Partenariat sur les Systèmes de Culture et Rizicultures durables ou URP SCRID de 2001 à 2012 puis au sein du Dispositif en Partenariat des Systèmes de Production d'Altitude et Durabilité ou DP SPAD à partir de 2013. Ce DP se concentre sur le domaine pluvial, de plus en plus mis en valeur pour répondre à ces enjeux de sécurité alimentaire face à la saturation du domaine inondé. La mise en valeur de ce domaine pluvial est contrainte par de nombreuses difficultés, dont la gestion de la fertilité. En effet, même si l'intégration agriculture élevage constitue le socle de l'agroécologie des systèmes rizicoles à Madagascar avec la valorisation des pailles de riz pour la production des fumiers, les quantités disponibles pour l'intensification des terres pluviales est insuffisante (Razafimahatratra, M., et al., 2017).

L'étude s'articule en quatre principales parties : la problématique avec les hypothèses et les objectifs du travail, la méthodologie adoptée, la présentation des résultats et enfin les discussions et recommandations issues de la recherche. Elle se termine par une conclusion.

PARTIE I. METHODOLOGIE

I.1. Etat de l'art

I.1.1. L'azote en agriculture

Après le carbone, N est le nutriment le plus abondant dans toutes les formes de vie, puisqu'il est contenu dans les protéines, les acides nucléiques et divers autres composés. Les humains et les animaux finissent par acquérir leur azote à partir des plantes, qui se retrouvent dans les écosystèmes terrestres principalement sous forme minérale (par exemple NH_4^+ et NO_3^-) dans le sol. Le matériel parental des sols ne contient pas de quantités significatives de N (par opposition aux nutriments P et autres), et son principal renouvellement provient de la fixation de N_2 atmosphérique par un groupe spécialisé de biotes du sol. Cependant, le plus grand flux de N dans les sols est généré par le recyclage continu du N interne dans le système plante-sol: le N minéral du sol est absorbé par la plante, il est absorbé dans la biomasse, et finalement N retourne dans le sol sous la forme d'azote organique par les résidus végétaux. Ici, les résidus végétaux sont décomposés par le biote du sol et une partie du N est minéralisée pour le rendre disponible pour la croissance des plantes. Une partie des résidus végétaux est transformée en matière organique du sol (MOS) et le reste de l'azote contenu dans la plante participe à contribuer au stockage d'azote stable dans le sol. L'azote est perdu du sol par les excès d'eau et le lessivage, ou dans l'atmosphère émissions gazeuses, par dénitrification (NH_3 , N_2O et N_2). Dans la plupart des écosystèmes, la disponibilité de N peut limiter la productivité et il est donc nécessaire de faire en sorte que N soit recyclé dans le système sol-plante avec des pertes minimales. L'azote existe sous de nombreuses formes et différents états physiques dans les composés organiques et inorganiques, de sorte que les transformations entre ces formes rendent le cycle N assez complexe (FAO-UN, 2016)

La Figure 1 montre le cycle de l'azote pour des parcelles cultivées avec les principaux flux. Dans les études sur les sols, les études se concentrent en général sur la minéralisation de la MOS et des résidus de culture; l'immobilisation de N par la biomasse microbienne, notamment pour les systèmes en Agriculture de Conservation, caractérisés par des apports importants en résidus organiques. Au cœur de ce cycle se trouve le nitrate qui est un composé essentiel pour soutenir la production végétale mais également source de pollution par lixiviation et par son influence sur les pertes gazeuses (Scopel E., et al., 2005).

I.1.2. L'efficacité de l'utilisation de l'azote

L'efficacité de l'utilisation de l'azote peut-être généralement exprimée par le gain obtenu en production par unité d'azote apporté sous forme d'engrais ou d'apports organiques (Chikowo, R., et al., 2010). Le gain en production s'exprime généralement donc en kg ha^{-1} mais peut également être défini par la quantité d'azote absorbée par la plante selon la finalité de l'étude, qu'elle soit plus économique dans le premier cas ou plus agronomique dans le second cas. Pour les études menées en

terme d'efficacité agronomique, on peut étudier plus généralement la notion d'efficacité d'utilisation de l'azote en deux aspects principaux, avec dans un premier temps, la relation entre N disponible dans le sol et N absorbé par la culture, puis celle de d'azote absorbé et de la production en grains.

L'efficacité de l'absorption de l'azote et de la transformation de d'azote font intervenir différents facteurs abiotiques (climat, type de sol, pratiques culturales), comme biotiques (génétique, interaction génétique et micro-organismes du sol).

Les besoins en N de la culture de riz pluvial sont premièrement estimés par le niveau de rendement souhaité avec le calcul des exportations liées à la production de grain et de paille avec pour le riz 12.6 kg et 5.7 kg respectivement d'azote exportés pour produire 1 tonne de grain et 1 tonne de paille (cas théorique de la variété de référence NERICA 4 qui a un Indice de récolte d'environ 0.5 (rapport grain/biomasse totale) (Rakotoarivelo, M., 2017). De manière empirique, pour produire 3 tonnes de grain de riz pluvial, un apport de fertilisation d'environ 60 N pourrait être suggéré.

L'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'azote dans les agroécosystèmes à base de riz pluvial présente ainsi des avantages agronomiques, socio-économiques et environnementaux, et permet d'améliorer la sécurité alimentaire et les conditions de vie des petits exploitants agricoles.

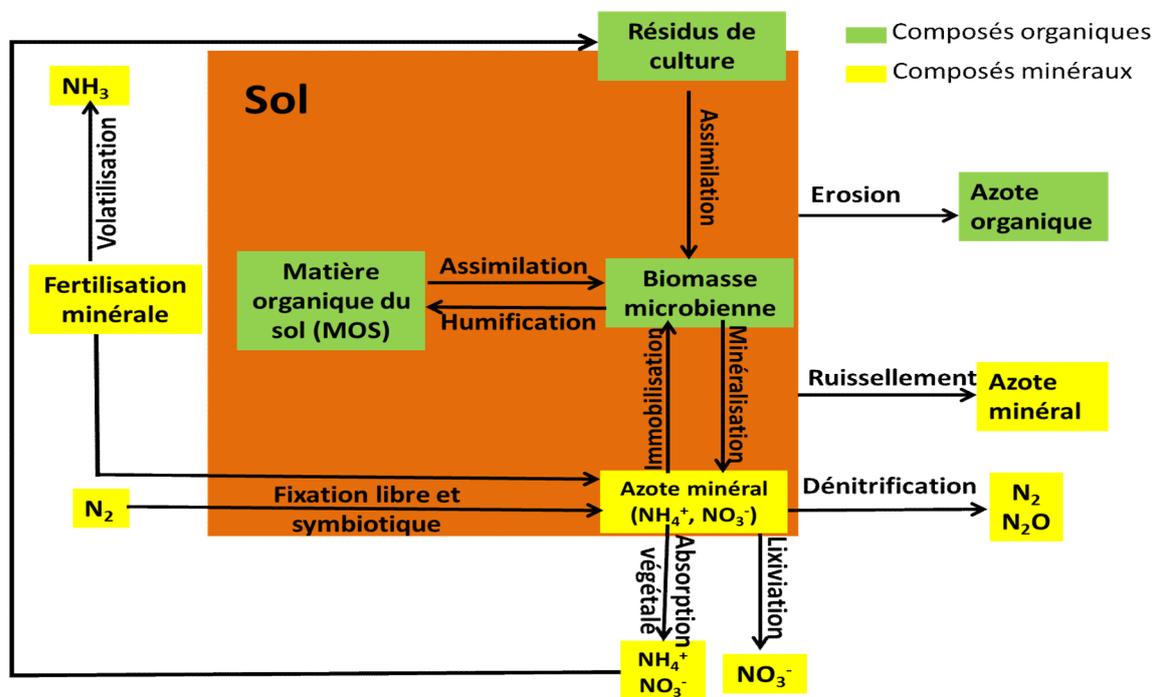


Figure 1. Cycle de l'azote (inspiré du travail de Scopel E., et al., 2005)

I.1.3. Le riz pluvial

Les variétés de riz pluvial cultivées dans notre zone d'études sont issues d'un programme de sélection ancien avec l'intégration dans la recherche internationale, et notamment au niveau de l'Africarice, avec comme principal critère de sélection sur cette zone, la résistance au *Striga asiatica*, qui est un véritable fléau régional. Différentes variétés sont disponibles avec de réelles aptitudes à répondre aux critères des agriculteurs en matière de cycle cultural (100 à 130 jours de cycle, qualité du goût, battage, ...). La variété NERICA 4 d'un cycle moyen de 120 jours à 1000 m d'altitude, montre un certain nombre de qualité outre sa bonne résistance et tolérance au striga et fait l'objet d'une diffusion spontanée en milieu réel. Cette variété aurait l'avantage selon des premiers résultats obtenus d'offrir une bonne efficacité au niveau de la transformation de l'azote absorbé, en grains. Cette variété NERICA 4 (New Rice for Africa) fait partie des variétés créées par l'Africarice et issue de croisement inter-spécifique entre *Oryza sativa* d'origine asiatique et *Oryza glaberrima* d'origine africaine.

I.2. Problématique, hypothèses et objectifs

I.2.1 Problématique

Pourquoi étudier l'efficacité d'utilisation de l'azote par le riz pluvial ?

Selon les estimations compilées par la FAO, d'ici à 2050, la production alimentaire devra augmenter de 60% **pour nourrir une population mondiale de 9,3 milliards**. Les productions agricoles doivent augmenter de 50 à 70% (FAO, 2015). A Madagascar, le rythme annuel de croissance démographique est estimé à 4,25% entre 1990 et 2010 (Banque mondiale, 2016). Au cours de cette période, les besoins alimentaires de la population ont respectivement augmenté de 60% et de 16% pour le riz et les produits d'origine animale (FAO, 2015). Afin de nourrir cette population à croissance rapide, **le secteur agricole doit améliorer à la fois sa productivité et sa durabilité aux moyens de différentes techniques plus en harmonie avec les écosystèmes**, en optimisant l'utilisation et la gestion des ressources productives qui se raréfient et en réduisant l'utilisation des intrants externes souvent trop coûteux.

Les sols d'altitude ou tanety ont besoin d'un apport considérable en fertilisation et doivent être mis en valeur dans le Moyen Ouest et c'est très important pour la sécurité alimentaire.

La question de recherche principale de la présente étude concerne **l'identification de déterminants de l'efficacité de l'azote (N) dans des systèmes agroécologiques contrastés, basés sur les systèmes conventionnels améliorés et des systèmes d'Agriculture de Conservation**.

Les questions de recherche secondaires associées à cette question principale sont principalement: le poids des facteurs climatiques et des rotations de culture dans des systèmes de culture à base de riz pluvial. Les études antérieures ont montré une forte variabilité de l'efficacité de N suivant le climat, le travail du sol et la présence des légumineuses avec le riz pluvial dans les systèmes de culture.

I.2.2. Objectifs

La présente étude vise à **identifier les modes de gestion du sol permettant une meilleure optimisation de l'efficacité d'utilisation de l'azote par le riz pluvial**. S'appuyant sur différents outils méthodologiques originaux propres au DP SPAD, utilisés lors des différentes expérimentations pour la collecte des données sur le climat, le sol et les plantes dont (i) une station météorologique automatique mesurant un ensemble de paramètres climatiques avec des outils de traitement de ces données (modèle Probe-w pour la mesure du bilan hydrique sous culture), (ii) des mesures *in-situ* sur le terrain pour les sols et les cultures (extraction *in-situ* de l'azote minéral, comptages racinaires, appareils d'estimation des taux en chlorophylle, prélèvement des biomasses en cours de cycle) , (iii) analyse en laboratoire d'appui de proximité (outil SPIR : possibilité d'analyse d'un grand nombre d'échantillons à moindre coût), ainsi que d'un schéma conceptuel d'élaboration des mécanismes pilotant l'efficacité d'utilisation de l'azote (schéma quadripolaire NUSE (Porter, J.R. et Christensen, S., 2013 ; modèle international DSSAT version 4.6 (Jones, J.W., et al, 2003)).

I.2.3. Hypothèses

Les hypothèses de ce travail sont :

- que l'azote est un facteur principal déterminant le rendement du riz pluvial ; à la fois la sélection variétale et l'agronomie considèrent cet élément comme un point focal pour augmenter le niveau de productivité du riz pluvial ;
- que l'efficacité de cet apport N pouvait être différente selon le mode de gestion des sols et des cultures. Nous avons comparé dans cette étude des systèmes contrastés, ceux s'inspirant des pratiques actuelles i.e. labour avec exportation des résidus de récolte, avec un modèle technique basé sur les principes de l'agriculture de conservation i.e. semis-direct sans labour avec des couvertures végétales mortes et l'insertion de légumineuses en rotation avec le riz.

I.3. MATERIELS ET METHODES

I.3.1. Description de la zone d'étude

Le site expérimental a été créé en 1998 et se situe dans le Moyen Ouest de la région VAKINANKARATRA, du District MANDOTO, sur la RN 34, dans le village d'Ivory, commune de Vinany (Figure 2), sur les coordonnées géographiques : 19°33'18 S 46°25' E et 19° 33'22 S 46°24'E. Les sols sont **de type ferralitiques** moyennement désaturés (Raunet, M., 2008). Une analyse de sol en surface de référence sur l'horizon 0-10 cm donne 34—39—27 % respectivement pour les argiles, limons et sables (Oxisol à texture limono-argileuse, USDA). Le sol est surtout déficient en phosphore assimilable (Randrianjafizanaka, M.T., et al., 2018)

Le Moyen-Ouest du Vakinankaratra a des altitudes comprises entre 800 et 1300 m (moyenne de 1 000 m environ), Le paysage est dominé par des collines, désignées sous le terme de "*tanety*", potentiellement propices à l'agriculture pluviale. Les bas-fonds sont souvent étroits ce qui limite la création de rizières irriguées. Dans les années 70, le Moyen-Ouest était considéré, dans son ensemble, comme une zone de front pionnier, où des terres neuves étaient progressivement colonisées (Razafimahatratra, M., et al., 2017). Pour l'ensemble du district de *Mandoto*, la densité moyenne de population reste faible et était évaluée, pour 2013, à 31 hab/km².

Les systèmes de production du Moyen-Ouest du *Vakinankaratra* sont caractérisés par la polyculture-élevage. La diversification des cultures fait partie intégrante des stratégies des exploitations agricoles (Raharison, T., 2014). Les cultures les plus répandues, cultivées pures ou en association, sont : le riz (de bas-fond et pluvial), le maïs, le manioc, le pois de terre et l'arachide. Les agriculteurs élèvent, pour la plupart, des bovins, des porcs et des volailles. L'élevage bovin, souvent extensif, est pratiqué pour un usage en traction animale et d'épargne sur pied.

Le climat de la région du Moyen-Ouest de Madagascar est du **type tropical sub-humide**. Ce type de climat constitue une zone de transition entre le climat tropical semi-humide de basse altitude (<500 m) et celui humide tropical des Hautes-Terres (>1000 m). Ce climat est caractérisé par l'alternance des trois saisons que les agriculteurs considèrent:

- « Maintso ahitra » ou « Fahavaratra », la saison chaude et pluvieuse qui commence le mois d'octobre avec le reverdissement de végétation herbacée et qui se termine en mars;
- « Lohataona », la saison intermédiaire qui commence en avril et se termine en juin;
- « Main-tany » ou « ririnina », la saison sèche et fraîche qui commence en juillet et se termine en septembre.

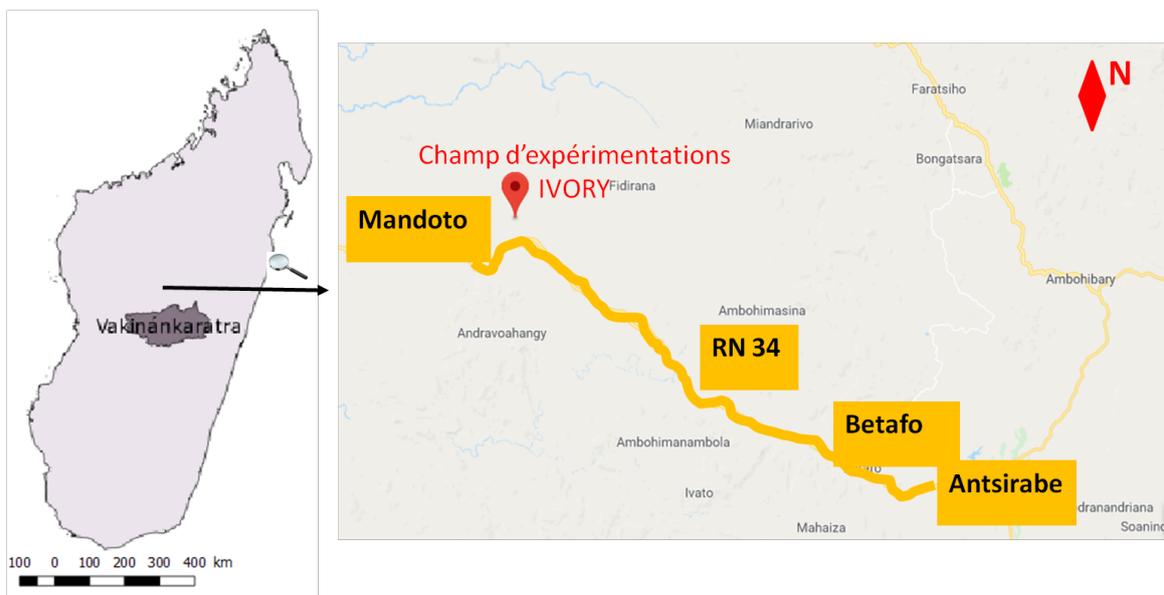


Figure 2. Site d'expérimentation, Ivory Moyen Ouest du Vakinankaratra.

I.3.2. Matériels

Plusieurs matériels ont été utilisés lors des expérimentations synthétisées par le présent mémoire :

- Matériels de laboratoire : venojects, pipettes jaugées, seringues, filtres, eau distillée, balance de précision, étuve, mélangeur manuel, centrifugeuse, essuie tout, portatif, entonnoir, béciers, fiole jaugée, pissette, éprouvette graduée, poire, gants et appareil SPIR ;
- Matériels de terrain : tarière, cuvettes, couteaux, boîtes à tare, étiquettes, ciseaux, glacières, pH-mètre, lecteur SPAD, sachets plastiques, enveloppe en papier, mesurette, bande adhésive, marqueur, crayon, fiche de notes, flacons, décimètre, parasol, piquets.

Les données collectées et analysées ont été prises sur :

- Les données climatiques issues d'une station météorologique automatique qui a été mise en place en 2006 (CIMEL Electronique S.A.S) avec des mesures automatiques toutes les 30 minutes des paramètres suivants : pluviométrie (mm) ; température (°C) ; rayonnement global (MJ m^{-2} ; vent (m s^{-1}) ; humidités relatives minimum et maximum (%). Ces données permettent de calculer l'évapotranspiration potentielle ou ETP selon la formule FAO 56.
- Le sol : N minéral, humidité ;
- Le riz : les composantes de rendement, la biomasse, les racines, les grains.

Les traitements des données ont été faits avec 3 logiciels : avec DSSAT, les offres en N du sol et le devenir de d'azote ont été modélisés ; avec XL Stat, les analyses statistiques ont été effectuées, basées sur des analyses de variances et comparaison de moyenne ; avec Racine 2, les dynamiques racinaires ont été diagnostiqués et avec Probe, le bilan hydrique sous culture a été mesuré.

I.4. Méthodes

I.4.1. Les différentes expérimentations

Le tableau 1 et l'ANNEXE 1 résument les expérimentations concernées par cette étude avec les traitements et les modalités techniques. De manière à mieux interpréter les résultats une seule variété de riz a été retenue, NERICA 4, variété de référence de la région de par son adaptation aux contextes humain et socioéconomique. Toutes ces expérimentations intègrent une comparaison d'un système conventionnel avec labour (LAB) et d'un système ou de plusieurs systèmes en agriculture de conservation (AC) dans le cadre de rotations biennales incluant du riz avec ou sans maïs, et testant différentes légumineuses. Les deux légumineuses testées sont *Stylosanthes guianensis* de la variété CIAT 184 (Photo 1) importé la première année sur les parcelles GSRUSE en 2014-2015 et *Mucuna cochinchinensis* (Photo 3) implanté en 2014 pour un arrière effet sur le riz en 2015-2016.

Tableau 1. Les expérimentations étudiées

Expérimentations	Années (récoltes)	Nombre d'années	Travail de sol	Fumure minérale (Unité N)
GARP	2010-2014	5	LAB	0
				60
			AC	0
				60
STRIGA	2012-2015	4	LAB	0
			AC	0
GSRUSE	2015-2016	2	LAB	0
				60
			AC M et AC L	0
				60
STRADIV	2016-2017	2	LAB	0
				60
			AC L	0
				60



Photo 1. *Stylosanthes guianensis* coupé et apporté sur GSRUSE 2014-2015.



Photo 2. Riz dans les mulchs de *Stylosanthes guianensis* sur STRADIV 2016-2017



Photo 3. Parcelle de *Mucuna cochinchinensis*.

Dans le cadre de l'expérimentation GARP, (Gestion Agronomique de la Résistance à la Pyriculariose, année 2010-2014), le riz est évalué dans le cadre d'une rotation intensive avec maïs (avec un rajout important de 60 P et de 120 K au moment du semis sur le maïs) et comparant trois doses d'azote différentes apportées sur le riz, soit 0, 60 et 120 N. Chaque année est apportée de la fumure organique sur riz et maïs.

Dans le cadre de l'expérimentation STRIGA, le riz est évalué dans le cadre d'une rotation peu intensive avec maïs (sans rajout de P et de K) et comparant différentes légumineuses associées au maïs. Chaque année est apportée de la fumure organique sur riz et maïs.

Dans le cadre de l'expérimentation GSRUSE, (Genomic Selection for Resources Use efficiency in Rice, année 2014-2016) le riz est évalué dans le cadre d'une rotation peu intensive (sans rajout de P et de K) et comparant 3 doses d'azote différentes apportées sur le riz, soit 0 et 60 et 120 N. Aucune fumure organique n'est apportée. Deux types de résidus sont comparés en Agriculture de Conservation, soit du maïs, soit de légumineuse.

Dans le cadre de l'expérimentation STRADIV, (System approach for the Transition to bio-Diversified agroecosystems, année 2016-2017) le riz est évalué dans le cadre d'une rotation moyennement intensive avec maïs (avec apport de 18 P et de 13 K) et comparant différentes légumineuses associées au maïs. Chaque année est apportée de la fumure organique sur riz et maïs.

L'expérimentation GSRUSE, est caractérisée par aucun apport de fumure organique et de complément phosphaté minéral modéré, celle de STRIGA par un apport de fumure organique élevé et sans apport minéral, celle de STRADIV par un apport de fumure organique élevé et minéral modéré et enfin celle de GARP par apport de fumure organique modéré et apport minéral élevé.

I.4.2. Le schéma quadripolaire l'analyse de l'efficience de la réponse du rendement du riz à l'application de fertilisation azotée ou NUSE

Un schéma conceptuel quadripolaire pour l'analyse de l'efficience de la réponse du rendement du riz à l'application de fertilisation azotée (NUSE, Nitrogen Use Efficiency) a été utilisé à partir des travaux de Van Noordwijk, M., and Van de Geijn, S.C. (1996) et Porter, J.R., Christensen, S. (2013).

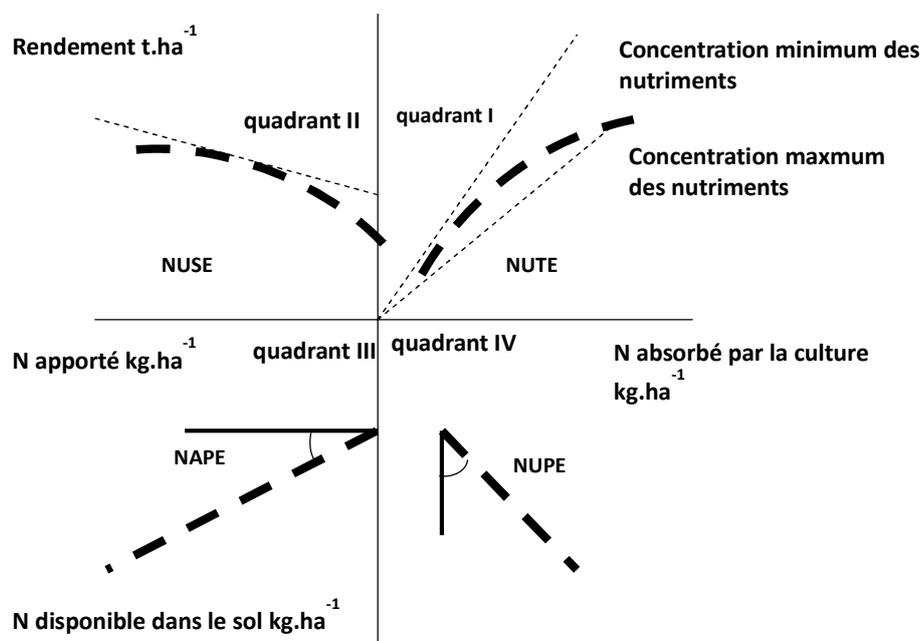


Figure 3. Schéma quadripolaire pour l'analyse de l'efficience de la réponse du rendement du riz à l'application de fertilisation azotée (NUSE, Nitrogen Use Efficiency).

Ce schéma appliqué à l'analyse de l'efficacité de la réponse du rendement du riz à l'application de fertilisation azotée (NUSE, Nitrogen Use Efficiency) est illustré en Figure 3 avec NUSE (quadrant II), comme efficacité d'utilisation de l'azote apporté par l'engrais, soit la relation entre la quantité de N en kg ha^{-1} et le rendement grain en t ha^{-1} au niveau du cycle cultural (120 jours) ;

Cette efficacité est analysée en trois étapes:

- NAPE, (N Application Efficiency, quadrant III), la relation entre l'azote apporté et l'azote disponible dans le sol (0-80 cm) ;
- NUPE, (N Uptake Efficiency, quadrant IV), la relation entre l'azote disponible dans le sol et l'azote absorbé par la culture
- NUTE, (N utilization Efficiency, quadrant I), la relation entre l'azote absorbé par la culture et le rendement grain en t ha^{-1}

Les différents facteurs de variation possible de NUSE sont nombreux :

- Pluviométrie (excès d'eau, sécheresse) ;
- Variété (physiologie, système racinaire) ;
- Date de semis (précoce ou tardif) ;
- N apporté (engrais et fumure organique) ;
- Fumure de fond (P K Ca) ;
- Précédent cultural (type de légumineuse) ;
- Mode de gestion du sol (labour ou non-labour en agriculture de conservation) ;
- Type de mulch au semis.

Dans le Tableau 2 les outils, indicateurs et variables de la méthodologie utilisée pour l'analyse quadripolaire de chaque expérimentation.

Tableau 2. Outils, indicateurs et variables de la méthodologie utilisée pour l'analyse quadripolaire.

ESSAI	Indicateurs	SOL			PLANTE			
		N minéral	N sol disponible	Drainage	Racines	SPAD	N riz	Rendement
GARP GSRUSE STRIGA STRADIV	NUSE							Mesure Grains et pailles récolte
GSRUSE STRADIV	NAPE	-N minéral in situ -N absorbé Riz sans N	DSSAT	PROBE				
	NUPE				Profil racinaire (Racine 2)	SPAD (feuilles)	-N total riz (SPIR) -Relation entre Rendement et N total riz	
	NUTE							