



ATHENEE SAINT JOSEPH ANTSIRABE

(A.S.J.A)

Université Privée à Vocation Professionnalisante

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

en

Filière : Sciences Agronomiques

Option : Production Végétale

MISE AU POINT DES SYSTÈMES DE CULTURE DURABLE À BASE DE MAÏS PRODUCTIF INTÉGRANT LES FOURRAGES

Présenté par : RAKOTOARISOA Hery Lalaina

Soutenu le 06 Novembre 2009

Devant les membres de jury composés de :

Président : Monsieur Damien RALAIVAOHITA, Docteur en Economie Rurale

Rapporteurs : Madame Sahondra ANDRIAMALAZA, Docteur en Pédologie

Madame Julie DUSSERRE, Docteur en Ecophysiologie

Examineurs : Monsieur Heriarivony Jaona RAKOTONIRAINY, Ingénieur Agronome

Monsieur Jean Marie DOUZET, Ingénieur Agronome



URP/SCRiD

SRR FOFIFA Antsirabe 110

Athénée Saint Joseph Antsirabe

BP.287 Tél: 4448319/20

E-mail:asja@moov.mg



ATHENEE SAINT JOSEPH ANTSIRABE

(A.S.J.A)

Université Privée à Vocation Professionnalisante

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

en

Filière : Sciences Agronomiques

Option : Production Végétale

**MISE AU POINT DES SYSTÈMES DE
CULTURE DURABLE À BASE DE MAÏS
PRODUCTIF INTÉGRANT LES
FOURRAGES**

Présenté par : RAKOTOARISOA Hery Lalaina

Soutenu le 06 Novembre 2009

Devant les membres de jury composés de :

Président : Monsieur Damien RALAIVAOHITA, Docteur en Economie Rurale

Rapporteurs : Madame Sahondra ANDRIAMALAZA, Docteur en Pédologie

Madame Julie DUSSERRE, Docteur en Ecophysiologie

Examineurs : Monsieur Heriarivony Jaona RAKOTONIRAINY, Ingénieur Agronome

Monsieur Jean Marie DOUZET, Ingénieur Agronome



URP/SCRiD

SRR FOFIFA Antsirabe 110

Athénée Saint Joseph Antsirabe

BP.287 Tél: 4448319/20

E-mail:asja@moov.mg

RESUME

Le maïs est la deuxième céréale vivrière cultivée à Madagascar, après le riz. Sa culture est généralement réalisée en association avec une légumineuse chez les paysans. Parmi toutes les régions de la grande île, notre zone d'étude, Vakinankaratra, possède la plus grande superficie maïsicole (78 034 ha). L'élevage bovin laitier y demeure de même important. Comment les développer de façon durable tout en maintenant le capital sol ?

Notre étude, réalisée sur le dispositif expérimental de l'URP/ SCRiD à Andranomanelatra a porté sur la mise au point des systèmes de culture durable à base de maïs productif intégrant des plantes fourragères. Notre recherche a été axée particulièrement pour chaque système étudié sur :

- ✓ les relations (compétition / complémentarité) entre plantes associées : mesures en cours du cycle de la hauteur du maïs ;
- ✓ les rendements du maïs ;
- ✓ les biomasses produites ;
- ✓ le ISE ou Indice de Surface Equivalente.

Les résultats ont montré que :

- ❖ il y a un effet plus marqué des traitements en cette deuxième année de conduite de l'expérience.
- ❖ il y a un effet significatif de la fertilisation sur le rendement du maïs (entre FM et Fu).
- ❖ les meilleurs rendements en grain ont été obtenus avec les systèmes S2 Lab (2867,2 kg/ha) ainsi que le système associé avec l'éleusine et le crotalaire (2155,8 kg/ha).
- ❖ la plus forte production de biomasse a été obtenue en S2 SCV (5766,6 kg/ha) et en maïs associé de même qu'en rendement en grain à l'éleusine et le crotalaire (7094,5 kg/ha).
- ❖ toutes les associations se révèlent favorables.

Mots clés : maïs, plantes fourragères, rendement, biomasse, ISE

ABSTRACT

After the rice, corn is the second cereal food crops in Madagascar. Its culture is generally achieved in association with a fabaceae among the peasants. Among all regions of the big island, our zone of study, Vakinankaratra, possesses the biggest surface area of its plantation (78 034 ha). In the same way, the dairy farm stays here important. How to develop them in a lasting way and maintaining the fundamental soil?

Our study, achieved on the experimental device of the URP / SCRiD in Andranomanelatra was about the clarification of the lasting culture systems on basis of productive corn integrating fodder plants. Our research has especially been centered for every studied system on, such as :

- the relations (competition / complementarity) between associated plants: measures under the cycle of the corn height;
- the outputs of the corn;
- the biomasses produced;
- the LER or Land Equivalent Ratio.

The results showed that:

- there is an effect more marked of the treatments in this second year of experience conduct.
- there is a meaningful effect of fertilization on the corn yield (between FM and Fu).
- the best seed yield have been gotten with the systems S2 Lab (2867,2 kg/ha) as well as the system associated with the eleusine and the crotalaire (2155,8 kg/ha).
- the strongest biomass production has been gotten in S2 SCV (5766,6 kg/ha) and in corn partner as well as in grain yield to éleusine and crotalaire (7094,5 kg/ha).
- all associations prove to be good.

Key words: corn, fodder plants, yield, biomass, LER

*« L'honnêteté et la sincérité te rend vulnérable
Peut importe : soit honnête et sincère ! »*

Le meilleur de Toi, Prière de Mère Teresa

*« Je dédie ce mémoire à
mes parents, ma sœur, mes
frères et à toute ma
famille, encore merci ! »*

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous tenons à remercier **DIEU** tout Puissant qui nous a donné vie, santé, force et intelligence. Sa grâce nous a permis de réaliser ce mémoire.

Ce travail est le fruit de la contribution de plusieurs personnes et institutions à qui nous voudrions présenter notre profonde gratitude et nos sincères remerciements. Qu'ils retrouvent ici l'expression de notre grande reconnaissance.

➤ Nous tenons ainsi à remercier en particulier :

- ❖ **Père Giuseppe Mario CUOMO**, Fondateur et Directeur Général de l'Athénée Saint Joseph d'Antsirabe (A.S.J.A.), qui avec sa volonté et son courage a construit cette université afin d'aider les jeunes malgaches à continuer leurs études.
- ❖ **Madame Laurence RALAMBORANTO**, Recteur de l'ASJA, ses charges administratives considérables à l'Université ne l'empêchent pas de nous prodiguer de judicieux conseils.
- ❖ **Monsieur Damien RALAIVAOHITA**, **Docteur en Economie Rurale** et Enseignant à l'ASJA. Merci pour l'honneur d'avoir accepté de présider le jury de notre soutenance.
- ❖ **Monsieur Jean Marie DOUZET**, **Ingénieur Agronome** et chercheur du CIRAD, d'avoir consacré une partie de son temps précieux pour rehausser la valeur de ce travail par sa correction et ses remarques constructives. Nous le remercions de nous avoir accordé son attention en tant qu'examineur.
- ❖ **Monsieur RAKOTONIRAINY Heriarivony Jaona**, **Ingénieur Agronome** examinateur et Enseignant à l'ASJA. Nous lui sommes très reconnaissants de nous avoir accordé un peu de son temps pour juger notre travail, votre remarque et suggestion seront considérées pour l'amélioration de notre mémoire.
- ❖ **Madame Julie DUSSE**RE, **Docteur en Ecophysiologie** et chercheur du CIRAD, qui nous a encadré techniquement malgré sa lourde responsabilité au sein du CIRAD. Vos conseils et vos aides durant notre stage nous ont beaucoup servi. Vos directives nous ont été précieuses pour compléter nos connaissances lors de nos pratiques sur terrains. Merci pour avoir veillé au bon déroulement de celles-ci.
- ❖ **Madame Sahondra ANDRIAMALAZA**, **Docteur en Pédologie**, Enseignante de Pédologie à l'ASJA, notre encadreur pédagogique qui nous a consacré beaucoup de temps précieux pour l'élaboration de ce mémoire. L'intérêt que vous avez porté sur notre travail nous a beaucoup marqué.

- Nous adressons également nos vifs remerciements à :
- ❖ **Tous les professeurs et personnels de l'Athénée Saint Joseph Antsirabe** qui nous ont épaulé depuis le début de nos études jusqu'à la réalisation de ce mémoire.
 - ❖ **les Techniciens et mains - d'oeuvre de l'URP/SCRiD**, en particulier ceux d'Andranomanelatra pour les détails techniques et leur précieuse aide au cours de nos travaux sur terrain.
 - ❖ **Mes parents, et toute ma famille** pour leur soutien moral et financier, pour leur amour durant nos études
 - ❖ **Mes camarades de classe** pour la bonne collaboration sous toutes ses formes et l'ambiance dans la classe. Ces cinq ans d'études ont été courts et agréables en votre compagnie
 - ❖ Les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin, pour le bon déroulement de ce stage.

A TOUS ET A TOUTES, ENCORE MERCI !

SOMMAIRE

RESUME

ABSTRACT

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

LISTE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES ANNEXES

GLOSSAIRE

INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : CONTEXTE ET GENERALITE	2
Chapitre premier : Présentation de la région du Vakinankaratra	3
1-1 Localisation géographique	3
1-2 Condition physique de la région	5
1-2-1 Géologie	5
1-2-2 Climat	5
a- Température	5
b- Pluviométrie	6
1-2-3 Végétation et agriculture	7
a- Végétation	7
b- Agriculture	7
Chapitre II : Les plantes principales	8
2-1 Le maïs	8
2-1-1 Importance	8
2-1-1-1 A Madagascar	8
2-1-1-2 Dans le Vakinankaratra	9
2-1-2 Présentation de la plante	10
2-1-2-1 Systématique	10
2-1-2-2 Historique et variétés	10
2-1-2-3 Caractéristiques générales de la plante	11

2-1-3 Botanique et biologie	12
2-1-3-1 Description des organes de la plante	12
a- Organes végétatifs	12
b- Organes de reproduction	12
2-1-3-2 Cycle et Phases végétatives	14
a- La phase végétative	14
b- La phase de reproduction	14
c- Phase de maturité	15
2-2- Les plantes fourragères	15
2-2-1 Importance des cultures fourragères	15
2-2-1-1 But de la culture	16
2-2-1-2 Ampleur de la culture fourragère	16
2-2-2 Quelques plantes de couverture	17
Chapitre III : Evaluation de l'élaboration des composantes du rendement et des	
biomasses produites	19
3-1 Les systèmes de cultures et gestion du sol	19
3-1-1 Travail du sol	19
3-1-1-1 Labour	19
3-1-1-2 Le Système de culture en semis direct avec couverture végétale ou SCV	19
a- Fonctionnement	19
b- Principes	19
3-1-2 Notion sur quelques types de systèmes de cultures	20
3-1-2-1 En association	20
3-1-2-2 En rotation	21
3-1-2-1 En dérobée	21
3-1-3 Fertilisation	22
a- Fumure minérale	22
b- Fumure organique	22
c- Fumure mixte	23

3-2 Elaboration des composantes de rendements	23
3-2-1 Généralité	23
3-2-2 Pour le maïs	24
3-2-2-1 Les composantes du rendement du maïs	24
3-2-2-2 Elaboration des composantes du rendement durant le cycle végétatif	25
3-2-3 Pour les plantes fourragères	25
3-3 Les biomasses	27
3-3-1 Les types de biomasse	27
3-3-1-1 La biomasse brute	27
3-3-1-2 La biomasse secondaire	28
3-3-2 La biomasse représentant les précédents culturaux	28

PARTIE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE, DES MATERIELS ET

METHODES UTILISEES	30
---------------------------------	----

Chapitre I : Justification du thème	31
--	----

1-1 Cadrage de l'étude	31
-------------------------------------	----

1-1-1 Contexte général et centre d'accueil	31
--	----

1-1-1-1 Contexte général	31
--------------------------------	----

1-1-1-2 Centre d'accueil	32
--------------------------------	----

a- Le projet CORUS	32
--------------------------	----

b- URP/SCRiD	32
--------------------	----

1-1-2 Problématique	32
---------------------------	----

1-1-3 Objectif et méthodologie de recherche	33
---	----

1-1-3-1 Objectif du stage	33
---------------------------------	----

1-1-3-2 Méthodologie de recherche	33
---	----

a- Durant le stade végétatif	33
------------------------------------	----

b- A la récolte	34
-----------------------	----

c- A la fin de la saison sèche	34
--------------------------------------	----

1-2 Présentation générale de la zone d'étude	34
---	----

1-2-1 Localisation de la zone d'étude	34
---	----

1-2-1-1 Limites administratives	34
---------------------------------------	----

1-2-1-2 Limites géographiques	34
-------------------------------------	----

1-2-2 Les unités climatiques	37
1-2-3 Les unités pédologiques	38
Chapitre II : Les dispositifs et matériel végétal	39
2-1 Le dispositif expérimental de l'URP SCRiD	39
2-2 Le matériel végétal	41
2-2-1 La variété de maïs	41
2-2-2 Les différentes plantes fourragères associées avec le maïs	42
2-3 Systèmes de culture comparés	42
2-3-1 Parcelles de comparaison de systèmes de culture	42
2-3-1-1 Maïs + Haricot + (Avoine) : système S1	42
2-3-1-2 Maïs + éleusine : système S2	42
2-3-1-3 Maïs + Haricot + (Radis fourrager) : système S3	43
2-3-2 Parcelles de tests de cultures d'association	44
Chapitre III : Les méthodes de mesure	46
3-1 Mesure en suivi de culture : hauteur des plantes	46
3-1-1 Principe	46
3-1-2 Mode opératoire	46
3-2 Mesure à la récolte	46
3-2-1 Composantes du rendement du maïs	46
3-2-2 Mesure des cultures associées au maïs	50
3-2-3 Mesure des résidus sur la parcelle	51
3-3 Méthode de traitement des résultats	52
3-3-1 Analyses des résultats avec le logiciel SAS	52
3-3-2 Calcul de l'Indice de Surface Equivalente ou I.S.E	52
 PARTIE III : ANALYSE ET DISCUSSIONS DES RESULTATS	 53
Chapitre premier : Comparaison de systèmes de culture en grande parcelle de maïs en rotation avec du riz pluvial	54
1-1 Comparaison des systèmes en terme de rendement	54
1-2 Comparaison des systèmes en terme de production de biomasse	55
1-2-1 Biomasses produites en cannes de maïs	55
1-2-2 Biomasses produites hors maïs	56
1-2-3 Biomasses totales produites hors grain	57

1-3 Comparaison par l'analyse statistique des résultats sur 2 campagnes	57
1-3-1 Sur les rendements en grain du maïs	57
1-3-2 Sur les biomasses totales hors grain obtenus	58
Chapitre II : Comparaison de systèmes de culture en association de maïs et de plantes fourragères	60
2-1 Comparaison des systèmes au cours du cycle	60
2-2 Comparaisons des productions	61
2-2-1 Comparaison des systèmes en terme de rendement en grain	61
2-2-2 Comparaison des systèmes en terme de production de biomasse	62
2-2-2-1 Biomasses produites en cannes de maïs	62
2-2-2-2 Biomasses produites par les plantes associées	62
2-2-2-3 Biomasses totales produites hors grain	63
2-2-3 Analyse statistique	64
Chapitre III : Evaluation de l'association par l'Indice de Surface Equivalente (ISE) ...	66
3-1 Production en culture pure des plantes associées au maïs	66
3-2 Indice de Surface Equivalente ou ISE	67
3-3 Analyse statistique	70
CONCLUSION GENERALE ET SUGGESTIONS	72

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

Abréviations

AFD : Agence Française de Développement

ASJA : Athénée Saint Joseph Antsirabe

CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CORUS : Coopération pour la Recherche Universitaire et Scientifique

co 1 : La première plante de couverture

co 2 : La deuxième plante de couverture

DRDR : Direction Régionale de Développement Rural

FAO : Food and Agriculture Organization

FIFAMANOR : Fiompiana Fambolena Malagasy Norvezianina

FM : Fumure Minérale recommandée

FOFIFA : FOibem- pirenena momba ny Fikarohana ampiarina ho Fampanandrosoana ny tontolo Ambanivohitra

Fu : Fumier seulement

GRET : Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques

GSDM : Groupement Semis Direct à Madagascar

ISE : Indice de Surface Equivalente

JAS : Jours Après Semis

KOBAMA : KOBA MALagasy

LAB : Labour

L.E.R : Land Equivalent Ratio

MAEP : Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche

MAT : Quantité de Matière Azotée Totale

MO : Matière Organique

MS : Matière Sèche

ONG : Organisation Non Gouvernementale

PCD : Plan Communal de Développement

PCP : Pôle de Compétence en Partenariat

PDIE : Protéines Digestibles dans l'Intestin selon l'Energie

PDIN : Protéines Digestibles dans l'Intestin selon l'azote (N)

PDR : Programme de Développement Régional

Pféch : poids frais des échantillons prélevés

Pfensemble : poids frais de l'ensemble

Pfépi : poids frais d'épis récoltés dans la placette

Pféchépis : poids frais de l'échantillon d'épis

Pséch : poids sec des échantillons prélevés

PSgr : poids sec de grain

SCV : Système de culture en semis direct avec couverture végétale

TAFA : TAny sy FAmpanrosoana

UPDR : Unité Politique de Développement Rural

URP : Unité de Recherche en Partenariat

SCRiD : Système de Culture et Rizicultures Durables

UFL : Unité Fourragère Lait

USA : United States of America

Symboles et formules chimiques

N : Azote

P : Phosphore

K : Potassium

Ca : Calcium

Unités de mesure

% : pourcentage

°C : degré Celsius

cm : centimètre

g : gramme

ha : hectare

j : jour

kg : kilogramme

mg : milligramme

kcal : kilocalorie

NPK : engrais complexe composé d'Azote, de Phosphore et de Potassium

cm : centimètre

km² : kilomètre carré

m : mètre

m² : mètre carré

t : tonne

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Liste des tableaux

Tableau 1 : Districts et communes de la région

Tableau 1 : Température moyenne annuelle

Tableau 2 : Pluviométrie moyenne annuelle

Tableau 4 : Superficie et rendement moyen par région à Madagascar

Tableau 5 : Evolution des superficies et des productions dans la Région

Tableau 6 : Valeur nutritionnelle moyenne pour 100 g

Tableau 7 : Surfaces fourragères cultivées

Tableau 8 : Plantes fourragères

Tableau 9 : Table des valeurs alimentaires des fourrages

Tableau 10 : Rendements en grain du maïs obtenus sur les différents systèmes toutes fertilisations confondues (FM et Fu seulement) et sur les deux fertilisations tous systèmes confondus pour les campagnes 2008-09 et 2007-08

Tableau 11 : Biomasses totales hors grain obtenues sur les différents systèmes toutes fertilisations confondues (FM et Fu seulement) et sur les deux fertilisations tous systèmes confondus

Tableau 12 : Rendements en grain et fane du maïs, biomasses couverture et totales obtenus sur les différentes associations toutes fertilisations confondues et sur les deux fertilisations toutes associations confondues

Tableau 13 : Les couvertures 1 et 2

Tableau 14 : ISE pour le maïs et ISE total obtenus

Liste des organigrammes

Organigramme : Elaboration du rendement de maïs

Liste des figures

Figure 1 : Courbe ombrothermique, campagne 2008-2009

Figure 2 : Courbe ombrothermique moyennes de 7 années

Figure 3 : Comparaison des rendements en grain par système, mode de gestion et fertilisation

Figure 4 : Comparaison des biomasses produites en fanes de maïs

Figure 5 : Comparaison des biomasses produites hors maïs (plantes associées et résidus)

Figure 6 : Comparaison des biomasses totales produites hors grain

Figure 7 : Evolution de la hauteur des différents systèmes de 41 jours après semis jusqu'à floraison en FM

Figure 8 : Evolution de la hauteur des différents systèmes de 41 jours après semis jusqu'à floraison en Fu

Figure 9 : Comparaison des rendements en grain par association et fertilisation

Figure 10 : Comparaison des biomasses produites en fanes de maïs

Figure 11 : Comparaison des biomasses produites par les plantes associées par association et fertilisation

Figure 12 : Comparaison des biomasses totales produites hors grain

Figure 13 : Biomasses des plantes de couverture produites en culture pure (FM)

Figure 14 : Biomasses des plantes de couverture produites en culture pure (Fu)

Figure 15 : ISE de l'association

Figure 16 : ISE respectif de chaque plante en traitement FM

Figure 17 : ISE respectif de chaque plante en traitement Fu

Liste des cartes

Carte 1 : La région du Vakinankaratra

Carte 2 : Localisation géographique d'Andranomanelatra

Carte 3 : Localisation du site

Liste des photos

Photo 1 : Maïs

Photo 2 : Organes de reproductions du maïs

Photo 3 : Grain de maïs

Photo 4 : Cycles végétatifs

Photo 5 : Pollinisation

Photo 6 : Evolution de la couleur des grains

Photo 7 : Repérage pour les carrés

Photo 8 : Récolte d'épis

Photo 9 : Pesage d'échantillon de paille de maïs

Photo 10 : Echantillon dans l'étuve

Photo 11 : Pesage de grains

Photo 12 : Echantillon de plantes fourragères

Photo 13 : Récolte de résidus

LISTE DES ANNEXES

Annexe I : Relief et hydrologie dans la région du Vakinankaratra

Annexe II : Information supplémentaire sur le maïs

Annexe III : Le haricot

Annexe IV : Notion sur l'élevage laitier

Annexe V : Complément sur les modes de gestion du sol

Annexe VI : Dégradation de la matière organique

Annexe VII : Photo de la station météorologique CIMEL Andranomanelatra

Annexe VIII : Données sources sur les résultats dans les grands systèmes

Annexe IX : Données sources sur les résultats dans les tests d'associations

Annexe X : Données sources sur les résultats dans des couvertures en culture pure

GLOSSAIRE

Acidité : l'acidité du sol est exprimée par le pH, elle est régie par la quantité de cations hydrogène (H⁺) qui sont fixés sur le complexe argilo-humique ou en mouvement dans la solution du sol. Donc, le sol peut être acide (pH<7), neutre (pH=7) ou basique (pH>7).

Affouragement : approvisionnement des animaux d'une ferme en fourrage.

Annuelle : Les plantes annuelles sont des plantes qui vivent moins d'un an, et qui accomplissent donc leur cycle de vie en une seule année. Ces plantes passent l'hiver uniquement sous forme de graines.

Biotope : En écologie, un biotope est un ensemble d'éléments caractérisant un milieu physico-chimique déterminé et uniforme qui héberge une flore et une faune spécifiques (la biocénose).

Composante de rendement : se dit d'un type de production de la plante par rapport à une unité choisie bien déterminée (exemple : nombre d'épis par plant).

Composante d'une association : se dit de chaque espèce végétale comprise dans une association de cultures.

Culture vivrière : est une forme d'agriculture qui consiste à cultiver des produits essentiellement destinés à nourrir la population locale. La production n'est pas destinée à l'industrie ni exportée, mais elle est en grande partie consommée par les paysans eux-mêmes et la population locale. Elle vise surtout l'autosuffisance alimentaire des populations, et est le plus souvent une forme de polyculture associée à l'élevage.

Hybride : En génétique, l'hybride est le croisement de deux individus de deux variétés, sous-espèces (croisement intraspécifique), espèces (croisement interspécifique) ou genres (croisement intergénérique) différents. L'hybride présente un mélange des caractéristiques génétiques des deux parents. Lors de croisements interspécifiques, le terme métis est aussi utilisé. Chez les végétaux, on peut créer des hybrides en pratiquant une pollinisation contrôlée.

Indice de Surface Equivalente ou ISE : se définit par la surface relative de culture pure nécessaire pour produire le rendement de la culture dans l'association.

Insecticide : Étymologiquement, les insecticides sont des substances actives ou des préparations ayant la propriété de tuer les insectes, leurs larves et/ou leurs œufs. Ils font partie de la famille des pesticides.

Insectifuge : se dit d'une plante ou d'un produit ou une substance qui repousse les insectes (moustiques, mouches, poux, puces, punaises, etc.) chez l'Homme ou l'animal de compagnie ou d'élevage.

Nodosités : sont de petites boursouflures se formant sur les racines de nombreuses espèces de plantes, notamment les Fabacées, sous l'action de bactéries du genre *Rhizobium* vivant en symbiose avec la plante. Dans cette association symbiotique, la plante fournit les substances carbonées et les bactéries les substances azotées synthétisées à partir de l'azote atmosphérique.

Recyclage : Le recyclage est un procédé de traitement des déchets qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui composaient un produit similaire arrivé en fin de vie, ou des résidus de fabrication.

Split-plot : qui signifie parcelle séparée est une façon de disposer les parcelles sur un terrain d'expérimentation. Il est établi pour faciliter les interprétations et analyses des résultats des essais.

Structure : La structure d'un sol désigne le mode d'assemblage, à un moment donné, des constituants d'un sol. La structure, contrairement à la texture qui ne change pas, est un état qui évolue dans le temps.

Vivace : Une plante vivace, ou plante pérenne, est une plante vivant plus de deux ans, mais qui vit souvent beaucoup plus longtemps, la limite de deux ans étant fixée pour séparer les vivaces des bisannuelles. L'expression « plante vivace » est plus souvent utilisée par les jardiniers, pour désigner une plante herbacée qui résiste aux rigueurs de la mauvaise saison, qu'il s'agisse du gel de l'hiver ou de la sécheresse des étés caniculaires. Le terme « pérenne » ou « pérennant(e) » est plus souvent employé par les botanistes, pour désigner une plante vivant assez longtemps.

INTRODUCTION

Ce mémoire de fin d'études a été élaboré dans le cadre de l'étude Universitaire à l'Athénée Saint Joseph Antsirabe (ASJA), en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur agronome, en collaboration avec des organismes tels que le CIRAD (Centre de Coopération Internationale en recherche Agronomique pour le Développement) et le FOFIFA (Foibe Fikarohana ho an'ny Fampandrosoana ny tontolo Ambanivohitra).

L'économie malgache est essentiellement agricole : l'agriculture occupe 78 % de la population active. A Madagascar, le relief montagneux et l'érosion dramatique des sols réduisent les surfaces cultivables à 5,1 % de la superficie totale. L'essentiel de la production est destiné à la consommation intérieure et l'autosuffisance alimentaire est à peine atteinte. La forte extension démographique à Madagascar invite à réfléchir à des solutions à long terme.

Le maïs, qui avec le blé et le riz est l'une des principales cultures céréalières du monde, se place en second rang à Madagascar, après le riz. C'est une céréale d'assez grande taille, très largement cultivée pour son grain en alimentation humaine et animale. Pays d'élevage, Madagascar possédait déjà en 2005 un cheptel d'une dizaine de millions de bovins qui restent dans le circuit national. Et malgré cela, le besoin interne en lait n'est pas encore satisfait.

Heureusement, l'agriculture et l'élevage sont deux filières complémentaires. L'exploitation de la synergie entre les deux est une composante incontournable du développement durable. Ainsi, dans le cadre des systèmes en semis direct avec couverture végétale, des programmes et actions ont été lancés par ces organismes collaborateurs pour promouvoir simultanément les productions de maïs et du lait. En associant la maïsiculture à des couvertures vives fourragères, les activités ont été réalisées sur les dispositifs expérimentaux de l'URP/SCRiD à Andranomanelatra.

Notre étude prend place dans le domaine de ces recherches et s'intitule : **Mise au point des systèmes de culture durable à base de maïs productif intégrant les fourrages : Cas de la région du Vakinankaratra.**

Notre plan de rédaction est constitué de trois grandes parties : première partie, contexte et généralité ; deuxième partie, présentation de la zone d'étude, des matériels et méthodes utilisés ; et troisième partie, analyse et discussions des résultats.

PREMIERE PARTIE : CONTEXTE ET GENERALITE

Chapitre premier : Présentation de la région du Vakinankaratra

1-1 Localisation géographique

Le Vakinankaratra est l'une des vingt-deux régions de Madagascar, il se situe au centre de l'île. Géographiquement cette région est bordée à l'Ouest par celle du Menabe ; au Nord par Bongolava, Itasy et Analamanga ; à l'Est par Alaotra Mangoro et Antsinanana ; et au Sud par le large Amoron'i Mania.

Sa position est limitée par les coordonnées géographiques suivantes :

- entre 18°59' et 20°03' de latitude Sud ;
- entre 46°17' et 47°19' de longitude Est.

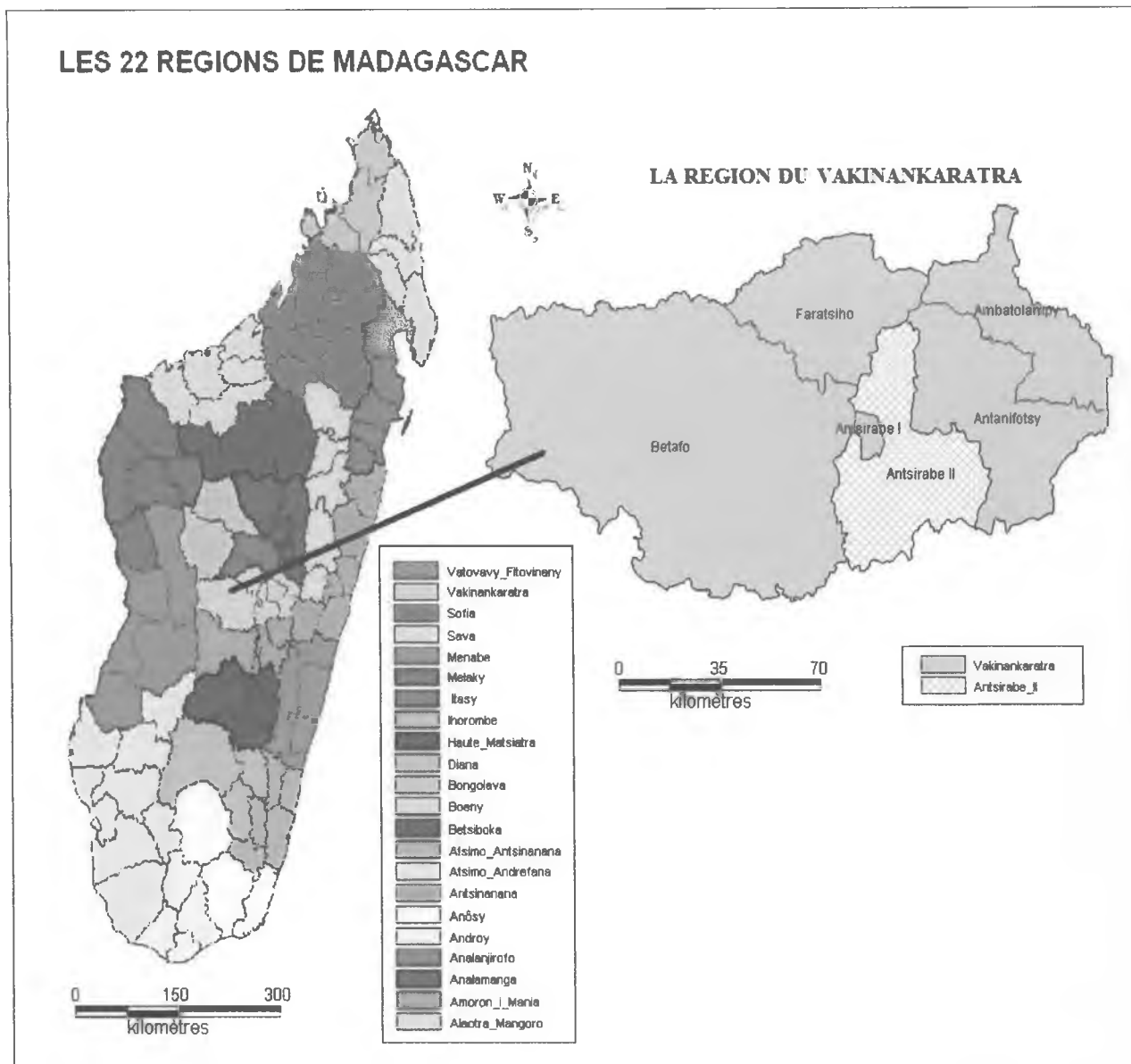
La région du Vakinankaratra est composée de sept districts et quatre-vingt six communes. Le tableau suivant montre les différentes communes constituant la distribution administrative de la région.

Tableau 1 : Districts et communes de la région

Districts	Communes
Ambatolampy	Ambatolampy · Ambatondrakalavao · Ambodifarihy · Fenomanana · Ambohipihaonana · Andranovelona · Andravola Vohipeno · Andriambilany · Antakasina · Antanamalaza · Antanimasaka · Antsampandrano · Behenjy · Belambo · Manjakatombo · Morarano · Sabotsy Namatoana · Tsiafajavona Ankaratra · Tsinjoarivo
Antanifotsy	Ambatolahy · Ambatomiady · Ambatotsipihina · Ambodiriana · Ambohimandroso · Ambohitompoina · Ampitatafika · Andranofito · Antanifotsy · Antsahalava · Antsampandrano
Antsirabe I	Antsirabe
Antsirabe II	Alakamisy · Ambano · Ambatomena · Ambohibary · Ambohidranandriana · Ambohimiarivo · Ambohitsimanova · Andranomanelatra · Antanambao · Antanimandry · Antsoatany · Belazao · Ibity · Manandoana · Mandrosohasina · Mangatano · Sahanivotry Mandona · Soanindrariny · Tsarahonenana · Sahanivotry · Vinaninkarena
Betafo	Alakamisy Antivato · Alarobia Bemaha · Ambatonikonilahy · Ambohimambola · Ambohimasina · Andrembesoa · Anjoma Ramartina · Antsofo · Betafo · Fidirana · Inanantona · Mahaiza · Mandritsara · Soavina · Tritriva · Vasiana
Mandoto	Mandoto · Ankazomiriotra
Faratsiho	Ambohiborona · Andranomiady · Antsapanimahazo · Faratsiho · Miandrarivo · Romainandro · Valabetokana · Vinaninony-Atsimo · Vinaninony Nord

Source : Tatiana RAKOTONJATOVO ; Juillet 2005

La carte suivante illustre les 22 régions de Madagascar, celle du Vakinankaratra étant mise en exergue pour une meilleure localisation.



Carte 1 : La région du Vakinankaratra

Source : BD 500, MapInfo

C'est la partie méridionale de l'Imerina. Sa capitale est Antsirabe. La population locale est estimée en 2005 à environ 1 982 800 habitants, sur une superficie de 19 205 km² [Tatiana RAKOTONJATOVO ; Juillet 2005].

Sa géographie spécifique est constituée de Hauts Plateaux, de collines plus ou moins escarpées et de massifs volcaniques [<http://fr.wikipedia.org/wiki/Vakinankaratra>].

1-2 Condition physique de la région

La région du Vakinankaratra a des spécificités physiques très remarquables, adéquates pour bon nombre de cultures. Elle bénéficie d'un régime climatique tropical d'altitude, supérieure à 900 mètres.

1-2-1 Géologie

La géologie de la région du Vakinankaratra, est généralement constituée de volcanisme néogène à quaternaire de l'Ankaratra et de série de schisto - quartzo - calcaire du Sud. Ces caractères donnent les formations suivantes :

- les massifs quartziques qui sont les roches sédimentaires (sables) ayant subi une métamorphisation ;
- les massifs granitiques, généralement dispersés sur la bordure occidentale du massif volcanique de l'Ankaratra dans l'Ouest et dans le Sud, le relief repose sur du socle à sol ferrallitique.
- les cuvettes, en particulier lacustres, sont dues à des activités volcaniques : des coulées de lave ayant obturé des vallées et engendrant ainsi les lacs. Certaines cuvettes étaient autrefois reliées entre elles.

Ces zones d'alluvions lacustres, généralement fertiles, jouent un rôle important dans l'occupation humaine.

1-2-2 Climat

L'année comporte deux saisons bien individualisées :

- ✓ une saison pluvieuse et moyennement chaude, d'Octobre en Avril ;
- ✓ une saison sèche et relativement froide de Mai à Septembre.

Le Vakinankaratra est doté de 16 Stations météorologiques, dont trois seulement sont fonctionnelles, celles d'Ambohimandroso, d'Antsirabe I, et de Betafo. Le climat est caractérisé par les températures et les pluviométries présentées dans les tableaux 1 et 2.

a- Température

Elle est caractérisée par une température moyenne annuelle inférieure ou égale à 20°C. Dans les parties élevées de l'Est et du Centre, la moyenne se situe autour de 13 °C, ainsi le

district d'Antanifotsy a une moyenne annuelle de 13,7°C avec des maxima de 25,8 et des minima de 1°C. Par contre, dans le Moyen Ouest, Betafo enregistre une moyenne annuelle de 21°C avec des maxima de 30,8 et des minima de 10,2°C.

Tableau 1 : Température moyenne annuelle

INDICATION STATION	Altitude (m)	Période	Annuelle	TEMPERATURE MOYENNE			
				maxima		minima	
				Mois	T°	Mois	T°
Antanifotsy	1450	51-80	13,7	Février	25,8	Juillet	1
Antsirabe Aéro	1540	61-90	16,7	Février	19,6	Juillet	12,7
Ambohibary	1650	51-80	16,4	Janvier	19,0	Juillet	12,6
Betafo	-	68-70	21	Décembre	30,8	Juillet	10,2
Faratsiho	1750	51-80	17,7	Janvier	20,1	Juillet	14

Source : UPDR MAEP, Monographie 2003

Ces températures n'occasionnent pas trop de risque pour les diverses spéculations agricoles, sauf dans les hautes altitudes où quelques dégâts de gel sont enregistrés une année sur cinq [UPDR MAEP, Monographie 2003].

b- Pluviométrie

A titre indicatif, la moyenne des pluies annuelles dans le Vakinankaratra est de 1505,9 mm en 109 jours. Comme le tableau suivant la montre, la pluviométrie varie d'une station à une autre.

Tableau 2 : Pluviométrie moyenne annuelle

	Antanifotsy	Antsirabe aéro	Ambohibary	Betafo	Faratsiho
ANNUELLE (mm)	1335,8	1330,6	1511,9	1399,1	1952,7
MOIS SECS (nbre)	-	0	0	4	0
OBSERVATION	Mai à Août				

Source : UPDR MAEP, Monographie 2003

En somme, le fait le plus marquant est que, sur la plus grande partie de la région du Vakinankaratra, alternent une saison sèche au cours de laquelle l'irrigation est toujours nécessaire et une saison humide où l'abondance de l'eau entraîne l'inondation durant la période cyclonique. Partout donc, la maîtrise de l'eau est indispensable.

Toutefois, les conditions climatiques sont favorables à l'agriculture; d'autant plus que les variations de microclimat font que la région du Vakinankaratra présente toute une gamme de possibilités en matière agronomique, comme les légumes et fruits des pays tempérés (choux, carottes, pommiers, pruniers et autres) dans les zones d'altitude comme Faratsiho, et Antsirabe [UPDR MAEP, Monographie 2003]. Par ailleurs, ces cultures bénéficient du relief et de l'hydrologie de la région qui leurs sont avantageux (Annexe I).

1-2-3 Végétation et agriculture

Grâce à ses avantages tant climatiques que pédologiques, la région est riche en biodiversité. Mais à cause de l'abondance de la déforestation et de beaucoup d'autres contraintes, le sol commence à se dénuder peu à peu.

a- Végétation

Elle est caractérisée par une faible superficie couverte de forêt primaire. La dégradation est telle qu'il ne reste plus que quelques lambeaux de forêt dans la région. Dans les bas-fonds, on rencontre des marais à joncs et parfois à Viha, quelques vestiges de forêts galeries qui sont en voie de disparition.

b- Agriculture

Globalement, l'ensemble des localités régis par la Direction Régionale de Développement Rural (DRDR) est caractérisé par la prédominance des cultures vivrières, les spéculations telles que la canne à sucre ou le café restent très limitées.

Les cultures existantes, en fonction de leur importance, peuvent être classées par district :

- ✓ un premier type, où les cultures sèches et le riz sont représentés à parts égales, se pratique notamment dans le district d'Antanifotsy et celui d'Antsirabe II.
- ✓ un deuxième type caractérisé par la présence de cultures telles que haricot, pomme de terre et patate se fait généralement à Betafo et à Faratsiho.
- ✓ Les deux types de cultures se réalisent de manière équivalente à Ambatolampy.

L'agriculture, comme dans tout Madagascar, constitue l'activité principale de la région. En effet, les conditions agro-climatiques et humaines permettent une vaste gamme de cultures.

Chapitre II : Les plantes principales

2-1 Le maïs

2-1-1 Importance

L'économie malgache est essentiellement agricole : en 2002, l'agriculture occupe 78% de la population active. L'essentiel de la production est destiné à la consommation intérieure et l'autosuffisance est à peine atteinte. Les principales cultures sont le riz, le manioc, les haricots, le maïs, les patates douces, les pommes de terre et le taro [Microsoft Encarta 2009]. La production mondiale en maïs est très importante (Annexe II).

2-1-1-1 A Madagascar

Le maïs a été introduit à Madagascar par des explorateurs portugais au début du XVIème siècle. Actuellement, après le riz, c'est la deuxième céréale la plus cultivée sur la Grande île. Le tableau suivant, tiré du recensement de l'agriculture de la campagne culturale 2004-2005, nous montre les surfaces cultivées en maïs et son rendement en tonne par hectare selon le type de culture.

Tableau 4 : Superficie et rendement moyen par région à Madagascar

Région	Superficie (ha)	Rendement moyen selon le type de culture	
		Pure (t/ha)	Associée (t/ha)
Analamanga	9 450	1,84	1,49
Vakinankaratra	78 034	1,95	1,59
Itasy	43 748	2,25	2,13
Bongolava	14 779	2,38	2,15
Haute Matsiatra	22 664	2,05	1,86
Amoron'i Mania	17 242	2,43	1,81
Vatovavy Fitovinany	1 930	-	0,24
Ihorombe	4 262	1,25	1,42
Atsimo Atsinanana	490	1,02	1,70
Atsinanana	6 205	1,48	0,56
Analanjirifo	1 578	0,67	0,37
Alaotra Mangoro	6 945	1,77	1,26
Boeni	25 551	1,92	1,75
Sofia	19 205	1,87	1,60
Betsiboka	12 379	1,69	1,52

Melaky	5 835	1,32	1,54+
Atsimo Andrefana	65 466	1,62	-
Androy	20 998	1,13	1,33
Anosy	6 742	1,20	1,03
Menabe	18 277	1,48	1,18
Diana	6 726	2,43	1,07
Sava	2 396	1,47	2,30
			0,46
Madagascar	390 902	1,84	1,43

Source : MAEP, 2008

Le Vakinankaratra possède la plus grande superficie maïsicole, puis Atsimo Andrefana et Itasy. Concernant le rendement, celui-ci varie selon la région et le type de culture adopté. En culture pure et associée, Diana offre les meilleurs rendements, 2,43 t/ha pour la première et 2,30 pour la seconde. Par ailleurs, les variétés recommandées sont mises dans l'annexe II.

2-1-1-2 Dans le Vakinankaratra

Le maïs est cultivé presque partout dans la région. Le calendrier cultural varie suivant le microclimat, et de ce fait, le maïs est mis en place à partir du mois de Juillet jusqu'au mois de Novembre. Le maïs vert ou séché est destiné à la consommation humaine et à l'alimentation des animaux. L'exploitation est généralement de type paysannal et se rencontre sur le tanety, dans les bas de pente et sur baibofo. La culture est souvent associée à d'autres spéculations, les plus courantes sont le haricot et le soja.

Tableau 5 : Evolution des superficies et des productions dans la région

Année	Superficie (ha)				Production (t)			
	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008
Total	42400	43000	42000	46214	50880	51600	50400	44700

Source : DRDR Vakinankaratra

Ce tableau nous montre que la superficie cultivée en maïs dans la région diminue durant la période culturale 2006/2007, il en est de même pour la production des deux dernières années.

2-1-2 Présentation de la plante

2-1-2-1 Systématique

Règne : PLANTAE

Sous-règne : TRACHEOBIONTA

Division : MAGNOLIOPHYTA

Classe : LILIOPSIDA

Sous-classe : COMMELINIDAE

Ordre : CYPERALES

Famille : Poaceae

Sous-famille : Panicoideae

Tribu : Maydeae

Genre : Zea

Espèce : *Zea mays*

Sous-espèce : *Zea mays* subsp. *Mays*



Photo 1 : Maïs

Source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Ma%C3%AFs>

Son nom vernaculaire le plus commun est maïs. Ce terme vient de l'espagnol maíz, emprunté lui-même à la langue des Taïnos de Haïti qui le cultivaient. De nombreux autres noms vernaculaires ont été appliqués à cette céréale, notamment blé indien, blé de Turquie et blé de Barbarie. Désuets pour la plupart, ces noms témoignent de la confusion qui a longtemps régné en Europe sur l'origine de la plante.

2-1-2-2 Historique et variétés

Le maïs est originaire d'Amérique centrale et du Sud, et constituait l'aliment de base des peuples de ces régions pendant de nombreux siècles avant l'arrivée des Européens. Introduit en Europe au XVIème siècle, il est aujourd'hui cultivé mondialement et est devenu la première céréale mondiale devant le riz et le blé. Cette spéculation a commencé à arriver en Afrique au cours du même siècle [<http://fr.wikipedia.org/wiki/Ma%C3%AFs>].

Les nombreuses variétés cultivées de maïs présentent des caractéristiques très diverses. Certaines mûrissent en quatre mois, d'autres demandent jusqu'à onze mois pour arriver à maturation. Six grands groupes de variétés sont différenciés par les caractéristiques du grain :

- Le maïs denté

- Le maïs à grains cornés (*indurata*) ;
- Le maïs à éclater (*pop-corn*) ;
- Le maïs farineux (*amylacea*) ;
- Le maïs doux ou maïs sucré (*saccharata*) ;
- Le maïs décoratif ou maïs indien.

Ainsi, sa valorisation tant en alimentation humaine qu'en alimentation animale est très diverse (Annexe II).

2-1-2-3 Caractéristiques générales de la plante

C'est une plante à très grand développement végétatif. Elle est capable de produire de la biomasse en très peu de temps. Ses limbes foliaires sont très développés. Contrairement aux autres graminées, le pied de maïs ne talle pas. Suivant les variétés, le maïs peut être sensible ou non à la verse, à la rouille, et à la sécheresse. La couleur du grain varie selon la variété. La texture de son amidon peut être farineuse ou vitreuse.

Comme tous les êtres vivants, le maïs a aussi ses maladies et ennemis. Les maladies les plus fréquentes sont la fusariose, le charbon, la rouille et enfin la mosaïque. Comme ennemis, il y a les parasites tels que pyrales et hétéronychus. Outre ceux là, d'autres ennemis tels que Borer, rats et mauvaises herbes peuvent détruire sa culture.

Au niveau du climat, la plante dispose de ses propres exigences :

❖ **Température** : Le maïs est une culture d'été, spécificité qui le distingue nettement des autres céréales qui se sèment pour la plupart à l'automne ou au printemps. Elle exige des températures assez élevées à la germination, qui est impossible en dessous de 10°C. Au cours de sa végétation, elle a besoin d'une température optimum de 19°C.

❖ **Eau** : Sa culture exige de l'eau bien répartie tout au long de son cycle. En effet, son rendement dépend fortement de la satisfaction de ses besoins en eau, en particulier dans les deux semaines précédant et suivant la floraison. Aussi, la quantité d'eau nécessaire varie avec la durée du cycle cultural [Guy Rouanet, 1984].

❖ **Sols** : C'est une culture qui préfère les sols profonds et riches mais qui peut s'accommoder de conditions plus difficiles, comme des sols sableux ou plus argileux, voire calcaires, sous réserve de lui assurer les apports d'eau et d'éléments nutritifs nécessaires.

Plus d'information, en particulier sur sa culture, se trouve dans l'annexe II.

2-1-3 Botanique et biologie

2-1-3-1 Description des organes de la plante

a- Organes végétatifs

Tiges : Le maïs est une plante annuelle à tige unique érigée et pleine à la différence des tiges creuses de la plupart des autres graminées. Sa hauteur est très variable, certaines variétés n'atteignent que 60 cm de haut à maturité tandis que d'autres peuvent dépasser 6 m. Au niveau de chaque nœud est insérée une feuille.

Feuilles : Les feuilles alternes sont typiques des graminées mais de grande taille. Elles sont formées d'une gaine enserrant la tige et d'un limbe allongé en forme de ruban à nervures parallèles. À la base du limbe se trouve la ligule qui a quelques millimètres de haut.

Racines : Des racines adventives naissent sur les nœuds situés à la base de la tige, formant ainsi des couronnes successives, tant sur les nœuds enterrés que sur les premiers nœuds aériens. Ces racines forment un système fasciculé classé superficiel, pouvant atteindre environ 50 cm de profondeur.

b- Organes de reproduction

Le maïs est une plante monoïque : les fleurs mâles et femelles sont portées par la même plante mais placées à des endroits différents pour chaque individu.

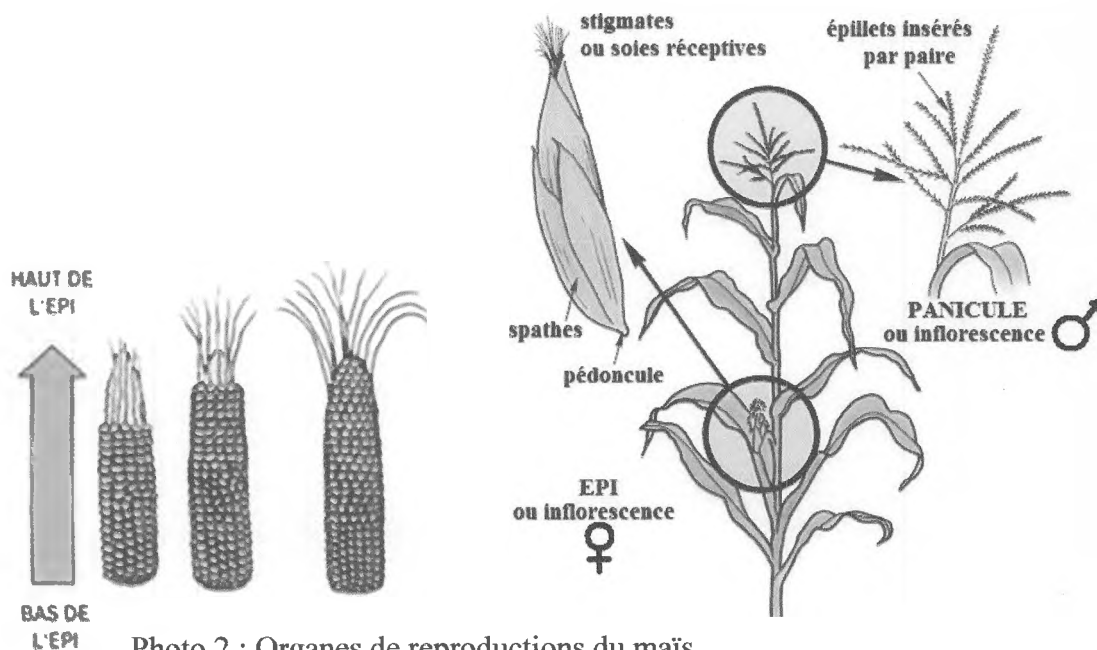


Photo 2 : Organes de reproductions du maïs

Source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Ma%C3%AFs>

La tige principale se termine en inflorescence staminée ou aigrette. L'aigrette ou la panicule est constituée de nombreuses petites fleurs appelées épillets portant chacune trois petites anthères qui produisent les grains de pollen ou gamètes mâles.

L'inflorescence femelle se développe latéralement à partir d'un bourgeon axillaire, inséré à la base d'une feuille située au milieu de la plante. Cette inflorescence pistillée ou épi est une structure unique pouvant comporter jusqu'à 1 000 grains sur les 12 à 20 rangées d'ovules portés par un axe résistant appelé rafle. L'épi est enveloppé dans des couches de feuilles modifiées qui forment ce que l'on appelle les spathes. Les fibres soyeuses qui sortent de l'extrémité de l'épi sont les styles allongés attachés aux différents ovaires. Le pollen émis est porté par le vent jusqu'aux styles soyeux des fleurs femelles, où il germe et descend dans le style jusqu'à l'ovule. Chaque ovule fécondé se développe en un grain de maïs, l'épi se remplit du bas vers le haut.

Le grain de maïs est en fait un caryopse, formé de trois parties d'origines différentes :

- ❖ l'embryon, couramment appelé « germe » ;
- ❖ l'albumen, tissu de réserve, essentiellement composé de grains d'amidon ;
- ❖ l'enveloppe extérieure, fine membrane translucide et fibreuse.

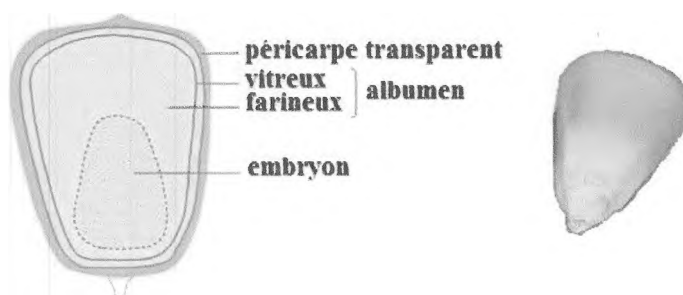


Photo 3 : Grain de maïs

Source : ARVALIS- Institut du Végétal

100 g de maïs apporte 10,3 g d'eau et 362 kcal, les matières se trouvent dans ce tableau :

Tableau 6 : Valeur nutritionnelle moyenne pour 100 g

Protides/Glucides/Lipides	Vitamines	Sels minéraux	Acides gras
Protides : 8,1 g Glucides : 76,9 g Lipides : 3,6 g	Vitamine A : 0,16 mg Vitamine B1 : 0,385 mg Vitamine B2 : 0,201 mg Vitamine B3 : 3,632 mg Vitamine B6 : 0,304 mg Vitamine K : 287 mg	Calcium : 6 mg Fer : 3,5 mg Potassium : 287 mg Magnésium : 127 mg Sodium : 35 mg Phosphore : 241 mg	Acides aminés Divers

Source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Ma%C3%AFs>

2-1-3-2 Cycle et Phases végétatives

Le cycle de développement du maïs est très court, 126 à 238 jours, grâce à un système de photosynthèse spécifique qui lui permet de valoriser la lumière et la chaleur. A chacune des phases de développement correspond la formation d'un ou de plusieurs organes essentiels de la plante. Trois phases bien différenciées sont à souligner (photo 4):

- ❖ phase végétative
- ❖ phase de reproduction
- ❖ phase de maturité

a- La phase végétative correspond à

la formation de l'ensemble de la tige et des feuilles. La durée de cette phase dépend de la précocité de la plante et des conditions climatiques. Cette phase comprend trois stades bien distincts : germination, levée et croissance. Le stade germinatif représente le moment où le grain passe de son état de repos à l'état actif, et est compris entre la mise en terre et la levée. La levée est caractérisée par la sortie du coléoptile au-dessus du sol. En même temps, des racines et radicules sont déjà formées. La croissance est le développement du coléoptile en tige et feuille. Elle prend fin quand la plante a atteint son optimum végétatif, à la formation de l'organe femelle.

b- La phase de reproduction correspond à la formation et au développement des organes reproducteurs. L'épi commence à se développer un mois avant la floraison, c'est la montaison. Le nombre de rangs de grains portés par l'épi est déjà déterminé à cette date. La panicule se développe dès la fin de la phase végétative. La formation du pollen débute 2 à 3 semaines avant la floraison. Cette phase demande beaucoup plus d'eau. Elle se

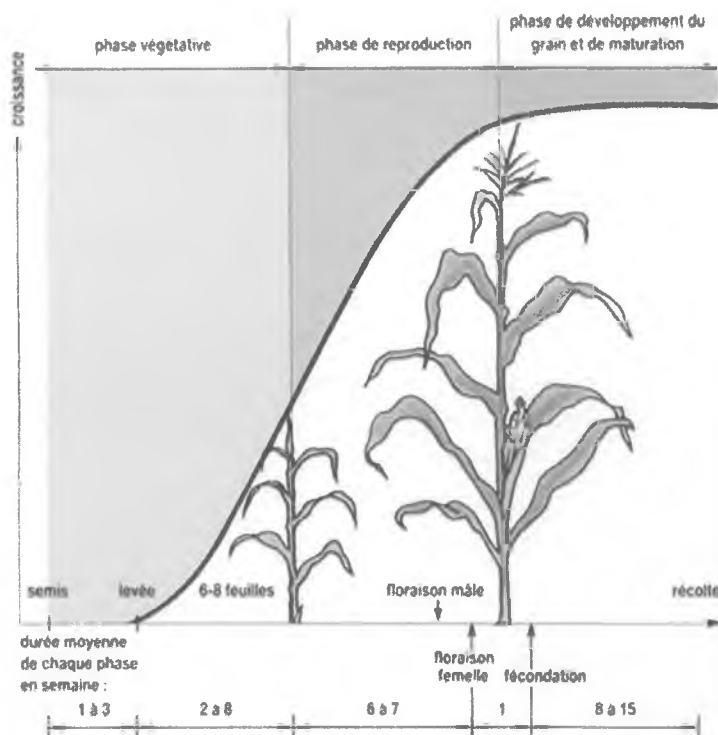


Photo 4 : Cycles végétatifs

Source : ARVALIS- Institut du Végétal

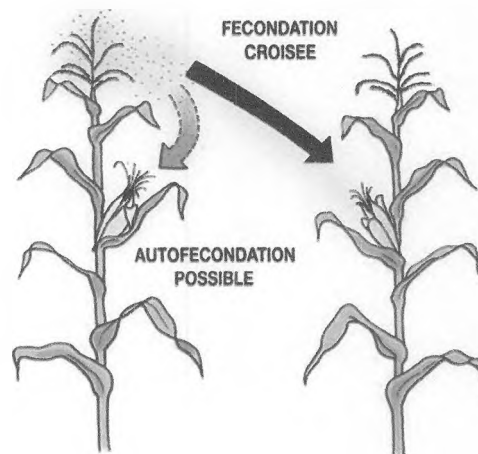


Photo 5 : Pollinisation

Source : ARVALIS- Institut du Végétal

subdivise en deux stades : floraison et fécondation. Le stade de floraison est représenté par la formation des organes reproducteurs dont généralement le mâle en premier lieu et leur épanouissement. Celui de fécondation commence, quand les deux types d'inflorescence sont bien formés, par la pollinisation. Elle peut être simple ou croisée. La fécondation se produit quand les grains de pollens captés par les soies arrivent sur les rangs d'ovules de l'inflorescence femelle, les deux gamètes s'unissent pour former le grain de maïs.

c- Phase de maturité : Au cours de son évolution vers la maturité, le maïs passe par plusieurs stades qu'il convient de connaître :

- ✓ Stade laiteux : le grain a atteint sa taille définitive mais le contenu est en partie liquide ;
- ✓ Stades pâteux : contenu plus épais, mais le grain s'écrase encore facilement entre les doigts
- ✓ Stade pâteux dur : le grain se durcit, mais il peut encore être rayé à l'ongle ;
- ✓ Stade vitreux : le grain ne se raye plus à l'ongle, les spathes se dessèchent ;
- ✓ Maturité complète : humidité du grain inférieure à 35%, et la plante se dessèche.

2-2- Les plantes fourragères

Les plantes fourragères sont des plantes destinées à nourrir les animaux. Par définition, une culture fourragère est une culture de plantes pour leurs parties végétatives (feuilles, tiges, racines), à l'exclusion des fruits et des graines, que l'on utilise soit à l'état frais, soit conservées généralement par séchage ou par ensilage. Ces herbes ou ces plantes servent à nourrir les animaux en saison des pluies et en saison sèche. Il existe de nombreuses plantes fourragères, la majorité faisant partie de deux grands groupes, les graminées et les légumineuses. De plus les cultures fourragères peuvent entrer dans la rotation comme les autres cultures [Cours d'apprentissage agricole, 1982].

2-2-1 Importance des cultures fourragères

A Madagascar, la production laitière est surtout développée sur les Hautes Terres de Madagascar, à des altitudes comprises entre 1000 à 2000m qui bénéficient d'un climat tropical d'altitude, spécialement dans le triangle laitier : entre Fianarantsoa, Antananarivo et Tsiroanomandidy. Elle représente une source de revenus importante pour les paysans. Plusieurs races bovines, dont la plus représentée est la Pie Rouge norvégienne, sont exploitées en pâturage libre : zébu malgache, bétail Rana, races améliorées et races pures. Par conséquent, la région du Vakinankaratra doit sûrement pratiquer des cultures fourragères. De plus, elle bénéficie de l'activité et de l'appui du centre technique FIFAMANOR, qui réalise entre autres des recherches dans le but de promouvoir la filière élevage bovin.

Par ailleurs, les contraintes de cette filière et quelques tableaux de recensement dans le Vakinankaratra sont présentés dans l'annexe IV.

2-2-1-1 But de la culture

La culture de plante fourragère est une des clés de la réussite dans la filière lait, les fourrages représentent une part importante dans la ration des bovins laitiers.

2-2-1-2 Ampleur de la culture fourragère

Ces cultures sont répandues dans toutes les régions des Hautes Terres de Madagascar, y compris celle du Vakinankaratra. Le tableau qui suit illustre l'évolution des surfaces fourragères de la région. Année après année, elles ont rapidement diminué au cours des trois dernières.

Tableau 7 : Surfaces fourragères cultivées

Année	2006	2007	2008
Surface (ha)			
Surface fourragère existante	4 450	3 814	3 670
Surface existante pour la production de semences fourragères	216	172	138
Surface utilisée pour la production de souches fourragères	71	78	40

Source : FIFAMANOR (rapport d'activité 2008)

Ces superficies regroupent toutes les cultures fourragères existantes, tant en saison pluviale qu'en contre saison. Malheureusement, les surfaces accordées en contre saison sont moindres alors que c'est en saison sèche que surviennent les manques d'alimentations les plus frappants.

L'utilisation des plantes de couverture du SCV comme fourrages est une des solutions possibles pour permettre l'amélioration de la filière lait. Pour une meilleure intégration de l'élevage dans l'agriculture, l'association de ces plantes avec des cultures vivrières s'avère indispensable. Le système doit, dans ce cas, être durable en réalisant de pratiques culturales adaptées. C'est la raison pour laquelle il est essentiel d'étudier les systèmes de culture pour la production fourragère en SCV dont nous parlerons dans le chapitre suivant.

2-2-2 Quelques plantes de couverture

Les plantes de couverture sont des plantes destinées à couvrir le sol en permanence, ces couverts peuvent être vifs ou morts. Elles sont communément utilisées en SCV. Heureusement pour l'élevage laitier, la plupart de ces plantes sont aussi d'excellents fourrages, offrant la possibilité d'une meilleure intégration et de rapide promotion, spécialement dans l'alimentation des vaches laitières. Leur exploitation ne se limite pas uniquement en tant que couvert végétal mais s'élargit dans le domaine de l'élevage.

❖ Celles avec des potentialités fourragères

Tableau 8 : Caractéristiques de quelques plantes fourragères

Espèces	Description des Plantes	Qualité du fourrage	Rôles particuliers
Avoine (<i>Avena sativa</i>)	C'est une graminée tempérée annuelle à système racinaire bien développé et à tiges dressées. Ses feuilles en forme de ruban engainent autour de la tige.	Elle est utilisée pour l'affouragement en vert ou la production de foin. La production varie de 30 à 80 kg/are de matière sèche suivant le nombre de coupes.	Cette plante est très appréciée en SCV car son paillage contrôle efficacement les adventices.
Eleusine (<i>Eleusine corocana</i>)	C'est une graminée annuelle de 40 cm à 1 m de haut. L'inflorescence est une grappe de 4 à 6 épis denses et longs.	C'est une plante qui donne un excellent fourrage. Cette plante pousse en touffes denses, donne de grandes quantités de biomasse.	Elle est la seule graminée qui fixe l'azote de l'air. Elle a des caractères insectifuge et insecticide.
<i>Brachiaria Ruziziensis</i>	C'est une graminée assez haute, les feuilles poilues sont courtes et très pointues qui possèdent des nervures parallèles.	Elle est utilisée en vert ou ensilée, mais rarement en foin. En général, la qualité de ce fourrage est moyenne. Le rendement moyen en matière sèche à partir de la deuxième année est de 150 à 250 kg/are.	Grâce à ses systèmes racinaires fasciculés et puissants, elle améliore et stabilise la structure du sol.
<i>Stylosanthes guyanensis</i>	C'est une légumineuse droite avec des tiges longues et ramifiées. Le <i>stylosanthes</i> pousse même sur des sols acides, pauvres et compactés.	C'est un fourrage excellent riche en protéine qui reste vert et pousse pendant la saison froide et sèche. Le rendement moyen est de l'ordre de 100 kg/are en matière sèche.	Elle améliore la structure du sol. De plus la plante permet la fixation d'azote atmosphérique. Elle est utilisée pour l'association avec des cultures.
<i>Cajanus cajan</i>	Légumineuse au port érigé, c'est un sous-arbrisseau vivace, pouvant atteindre une hauteur d'environ 3 m à l'âge adulte 20 ans.	C'est un bon fourrage. Elle a la capacité de puiser dans la réserve d'eau profonde du sol, ainsi prolonger la production de biomasse en saison sèche.	Elle facilite la décompaction du sol et permet la fixation d'azote. Cette plante est bien adaptée aux sécheresses estivales.

Lupin (<i>Lupinus sp.</i>)	C'est une espèce de légumineuse annuelle ou vivace, herbacée ou ligneuse. Les feuilles sont longuement pétiolées. L'inflorescence est en forme de grappes terminales dressées, donnant ensuite des gousses.	C'est une excellente vocation fourragère car il est riche en minéraux (phosphore, calcium) et en acides aminés. Sa teneur importante en matières grasses (8 %) lui confère une valeur énergétique élevée.	Il permet la fixation d'azote et améliore la structure du sol.
Vesce (<i>Vicia sativa</i>)	C'est une légumineuse herbacée. Ses feuilles pennées portent de nombreuses folioles, la tige est souvent terminée par une vrille qui lui permet de grimper en s'accrochant aux plantes voisines.	Elle a de bonnes qualités fourragères. Elle permet la production de biomasse en saison froide. Le rendement en matière sèche produite varie de 40 à 60 kg/are.	Les racines porteuses de nodosités permettent une fixation de l'azote. C'est ce qui conduit à l'amélioration de la structure du sol.
Trèfle (<i>Trifolium sp</i>)	Légumineuses, c'est une herbacée pérenne dont les tiges sont des stolons ramifiés rampant sur le sol. Ses feuilles sont pétiolées à trois folioles. Il forme rapidement un tapis couvrant le sol.	Le trèfle très riche en azote est utilisé en fourrage vert dans l'alimentation bovine, mais il faut le limiter à 1/3 de la ration. Le rendement moyen en matière sèche est de 50 à 80 kg/are.	Les deux espèces existantes s'adaptent bien sur toutes les Hautes Terres. Il fixe l'azote atmosphérique au profit des graminées associées.
Radis fourrager (<i>Raphanus sativus</i>)	Crucifères, le radis est une plante tempérée, annuelle à port dressé et à racine tubérisée. C'est une plante à très grande vitesse de croissance. Il est très facile à cultiver.	Sa qualité fourragère est bonne. La production de plante entière varie de 80 à 120 kg/are de matière sèche. De plus, le radis continue à produire de la biomasse en saison sèche.	Les tubercules de radis ont des effets répulsifs contre les insectes, et jouent le rôle d'insecticide. La plante participe au recyclage d'éléments nutritifs.

Source : FIFAMANOR et al, 2008 ; <http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89leusine> ; <http://photosynthese.fr/plantes/plante-6113-cajanus-cajan.htm>

❖ Plantes de couverture uniquement

Il en existe beaucoup, la crotalaire ou *Crotalaria mitchellii* est la seule dont nous allons parler. C'est une légumineuse de 1 à 2 m de haut. Elle a des feuilles alternes, composées, digitées à stipules. Les gousses bivalves constituent les fruits, portant ses graines. La plante procure beaucoup d'ombrage au sol. Son système racinaire pivotant peut décompacter le sol facilement, elle travaille bien le sol. C'est à la fois une excellente plante de couverture et un bon précédent cultural.

Chapitre III : Evaluation de l'élaboration des composantes du rendement et des biomasses produites

3-1 Les systèmes de cultures et gestion du sol

3-1-1 Travail du sol

3-1-1-1 Labour

Le terme vient de « labourer », du latin, laborare qui signifie travailler. Le labour est un mode de préparation du sol, c'est le plus pratiqué dans les milieux paysans.

Selon le type de plante cultivée et les périodes de culture, le labour peut être léger (10 à 15 cm), moyen (15 à 30 cm), profond (30 à 40 cm), ou très profond (au delà de 40 cm).

C'est une façon culturale qui a pour rôle d'améliorer la structure superficielle du sol, par retournement des bandes de sol, et dont l'objectif général est de travailler le sol et de créer une structure nouvelle pour permettre une bonne germination, un développement racinaire important et une bonne alimentation de la plante [Rajaonera, 2005].

3-1-1-2 Le Système de culture en semis direct avec couverture végétale ou SCV

L'appellation SCV a été lancée en 1999 par le CIRAD ou Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement.

a- Fonctionnement

Le SCV s'inspire directement du fonctionnement d'un écosystème forestier naturellement stable, durable et basé sur une forte activité biologique. Au travail mécanique se substitue un travail biologique assurant la structuration du sol, le recyclage des éléments minéraux et une meilleure gestion de l'eau. Ces systèmes se rapprochent d'une forêt car ils permettent la production d'une litière et fonctionnent en circuit fermé, sans perte de matière (éléments chimiques et terre) en profondeur ou en surface avec un recyclage permanent entre matières végétales mortes et vivantes (AFD, novembre 2006).

b- Principes

Il repose sur trois grands principes [<http://www.rfi.fr/sciencefr/articles/099/article.asp>]:

- ✓ le premier est la suppression du travail du sol ;

- ✓ le second fait référence à une couverture végétale permanente, appelé officiellement mulch, constituée de résidus de récolte, de plantes de couverture, ou de mauvaises herbes naturelles ;
- ✓ le troisième concerne le semis direct des cultures sous le couvert végétal à l'aide d'un bâton, d'une pioche ou d'une angady.

Les deux types de SCV les plus fréquents sont les systèmes sur résidus ou sur couverture végétale morte et ceux sur couverture végétale vivante (Annexe V).

Ces deux modes de gestion du sol ont chacun ses avantages et ses inconvénients (Annexe V).

3-1-2 Notion sur quelques types de systèmes de cultures

3-1-2-1 En association

L'association peut être définie comme la croissance simultanée de deux ou plusieurs espèces sur la même surface de sol. Les cultures ne sont pas forcément semées exactement au même moment et leurs périodes de récolte peuvent différer notablement, mais sont généralement simultanées pendant une partie significative de leur croissance et de leur développement. Leur cycle se chevauche à un moment donné. On appellera culture composante chacune des cultures participant à une association. Le rendement de l'association est le rendement de cette culture cultivée dans l'association considérée, et exprimée par rapport à la surface totale de la culture associée. La simple addition des rendements de ces cultures donne le rendement combiné de l'association [C.BALDY, C.J.STIGTER, 1993].

Des interactions entre les composantes surviennent toujours en association de cultures. Cela peut être des compétitions ou des complémentarités pour les facteurs de croissance, notamment la lumière et le sol.

La compétition pour la lumière intervient dans tous les peuplements végétaux lorsque l'une des composantes de l'association se situe plus haut qu'une autre, elle interceptera la plus grande part de lumière. Une domination pour la lumière se traduit pour la plante par un faible développement racinaire qui entraîne une perte de compétitivité pour les facteurs du sol, portée le plus souvent sur l'azote et l'eau.

Une complémentarité pour la lumière existe entre les composants de l'association quand ils occupent différentes strates, ce type d'interaction se constate surtout dans les forêts.

Aussi, dans les associations de légumineuses et graminées, la légumineuse satisfait généralement l'essentiel de ses besoins en azote par ses possibilités de fixation symbiotique au niveau de ses nodosités. Les graminées peuvent en bénéficier. Généralement l'effet est moindre, mais correspond cependant à une économie de fertilisants azotés [République Française, Ministère des relations extérieures et al, 1982].

Souvent, le terme « culture pure » se réfère à chacune des composantes d'une association, cultivée seule ; sans autre indication, en considérant que cette culture est réalisée dans des conditions optimales [C.BALDY, C.J.STIGTER, 1993].

3-1-2-2 En rotation

La rotation culturale est une technique culturale en agriculture. Elle est pratiquée lorsque dans un système de culture, des cultures se suivent dans un certain ordre sur la même parcelle, la même succession de cultures se reproduisant dans le temps en cycles réguliers. Faire alterner des familles différentes, telles que céréales, légumineuses, oléagineux ou d'autres encore est le plus recommandé. Car, cette méthode permet de rompre le cycle vital des organismes nuisibles aux cultures, ravageurs, maladies, mauvaises herbes, etc. Grâce aux systèmes racinaires différents, le profil du sol est mieux exploré, ce qui se traduit par une amélioration des caractéristiques physiques du sol et donc de la nutrition des plantes.

L'emploi de légumineuses dans la rotation est d'un grand intérêt du fait de l'ajout d'azote symbiotique dans le sol. De toute façon, la composition des différents résidus de cultures participe à augmenter la quantité et la qualité de la matière organique du sol [http://fr.wikipedia.org/wiki/Rotation_culturale].

3-1-2-1 En dérobée

Une culture est dite en dérobée quand elle est une des composantes d'une association et que sa date de mise en place est décalée par rapport à celle de l'autre composante. De ce fait, elle peut être la succession d'une autre culture à très court cycle végétatif durant une même campagne agricole. Cette technique est née en quelque sorte de la combinaison des actions de l'association et de rotation culturales. L'inconvénient, c'est que la culture en dérobée ne pourrait pas profiter de certains avantages du résidu de son précédent cultural si la vitesse de dégradation de ce dernier est faible.

3-1-3 Fertilisation

La fertilisation est le processus consistant à apporter à un milieu de culture, notamment le sol, des éléments minéraux nécessaires au développement de la plante. Ces éléments peuvent être apportés sous forme brute, représentée par les fertilisants organiques, ou minérale, ce sont les intrants minéraux.

Les objectifs finaux de la fertilisation sont d'obtenir le meilleur rendement possible compte tenu des autres facteurs qui y concourent : qualité du sol, climat, apports en eau, potentiel génétique des cultures, moyens d'exploitation ; ainsi que la meilleure qualité, et ce, au moindre coût.

a- Fumure minérale

Les engrais chimiques sont faits d'éléments minéraux directement assimilables par les plantes. Ils ont de nombreux avantages pour l'agriculteur, comme la possibilité de modification de la composition selon le sol cultivé et les besoins spécifiques des plantes cultivées. Leur épandage peut se faire en grandes quantités, tout en respectant la loi de supplément de rendement moins que proportionnel. Les surplus sont facilement lessivés vers les cours d'eau environnants plutôt que de profiter à la croissance des plantes. Ils sont faciles à manipuler et à entreposer, et peuvent donc être apportés au moment opportun de la culture. Mais, à long terme, ils peuvent être dommageables parce qu'ils ne reconstituent pas l'humus des sols. Ils sont donc peu favorables à la vie des organismes vivants du sol.

b- Fumure organique

Les fumures organiques, ce sont les déchets végétaux et/ou animaux qui sont réintégrés dans le sol. Ce mode de fertilisation est très bénéfique pour la qualité des sols, il favorise la vie des organismes du sol : les fumures organiques servent de nourriture aux organismes animaux du sol. Ainsi les chaînes alimentaires complexes dans le sol sont maintenues. Les propriétés physiques du sol sont entretenues, en effet un bon sol doit contenir de l'humus. L'humus permet au sol de demeurer friable, aéré, de retenir efficacement l'eau entre les pluies et donc de retenir aussi les engrais [Dominique SOLTNER, 2005]. Par ailleurs, la décomposition progressive de la matière organique fournit des éléments nutritifs aux plantes dans le temps et dans l'espace (Annexe VI).

L'amendement en matière organique est aussi indispensable. La teneur en matière organique du sol est une des clés de la culture du maïs par ses mécanismes libérateurs d'azote minéral [Guy Rouanet, 1984].

c- Fumure mixte

C'est l'incorporation dans le sol à la fois d'engrais minéraux et organiques. La fertilisation mixte ne peut être que favorable à la culture car elle regroupe les avantages de chacune des deux. Par ailleurs, l'azote contenu dans l'apport minéral initie et favorise la dégradation de la matière organique [Dominique SOLTNER, 2005]. En plus, comme il est déjà écrit ci-dessus, l'humus participe activement à la rétention des éléments minéraux.

3-2 Elaboration des composantes de rendements

3-2-1 Généralité

L'élaboration du rendement implique l'enchaînement de multiples mécanismes liés à la croissance et au développement des peuplements végétaux cultivés à travers la morphogénèse et le fonctionnement des organes des plantes qui les constituent, en relation avec les facteurs et conditions du milieu.

Pour raisonner les interventions, le rendement se décompose en composantes principales. Pour une espèce donnée, chacune de ces dernières dépend de l'état antérieur du peuplement et des contraintes du milieu qui agissent lors de sa formation. Chaque composante est plus particulièrement influencée par certains facteurs et conditions de production. Sa valeur peut donc servir d'indicateur des conditions du milieu durant sa formation. Connaissant les conditions souhaitées, il est possible de déterminer les interventions à opérer pour les optimiser [Michel VILAIN, 1997].

Par ailleurs, les organes récoltés sont eux-mêmes très variables en fonction de l'usage qui en sera fait. De multiples schémas d'élaboration du rendement existent selon les cultures, et certains facteurs comme l'économie les diversifient encore davantage [L. Combe, D.Picard ; 1994].

3-2-2 Pour le maïs

L'élaboration du rendement permet de déterminer quels ont été les facteurs limitants durant les phases du cycle du maïs. Toutes les conditions du milieu, climat et sol, peuvent donc être remises en cause.

3-2-2-1 Les composantes du rendement du maïs

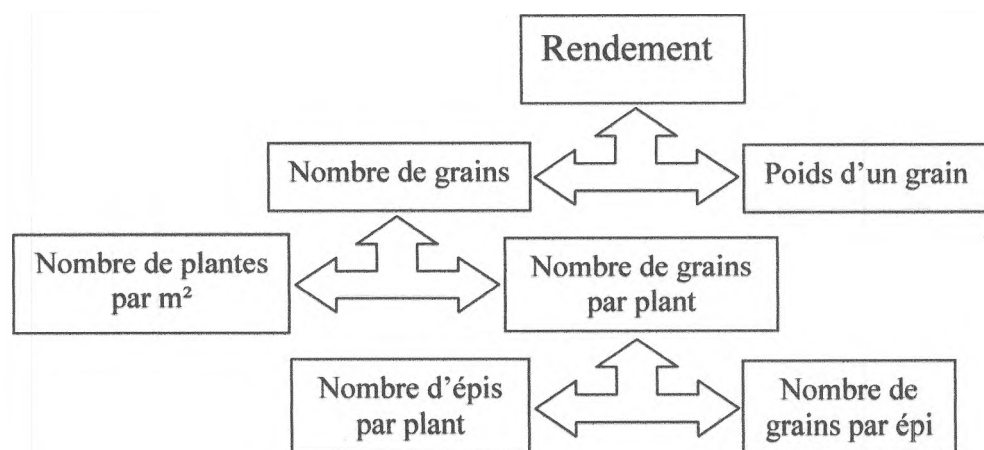
Le rendement final du maïs résulte de la multiplication du nombre de grains/m² par le poids moyen d'un grain. Le nombre de grains par unité de surface est lui-même fonction de la densité, de la prolificité (nombre moyen d'épis/plante) et du nombre de grains réels/épi (lui-même lié à la réussite de la fécondation).

Les composantes du rendement du maïs, exclusivement mesurées à la récolte, sont les suivantes :

- ✚ nombre de plants par mètre carré : Nbr plts/m²
- ✚ nombre d'épis par plant : Nbr épi/plt
- ✚ nombre de grains par épi : NG/E
- ✚ poids moyen d'un grain : P1G

Rendement = nombre de plants/m² x nombre d'épis/plt x nombre de grains/épi x poids moyen d'un grain (g/m² ou kg/ha)

Organigramme : Elaboration du rendement de maïs



Source : Cirad, Gret, 2002

3-2-2-2 Elaboration des composantes du rendement durant le cycle végétatif

Chez le maïs, les différentes phases du développement de la plante, correspondant aux différentes composantes qui conditionnent le rendement final, se succèdent au long de la vie de la plante. Chacune d'entre elles peut, sous l'effet des conditions climatiques, comme un changement de température, contribuer à diminuer le rendement potentiel. Le rendement réel est donc le résultat d'une série de soustractions à partir du rendement potentiel.

Le nombre de plants/ha : Il résulte du choix d'une densité par l'agriculteur et de la réussite du semis et de la levée. La qualité de la semence, les conditions du semis, la présence éventuelle d'insectes attaquant les plantules, la pratique d'un nouveau semis ou d'un démariage sont autant de facteurs qui interviennent dans l'élaboration de la densité à la récolte.

La phase végétative : Pendant la phase végétative, les racines, la tige et les feuilles subissent éventuellement le contrecoup de conditions défavorables. Par exemple, une attaque virale précoce peut fortement réduire la surface foliaire utile. Le succès de la mise en place de l'appareil végétatif conditionne largement le rendement final.

La phase de reproduction : Un stress pendant la formation des épis réduit le nombre de rangs, puis la longueur de l'épi. Quant au nombre d'épis/plante, il n'est fixé que quelques jours avant la sortie des soies. La prolificité en épis est recherchée en milieu tropical car elle permet une régulation du rendement et peut, notamment, compenser une faible densité. Par ailleurs, un manque d'eau à la floraison va, en allongeant l'intervalle mâle/femelle, diminuer le pourcentage de fécondation et favoriser l'avortement des ovules, puis des graines.

La phase de maturité : Si la plante souffre pendant le remplissage des grains, par exemple à cause d'un changement climatique, leur poids est affecté.

3-2-3 Pour les plantes fourragères

L'évaluation du disponible fourrager qui s'exprime en kilogramme de matière sèche par hectare ($\text{kg MS}\cdot\text{ha}^{-1}$) concerne uniquement la fraction appétible, celle qui est susceptible d'être consommée par les animaux. Cette appétibilité est une notion toute relative, selon les espèces animales bien sûr, mais aussi selon le degré de difficulté pour le cheptel de trouver de la nourriture.

En élevage bovin, ces matières sèches seront ensuite évaluées suivant leurs compositions et les besoins des animaux, souvent exprimés en Unité Fourragère Lait (UFL) et en quantité de protéines digestives. L'UFL est une unité d'énergie qui exprime aussi bien les besoins de l'animal que la valeur des aliments. C'est la comparaison de l'énergie de l'aliment à la quantité de l'énergie qui est apporté par 1 kg d'orge. La composition de la matière des fourrages les confirme (Annexe IV).

D'après les données de FIFAMANOR, le seul organisme équipé pour l'analyse et le test de nombreux types de fourrages, le tableau ci-après nous montre les valeurs alimentaires de quelques espèces fourragères selon les normes du système UFL et PDI.

Tableau 9 : Table des valeurs alimentaires des fourrages

Nature	MS	MO	MAT	UFL	PDIN	PDIE
Paille de riz	81	86,1	6,0	0,58	46	68
Paille de maïs	87	92,5	3,9	0,57	29	50
Ensilage de maïs	35	-	-	0,90	50	68
Avoine (S5)	24	92,9	11,4	0,80	79	77
<i>Brachiaria ruziziensis</i>	23	89,4	13,6	0,70	97	92
Vesce (SL3)	22	88,1	24,1	0,71	236	106
Trèfle	18	87,6	26,6	0,83	179	92
Radis plante entière	9	84,9	17,4	0,85	116	74

Source : FIFAMANOR et al, 2008

MS : taux de matière sèche du fourrage en %

MO : quantité de matière organique en % MS

MAT : quantité de matières azotées totales en % MS

UFL : unité fourragère lait par kg de MS

PDIN, PDIE : quantité de protéines digestibles dans l'intestin en g par kg de MS, calculée selon l'azote ou l'énergie disponible dans le fourrage et à équilibrer dans la ration.

NB : La valeur des fourrages diminue au cours de leur croissance. La plante en vieillissant s'appauvrit en matières azotées et en glucides solubles et s'enrichit en parois, en cellulose et en lignine.

De ce fait, la valeur des fourrages cultivés peut être obtenue par simple règle de trois, en se basant sur ces références exprimées en fonction du poids de la matière sèche.

3-3 Les biomasses

La biomasse est la masse totale des organismes vivants présents à un moment donné dans un biotope particulier [http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/terre-1/d/biomasse_2038/]. Sa valeur est très variable selon les régions et les organismes. Celle des végétaux est très supérieure à celle des animaux et atteint son maximum dans les forêts. De même, celle des animaux qui vivent dans le sol est bien supérieure à celle des animaux du milieu épigé, au-dessus de la surface du sol [Microsoft Encarta 2009].

3-3-1 Les types de biomasse

L'unité accordée à l'évaluation de la biomasse peut être multiple selon sa nature, mais souvent elle est exprimée en kilogramme par hectare. Il existe deux types de biomasse : la biomasse brute et la biomasse secondaire.

3-3-1-1 La biomasse brute

Concernant les plantes, la biomasse brute se compose principalement d'arbres et d'arbustes de forêts ou de cultures telles que les herbes, les légumes, les céréales etc. Deux grands groupes en sont distingués : la biomasse aérienne et la biomasse souterraine. Cette dernière est formée des tubercules, des racines : les organes végétatifs souterrains etc. De même, la biomasse aérienne est constituée par les organes végétatifs aériens tels que les feuilles, les tiges, les fleurs, les graines. La répartition de la biomasse entre feuilles, tiges et parties souterraines dépend de la vitesse de la mise en place des structures aériennes mais est aussi modulée par la disponibilité en assimilats.

En ce qui concerne les animaux, les mêmes deux groupes apparaissent. Mais d'une façon générale, ils contribuent tous de manière capitale aux cycles des éléments en transformant la matière organique morte en ses éléments chimiques de base [Microsoft Encarta 2009].

3-3-1-2 La biomasse secondaire

La biomasse secondaire se compose de toute matière qui a été obtenue de la biomasse brute mais qui a subi des modifications chimiques et physiques : le fumier et les litières des animaux, les déchets de manutention des grains (les paillettes, le petit blé et les grains de qualité inférieure), les résidus de récolte (la paille et la fane de maïs). Ces modifications sont comprises dans la dégradation de la matière organique (Annexe VI).

La biomasse produite sur une parcelle peut avoir une utilisation directe (plante fourragère) mais est également importante pour les effets de précédent cultural qu'elle induit pour la culture suivante.

3-3-2 La biomasse représentant les précédents culturaux.

C'est un des facteurs qui peut occasionner la réussite ou non de la culture suivante tant en labour qu'en SCV. Comme il a été déjà écrit dans les principes du SCV : après la récolte, la totalité de la biomasse ou une partie de la production (les résidus des plantes) est restituée au sol pour constituer une source de matière organique pour la nutrition de la culture suivante.

De plus, l'effet de la culture précédente est défini comme la variation d'état du milieu (caractères biologique, physique et chimique) entre le début et la fin de la culture sous l'influence combinée du peuplement végétal et des techniques culturales appliquées. [Michel Vilain, 1997].

Justement, cet effet est l'analyse de la modification des paramètres physique, chimique et biologique de la parcelle sous l'effet d'un système de culture (ex : une espèce ou association d'espèces cultivée avec un itinéraire technique donné et dans les conditions climatiques d'une année donnée) [Cirad-Gret, 2002].

Par ailleurs, il est indépendant de la culture qui suit. Toutes les cultures réagissent de manières différentes aux états du milieu lié à la culture précédente. Néanmoins, il est à souligner que les légumineuses sont de bons précédents culturaux, de leur capacité à assimiler l'azote atmosphérique.

Cette biomasse représente une part de la matière organique du sol, elle se décompose et évolue dans ce milieu lui procurant certains avantages tant chimiques que physiques (Annexe VI).

Le maïs est une graminée vigoureuse, largement cultivé dans toutes les régions de Madagascar tant en pur qu'en association. Au cours de ces dernières campagnes culturales, sa production a diminué dans le Vakinankaratra. Le présent travail est une recherche menée afin de le promouvoir en intégrant les plantes fourragères, aliment de base des vaches laitières. Par conséquent, nous allons tout de suite présenter la zone d'étude ainsi que les matériels et méthodes utilisés.

PARTIE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE, DES MATERIELS ET METHODES UTILISES

Chapitre I : Justification du thème

1-1 Cadrage de l'étude

1-1-1 Contexte général et centre d'accueil

1-1-1-1 Contexte général

Notre travail de recherche a été effectué sur les champs d'expérimentation de l'Unité de Recherche en Partenariat « Systèmes de Culture et Rizicultures Durables » (URP/ SCRiD). Il s'intègre dans le projet CORUS qui a débuté à la fin 2007, associant plusieurs partenaires de recherche (URP/ SCRiD, Département de géographie de l'Université d'Antananarivo, AgroParisTech, Pôle élevage du CIRAD Réunion.) et de développement (FIFAMANOR, ONG TAFI).

Après le riz, le maïs constitue la deuxième culture vivrière à Madagascar. Sa culture tolère une large gamme de sols et de reliefs, les paysans malagasy le cultivent à leur guise : dans les bas fonds, les vallées, et aussi sur les plaines, les plateaux, les collines et les baiboho, généralement associé à une légumineuse. En 2004, la surface totale cultivée en maïs a été estimée à 390 902 ha environ [MAEP, 2008]. La situation de cette filière ne peut pas être isolée de celle de l'ensemble des filières vivrières et du problème de l'alimentation des populations urbaines et rurales. Sa culture contribue, en complément des rizicultures aquatiques que pluviales, à la sécurité alimentaire.

L'originalité du projet CORUS est de chercher à produire le fourrage au sein de systèmes de cultures vivrières sur les Hautes Terres malagasy. D'une part, il s'agit d'assurer sur le long terme la sécurité alimentaire en favorisant la production agro-écologique de ces plantes pour l'autoconsommation tout en permettant la génération de revenus complémentaires liés à la production de surplus obtenu. D'autre part, concernant l'élevage, ce projet consiste à produire du lait en travaillant sur la production de fourrage. Vu que l'élevage est indissociable de l'agriculture, cela encourage davantage la possibilité de réinvestissement dans cette dernière.

1-1-1-2 Centre d'accueil

a- Le projet CORUS

Ce projet de recherche fait partie du second programme de Coopération pour la Recherche Universitaire et Scientifique (CORUS), portant sur le thème de "L'homme dans son environnement".

CORUS est un projet FSP (Fonds de Solidarité Prioritaire) développé par le Ministère français des Affaires étrangères (MAE) qui finance des projets de recherche scientifique conçus et conduits en partenariat entre des établissements universitaires et de recherche des pays d'Afrique et de l'Océan Indien et des établissements français.

b- URP/SCRiD

L'Unité de Recherche en Partenariat sur les Systèmes de Culture et Rizicultures Durables (URP/SCRiD) a été créée fin 2001. L'URP/SCRiD associe le FOFIFA, l'Université d'Antananarivo et le CIRAD.

Ces trois institutions se sont unies, d'une part, afin de renforcer leur coopération pour assurer l'accompagnement agronomique et économique du développement des deux principales cultures vivrières malagasy sur les tanety, et, d'autre part, de promouvoir à la fois une recherche de qualité, répondant aux besoins du développement, et la formation sous tous ses aspects.

L'unité relève le défi de l'amélioration de la productivité et de la durabilité technique et économique des systèmes pluviaux incluant le maïs, en complément des rizicultures aquatiques et pluviales, qui conditionne, dans de nombreuses régions de Madagascar la sécurité alimentaire et le développement rural. Elle promeut l'intégration des recherches, notamment thématiques et systémiques, conduites à différentes échelles et par différentes disciplines, pour comprendre les processus clés de ces systèmes, permettre de lever les blocages à leur diffusion et prévoir les effets à long terme de leur développement.

1-1-2 Problématique

A Madagascar, l'autosuffisance alimentaire est loin d'être atteinte jusqu'à présent du fait de la démographie qui reste importante : ainsi, de 1960 à 2005, la taille de la population a triplé, passant de 5505900 à 18040300 habitants. Par conséquent sur les Hautes Terres

Malgaches, la pression de cette population et la saturation des bas fonds rizicoles entraînent une exploitation croissante des collines avec sols fragiles. Pourtant, certaines pratiques culturales, en particulier le labour, favorisent la dégradation du sol et la formation des lavaka. Les techniques de culture traditionnelle, telles que le labour manuel, conduisent à une érosion intense, à une baisse de la fertilité et des rendements, qui condamnent à terme cette agriculture de subsistance.

Par ailleurs, face à cette contrainte d'espace cultivable, les paysans négligent l'importance des fourrages en élevage bovin. Ils n'accordent que peu ou pas de terrain à la culture fourragère alors qu'une insuffisance en qualité et en quantité survient souvent, plus critique pendant la période sèche hivernale.

Pour surmonter ces problèmes, des expérimentations en semis direct avec couverture végétale permanente (SCV) ont été conduites depuis plus de 10 ans par l'ONG TAFa (Organisme Non Gouvernemental Tany sy Fampanandroana) et le CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), couvrant les diverses situations agro-écologiques et socio-économiques de la région.

1-1-3 Objectif et méthodologie de recherche

1-1-3-1 Objectif du stage

L'objectif de cette étude est d'évaluer et de comparer la production de différents systèmes de culture entrant, soit en association avec le maïs (maïs + fourrages), soit en culture pure. Les interactions possibles sont étudiées en association. Ces évaluations, en termes de rendement en grains et de biomasses de paille/couverture, sont conduites en fonction de différents traitements : le mode de gestion du sol, les plantes fourragères associées et la fertilisation organique (fumier) ou organo-minérale (fumier + engrais).

1-1-3-2 Méthodologie de recherche

L'étude va se décomposer entre des mesures qui seront réalisées au cours du cycle cultural et d'autres à la récolte, une dernière mesure est prévue également à la fin de la période sèche pour estimer les biomasses restantes sur les parcelles.

a- Durant le stade végétatif : c'est le suivi de la croissance du maïs associé par des mesures de la hauteur de 3 poquets par parcelle toutes les semaines jusqu'à la floraison. Ce

suivi permettra de mettre en évidence des relations entre cultures associées : relations de dominance ou de complémentarité.

b- A la récolte : quantification des biomasses produites (maïs et plantes fourragères) et des rendements obtenus (maïs) et des résidus restant sur la parcelle.

c- A la fin de la saison sèche : estimation des biomasses restantes sur la parcelle à la fin de la saison sèche.

1-2 Présentation générale de la zone d'étude

1-2-1 Localisation de la zone d'étude

Notre zone d'étude se situe dans la région du Vakinankaratra, une partie représentative des Hautes Terres Centrales malgaches. L'expérimentation a été réalisée à Andranomanelatra, sur un ancien terrain de la ferme de l'usine KOBAMA.

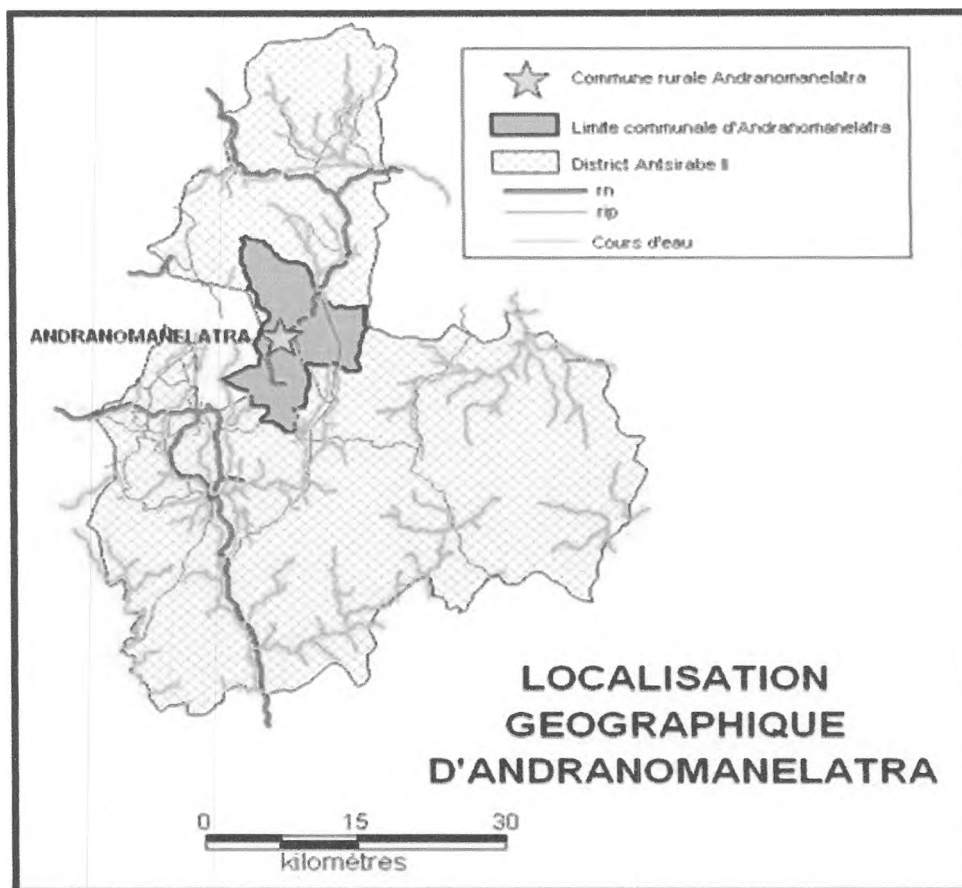
1-2-1-1 Limites administratives

La commune rurale d'Andranomanelatra est localisée dans la région du Vakinankaratra, District d'Antsirabe II (carte de localisation ci-après). Ce district s'étend sur 2769 km² et est composé de 20 communes. La commune d'Andranomanelatra comprend elle-même 14 Fokontany (PCD Andranomanelatra, 2003).

1-2-1-2 Limites géographiques

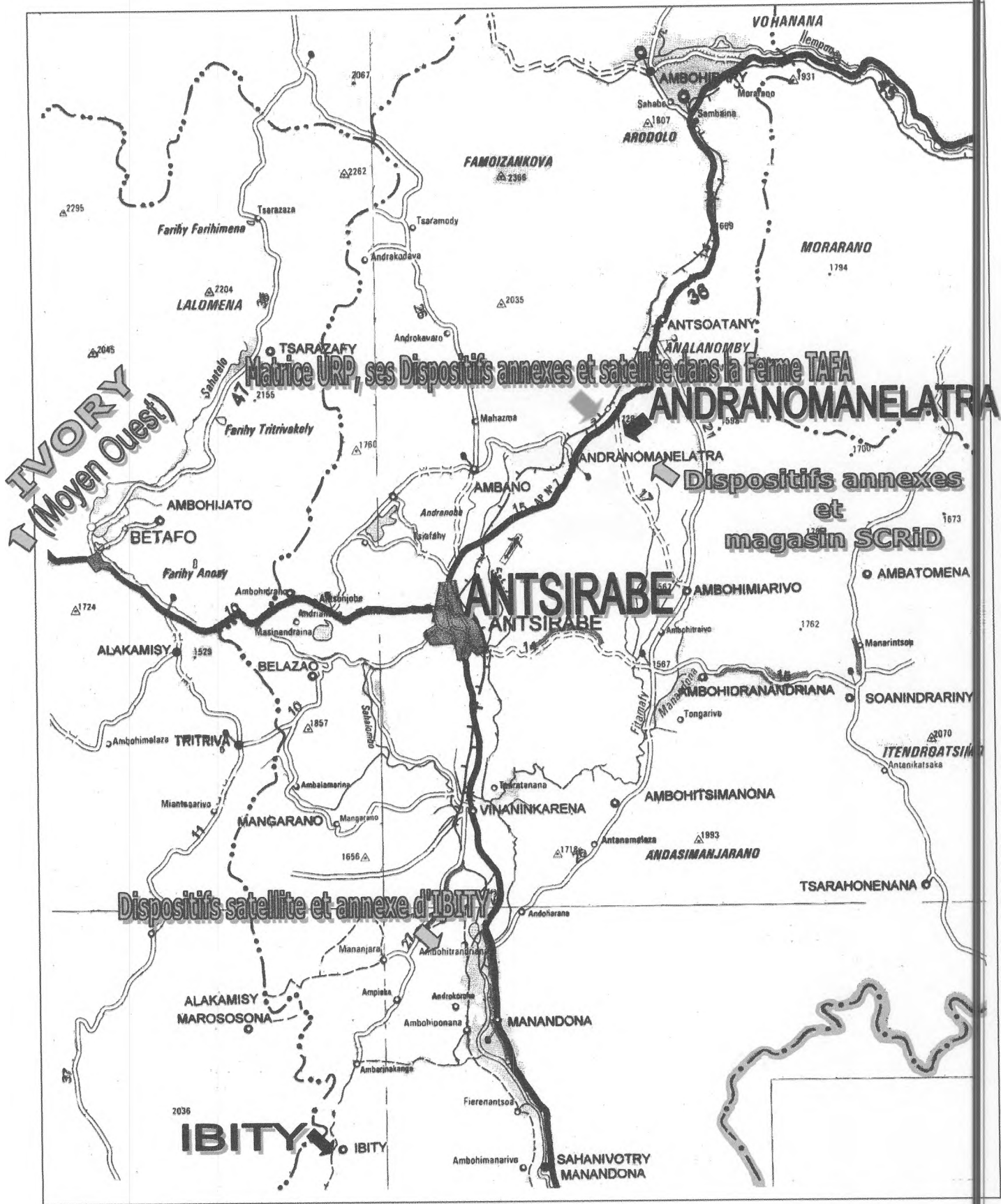
Andranomanelatra est située à la longitude Est 47°60, à la latitude Sud 19°47 et à une altitude de 1628 m. La commune est entourée au Nord par la commune d'Antsoatany, à l'Est par Ambohimiarivo, au Sud-Ouest par la ville d'Antsirabe, à l'Ouest par la commune d'Ambano.

Elle s'étend sur 164 km², et est située sur la route nationale N°7, à 16 km au Nord d'Antsirabe (PCD Andranomanelatra, 2003).



Carte 2 : Localisation géographique d'Andranomanelatra

Source : BD 500, MapInfo



Carte 3 : Localisation du site
 Source : URP/ SCRID, 2005

1-2-2 Les unités climatiques

Le site d'Andranomanelatra est doté d'une station météorologique CIMEL (Annexe VII). Cette dernière permet d'avoir les conditions climatiques affectant l'expérimentation, en particulier la température et la pluviométrie.

Ces facteurs climatiques ont une influence sur le développement de la plante, c'est la raison pour laquelle le site expérimental en est doté. Les données obtenues peuvent expliquer facilement certains phénomènes phénologiques aux cours des cultures, ou même la proportion de la production à la récolte. La station nous a permis d'obtenir les données ombrothermiques suivantes :

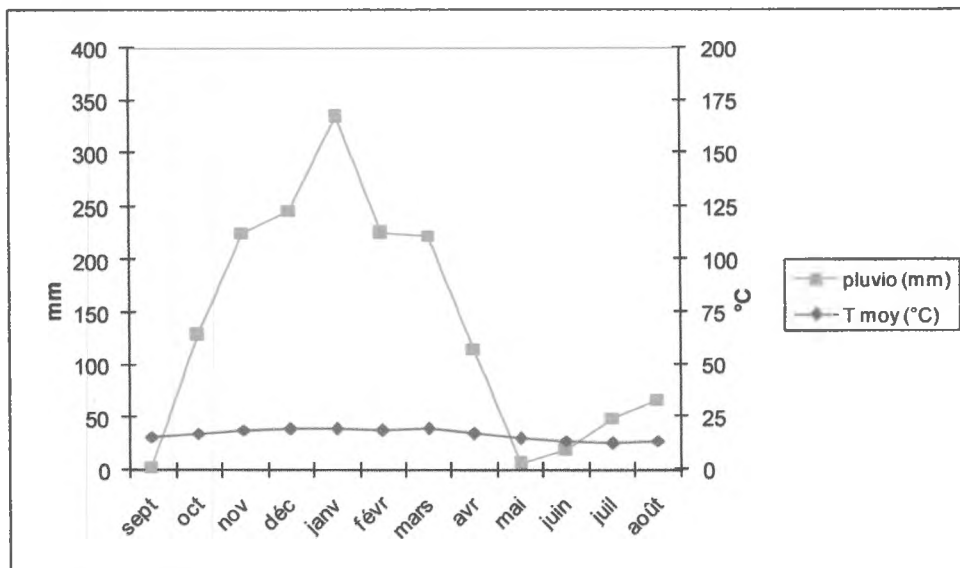


Figure 1 : Courbe ombrothermique, campagne 2008-2009

Source : Station CIMEL Andranomanelatra

Un pic de pluie est survenu au mois de janvier. Durant la campagne 2008-2009, la station a relevé :

- une température minimale mensuelle de 7,9°C au mois de mai ;
- une température moyenne mensuelle de 18,4°C ;
- une température maximale mensuelle de 26,7°C au mois de décembre.

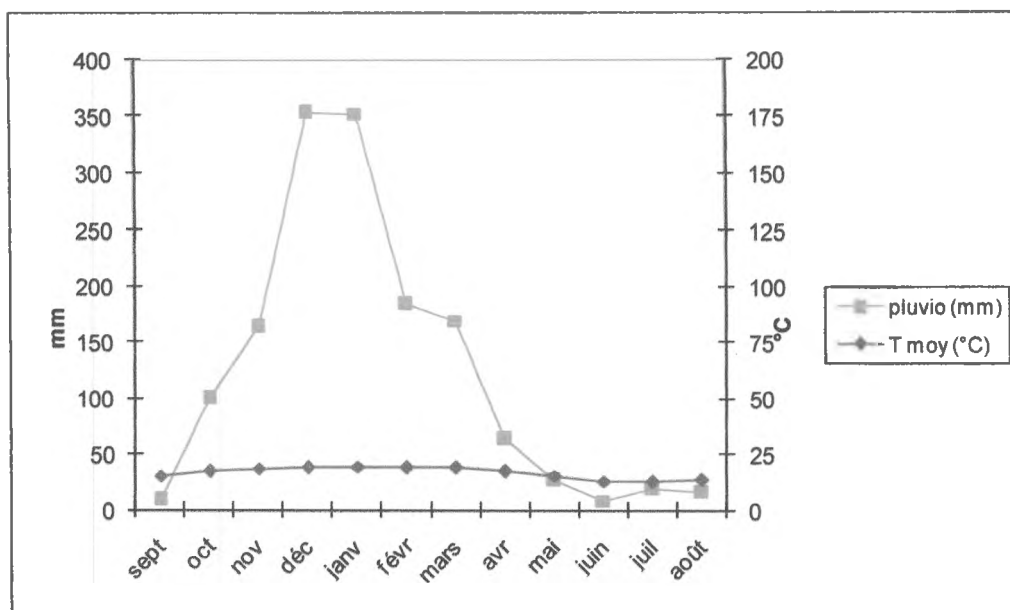


Figure 2 : Courbe ombrothermique moyennes de 7 années

Source : Station CIMEL Andranomanelatra

pluvio = pluviométrie moyenne en millimètre (mm)

T moy = température moyenne en degré Celsius (°C)

Nous constatons que la courbe ombrothermique de cette année est plus ou moins identique à celle en moyenne avec les six précédentes années. Par ailleurs, l'existence des deux saisons de l'année : pluvieuse chaude et sèche froide est bien démontrée par ces deux courbes.

1-2-3 Les unités pédologiques

Le sol du dispositif d'Andranomanelatra a été classé par Zebrowski [Ratsimbazafy, 1979 et Raunet, 1981] comme un sol ferrallitique gibbsitique, fortement désaturé, roux ou ocre, sur alluvions volcano – lacustres [Razafimbelo, 2005]. Les sols ferrallitiques fortement désaturés possèdent de faibles niveaux de matière organique et des teneurs élevées en aluminium échangeable liées à une très forte acidité. Ces caractéristiques ne permettent d'obtenir que de faibles rendements en culture de défriche, une situation qui peut être améliorée par des amendements massifs et/ou apports de matières organiques [Professeur Y. Demarly, 1988].

Chapitre II : Les dispositifs et matériel végétal

2-1 Le dispositif expérimental de l'URP SCRiD

Le dispositif expérimental d'Andranomanelatra, installé depuis fin 2002, s'étend sur une surface totale de 3,2 ha. Il est constitué de 120 parcelles regroupées en quatre blocs A, B, C, D correspondant à 4 répétitions. Puis chaque bloc est subdivisé en 30 parcelles de dimension variable selon les essais proposés. Différents systèmes de culture y sont testés et comparés. Chaque répétition compare trois facteurs :

- ❖ les systèmes de culture :
 - les grands systèmes où le maïs entre en rotation avec du riz pluvial sont représentés par S (1, 2, 3)
 - tests d'association : R (1 à 7)
 - culture pure : R8
- ❖ deux modes de gestion du sol :
 - labour
 - SCV
- ❖ trois niveaux de fertilisation qui sont :
 - Fu : Fumier seul à la dose de 5 t/ha
 - FM : fumier (5 t/ha) avec fertilisation minérale constituée par : 300 kg/ha de NPK (11-22-16), 500 kg/ha de dolomie pour corriger l'acidité du sol ferrallitique et faciliter le développement de l'activité microbienne du sol, et 100 kg/ha d'urée apportée en deux apports
 - FM+ : fumier (5 t/ha) avec fertilisation minérale constituée par : 600 kg/ha de NPK (11-22-16), 1 t/ha de dolomie et 150 kg/ha d'urée appliqué en deux apports.

Remarque : Le traitement FM+ concerne uniquement les systèmes S1 et S3.

Statistiquement, c'est un dispositif en split-plot. Aux cours de cette campagne 2008-2009, le schéma du dispositif PCP-URP/ SCRiD / (ARO'S) à Andranomanelatra est représenté comme suit :

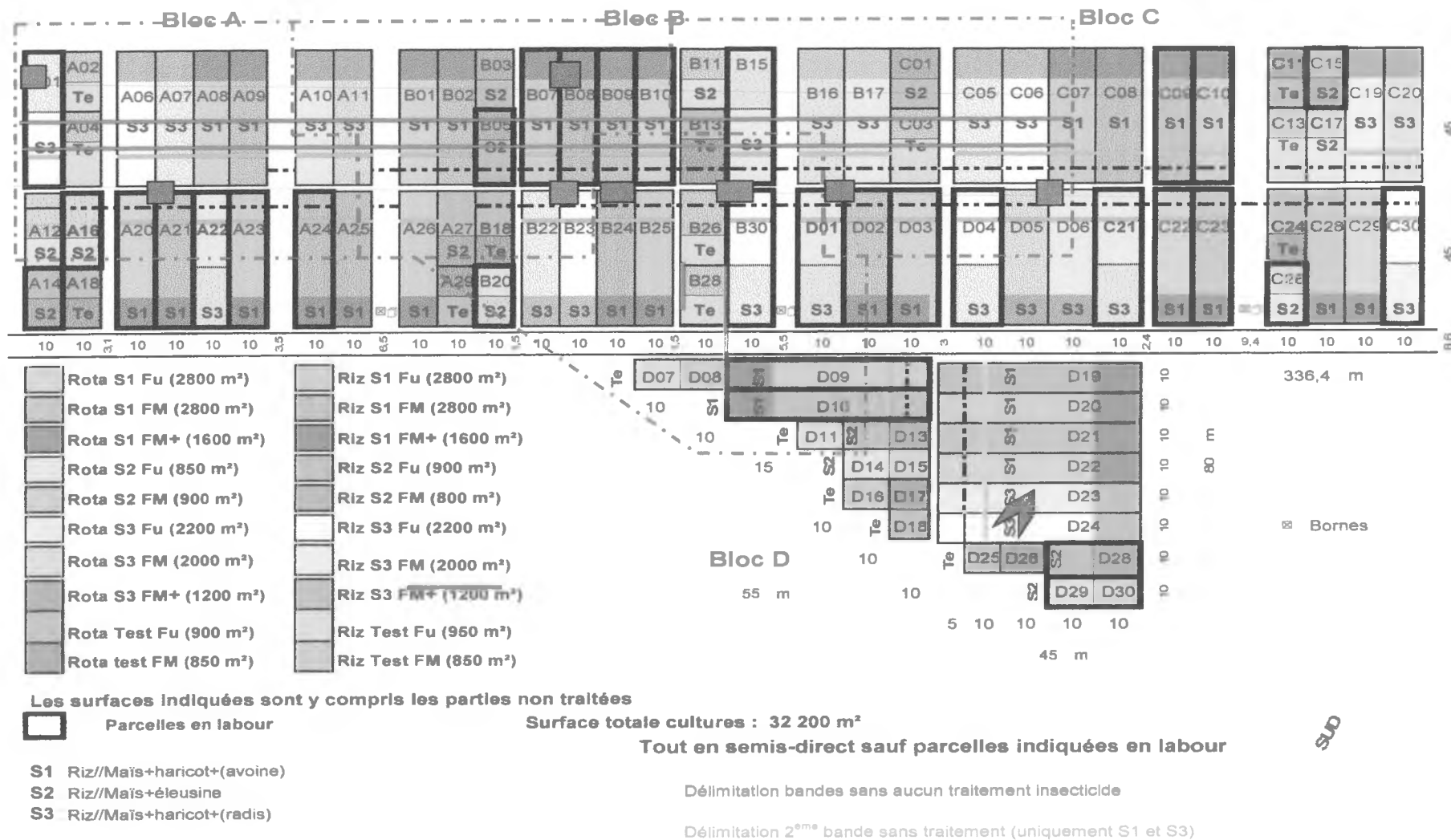


Schéma 1 : Dispositif PCP- URP/SCRiD d'Andranomanelatra, Campagne 2008-2009

Source : URP/SCRiD

2-2 Le matériel végétal

2-2-1 La variété de maïs

L'ensemble des parcelles de maïs est semé avec la variété TOMBOTSOA. C'est une variété de maïs grain, hybride introduite à Madagascar en 1970. Elle a été vulgarisée surtout dans le Vakinankaratra depuis longtemps. Elle peut atteindre jusqu'à 3,5 m de haut. Concernant la plante entière, la variété produit 40 t/ha, quantité très élevée de biomasse. En production de grains, elle donne 8 t/ha. Les grains sont de couleur blanc jaunâtre, à texture cassante ce qui n'est pas très apprécié en alimentation humaine.

Etant donné que la pollinisation des maïs est très ouverte, la variété a subi certaines modifications notamment avec les variétés locales. Certaines caractéristiques ont changé. La couleur des grains est devenue jaune, et sa texture ferme lui donne une meilleure appréciation auprès des consommateurs. En même temps, elle a diminué sa capacité de production en grains et atteint rarement les 5t/ha. Par contre, il donne toujours autant de biomasse.

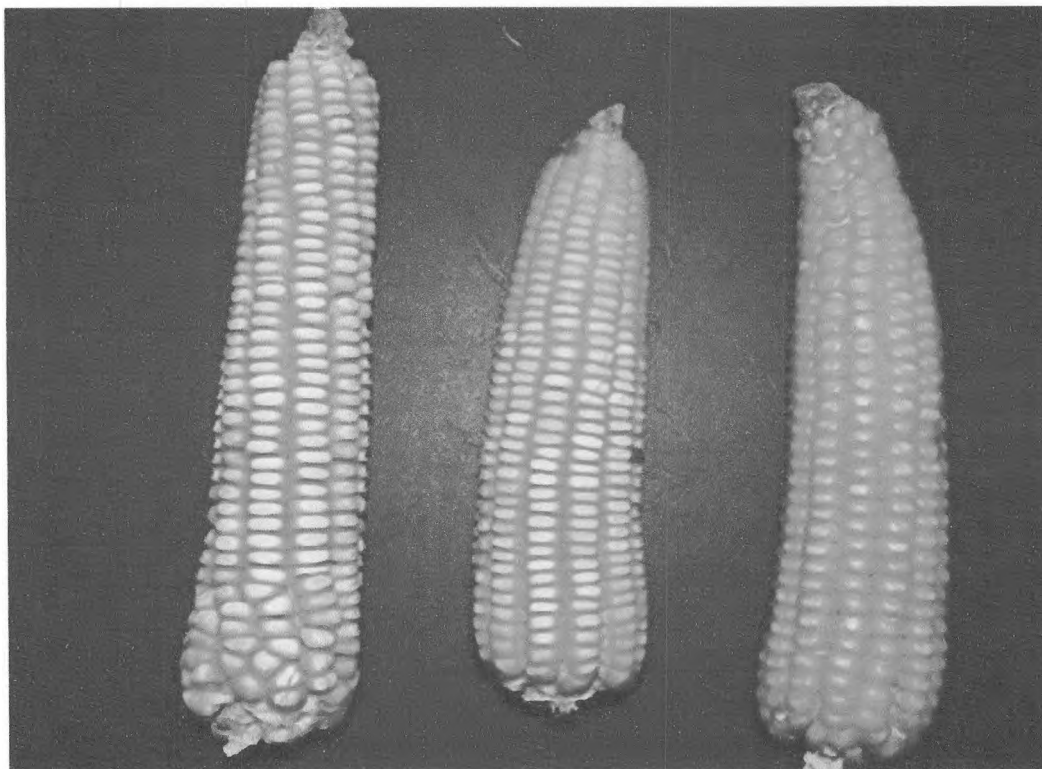


Photo 6 : Evolution de la couleur des grains

Source : Auteur 2009

Selon les organes cibles sous-tendant les résultats attendus, ces modifications peuvent être considérées comme une amélioration ou une dégénérescence. En tout cas, aucune n'est réellement défavorable pour notre expérimentation, la variété produit un rendement acceptable en grain pour l'alimentation et assez de biomasse à restituer au sol.

2-2-2 Les différentes plantes fourragères associées avec le maïs

Les plantes de couverture à vocation fourragère associées avec le maïs sont les suivantes :

- ❖ les graminées : Avoine (*Avena sativa*), *Eleusine corocana*, et *Brachiaria ruziziensis* ;
- ❖ les légumineuses : *Stylosanthes guyanensis*, Vesce (*Vicia sativa*), Trèfle (*Trifolium* sp) ;
- ❖ une crucifère qui n'est autre que le radis fourrager : *Raphanus sativus*.

2-3 Systèmes de culture comparés

2-3-1 Parcelles de comparaison de systèmes de culture

Les signes suivant représentent les différents types de conduite des cultures :

+ : en association

() : en dérobée

2-3-1-1 Maïs + Haricot + (Avoine) : système S1

Le maïs, culture principale et le haricot seront semés en simultanée, puis l'avoine sera semée en dérobée dès la maturité du haricot. Ce dernier est un bon associé et précédent cultural pour sa capacité à fixer l'azote atmosphérique (Annexe III). L'avoine est cultivée pour produire beaucoup de fourrage pour les animaux ou des couvertures mortes pour la culture suivante.

2-3-1-2 Maïs + éleusine : système S2

Le maïs toujours principale et l'éleusine seront semés en simultanée. L'éleusine est une plante avec un système racinaire puissant qui participe activement à la décompaction du sol. En même temps, il produit d'énormes quantités de biomasse exportable ou à laisser comme résidu.

2-3-1-3 Maïs + Haricot + (Radis fourrager) : système S3

Comme en S1, le maïs et le haricot seront semés en simultané ; le radis fourrager sera semé en dérobée dès le jaunissement des feuilles de haricot. Outre sa qualité fourragère, le radis est aussi un excellent répulsif contre les insectes.

L'ensemble de ces systèmes est conduit aussi bien en SCV qu'en Labour avec les trois niveaux de fumure Fu, FM et FM+. Ce troisième niveau n'est pas réalisé dans le système S2. Recueilli auprès de l'URP/ SCRiD, voici le schéma type de leur installation qui se répète à la 6ème ligne :

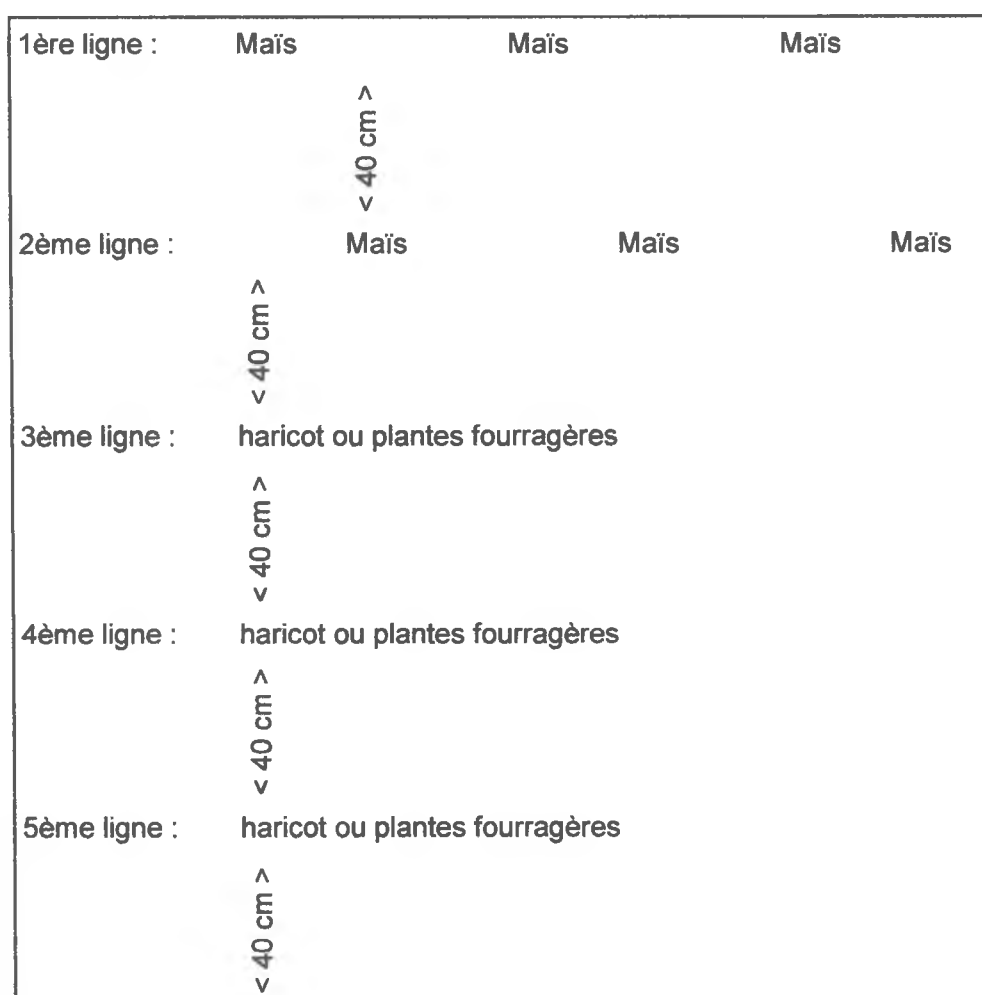


Schéma 2 : Installation du système

Source : URP/ SCRiD, 2009

Nous avons effectué également notre travail sur des essais d'association, où la culture principale va avec diverses plantes selon les huit systèmes proposés ci-dessous (R1-R8).

2-3-2 Parcelles de tests de cultures d'association

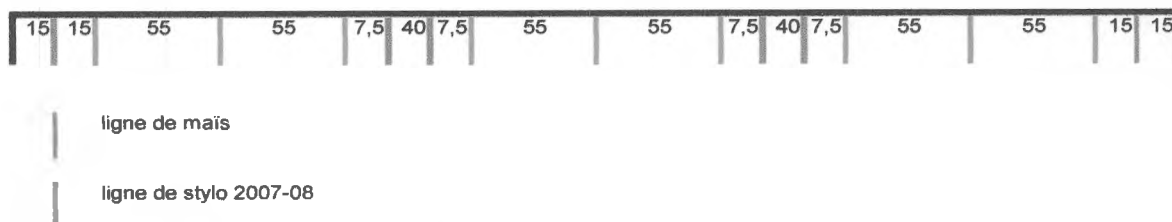
Les associations réalisées sont de deux types : celle avec deux plantes à la fois et celle associée à une seule espèce.

Dans ces essais, les maïs disposés en quinconce sont en doubles lignes écartées de 40 cm et où les poquets sont de même séparés de 40 cm. Entre les lignes seront semées 3 lignes de plante de couverture, séparées de 40 cm, selon les systèmes proposés :

- R1 : *Stylosanthes guyanensis*, déjà installé en 2007-08, voir plan ci-dessous
- R2 : éleusine + crotalaire (poquets alternés à 20 cm), semis simultané
- R3 : radis fourrager, semis simultané (25 cm entre poquets)
- R4 : cajanus (simultanée, poquets à 40 cm) puis *Brachiaria ruziziensis*, installée par boutures à 20 cm, en décembre sur les mêmes lignes que le cajanus
- R5 : lupin + vesce, semis simultané (poquets alternés à 20 cm)
- R6 : éleusine + cajanus (poquets alternés à 20 cm), semis simultané
- R7 : trèfle ; boutures simultanées (20 cm entre poquets)
- R8 : maïs seul représentant la culture pure (100 cm entre lignes, 40 cm entre poquets)

Les implantations en doubles lignes de maïs adoptées sont illustrées ci-dessous.

Double ligne de maïs dans stylo 2007-08



Double ligne de maïs

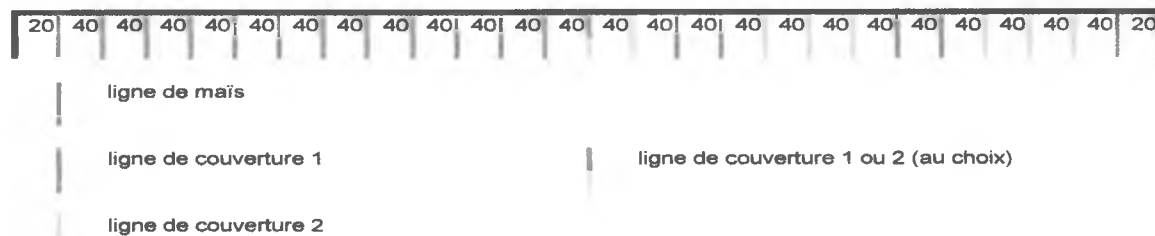
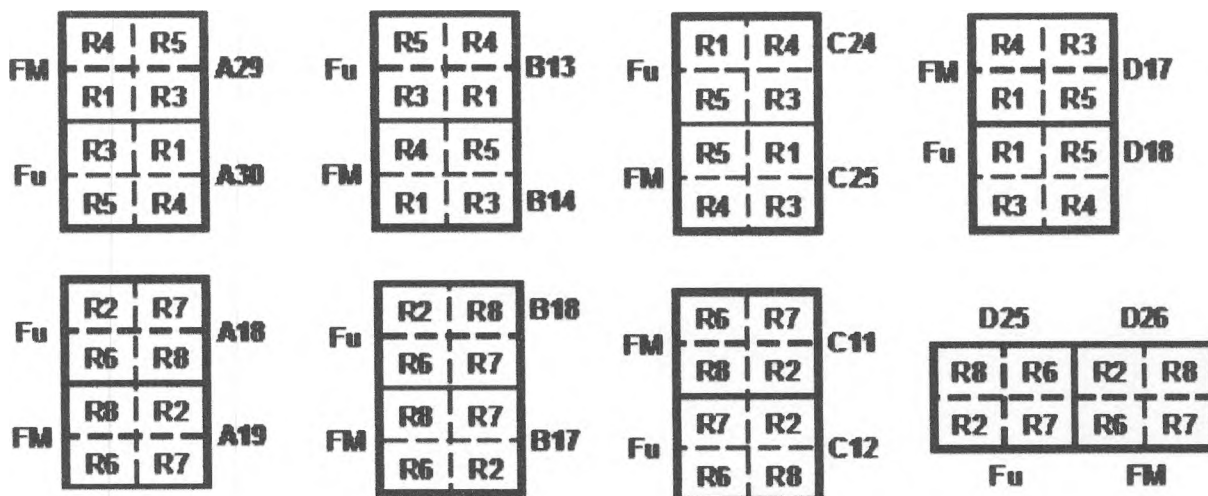


Schéma 3 : Doubles lignes de maïs entre les plantes de couverture

Source : URP/ SCRiD, 2009

Les parcelles tests font chacune 10 m * 10 m. Pour chaque culture, il y a 2 couples de fertilisations (FM et Fu) par bloc. Nous installerons, par culture, 4 systèmes par couple de parcelles. Nous aurons donc les 8 systèmes par bloc, dans les deux types de fumures. Par

conséquent, chaque système sera installé sur 5 m de large, avec des lignes de 5 m de long. Dans le plan de la matrice, ces parcelles sont de couleur orange : pointillé en FM et simple en Fu. Par bloc, la disposition des types d'associations est opérée comme suit.



- R 1 : stylosantes
- R 2 : éleusine + crotalaire
- R 3 : radis
- R 4 : brachiaria + cajanus
- R 5 : lupin + vesce
- R 6 : éleusine + cajanus
- R 7 : trèfle
- R 8 : maïs simple ligne

Schéma 4 : Dispositif des parcelles test

Source : URP/ SCRiD, 2009

Ces associations sont réalisées afin d'essayer de nouvelle perspective d'une complémentarité convaincante en alimentation humaine et/ou bovine. En plus, beaucoup de ces plantes ont la faculté de fixation d'azote atmosphérique.

Concernant les procédés indispensables de préparation et d'entretien, le fumier et la dolomie seront épandus à la volée avant le semis ; et le NPK sera épandu au poquet au moment du semis. Par ailleurs, le démariage et le remplacement des manquants du maïs sont nécessaires à la levée. Ce sont des façons identiques pour toutes les parcelles.

Pour les parcelles témoins, une superficie de 960 m² près de la matrice est réservée pour une culture pure en ces plantes de couverture. Elles sont conduites avec les mêmes fertilisations : Fu et FM.

Vu que c'est un travail de recherche, des observations et des mesures sont requises. Ayant vu les matériels végétaux utilisés, les méthodes de mesures sont expliqués dans le chapitre suivant.

Chapitre III : Les méthodes de mesure

3-1 Mesure en suivi de culture : hauteur des plantes

Uniquement pour les pieds de maïs, ces mesures sont aussi réalisées exclusivement sur les parcelles tests.

3-1-1 Principe

La mesure de la hauteur des plantes est une méthode simple pour pouvoir suivre de près leur croissance dans l'association. Ensuite, la comparaison des données entre les différents systèmes permet d'étudier les interactions existantes tout au long des cultures, relations de dominance ou de complémentarité. La réalisation de cette mesure se fait dès la formation des premières feuilles jusqu'à la floraison pour le maïs.

3-1-2 Mode opératoire

La hauteur se mesure à l'aide d'un mètre du sol jusqu'au point le plus haut du poquet en étirant les feuilles avec les mains, ceci étant effectué sur les trois mêmes poquets par parcelle toutes les semaines.

3-2 Mesure à la récolte

Cette mesure se pratique évidemment sur toutes les parcelles, à maturité pour les maïs. Pour les plantes fourragères, la récolte s'exécute normalement selon le besoin alimentaire du bétail. Dans cette expérimentation, elle se fait en même temps que le maïs et à la fin de la saison sèche. Nous commençons d'abord avec la culture principale. Pour de meilleures analyses, les mesures doivent comprendre les composantes de rendement.

3-2-1 Composantes du rendement du maïs

Les mesures du rendement et de ses composantes sont réalisées à l'intérieur d'une placette de 4 m² de dimension soit 2 m X 2 m, le reste de la parcelle sera récolté normalement. Valable sur les grands systèmes et les tests d'associations, cette mesure se fait de la façon suivante :

a- repérage de la placette et piquetage de ses coins : ceci se fait par simple comptage du nombre de poquets de maïs normalement compris dedans : soit dix (10) disposés sur deux lignes constituées de cinq poquets chacune.



Photo 7 : Repérage pour les carrés

Source : Auteur, 2009

b- comptage du nombre de plants ainsi que celui d'épis, cela va nous permettre d'obtenir :

❖ nombre de plants par m²

$$\text{Nbr plts/ m}^2 = \frac{\text{Nbr plts}}{\text{Surface d'une placette}}$$

❖ nombre d'épis par plant

$$\text{Nbr épis/ plt} = \frac{\text{Nbr épis}}{\text{Nbr plt}}$$

c- récolte et pesage : les épis sont cueillis en laissant les spathes sur le plant et pesés ; les pailles ou fanes de maïs sont coupées et pesées;



Photo 8 : Récolte d'épis

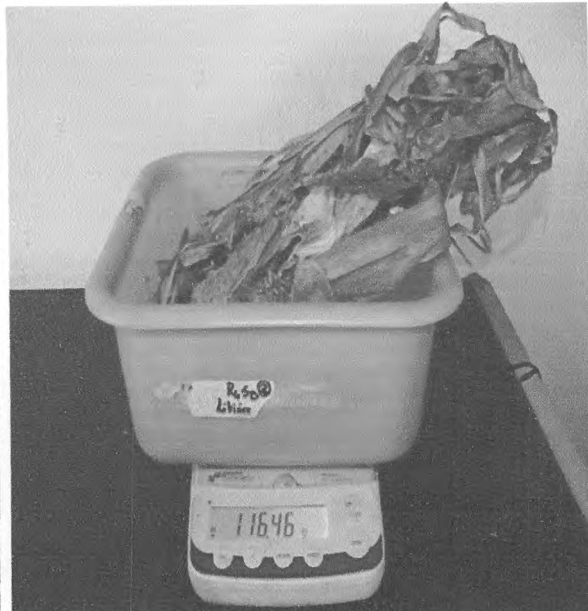


Photo 9 : Pesage d'échantillon de paille de maïs

Source : Auteur, 2009

d- prise d'échantillon : 5 épis représentatifs des différentes tailles et 3 plants par placette qui donneront les poids frais ;

e- séchage et pesage : passage à l'étuve durant 72 heures à 60°C, puis pesage des deux types d'échantillons, ensuite égrenages et enfin pesage des grains.



Photo 10 : Echantillon dans l'étuve

Source : Auteur, 2009



Photo 11 : Pesage de grains

Le pesage en sec des épis (Pséchépis) et de grains (PSéchgr) nous donnent le pourcentage de grain par épi notamment à l'aide de la formule :

$$\% \text{ grains/ épi} = \frac{\text{PSéchgr}}{\text{Pséchépis}} \times 100$$

Tous ces pesages nous permettent d'obtenir à la fois les poids frais des ensembles récoltés à l'intérieur des placettes ainsi que ceux frais et sec des échantillons prélevés. Par la formule suivante, ces valeurs nous permettent de connaître le taux d'humidité :

$$\text{Taux d'humidité} = \frac{\text{Pféch} - \text{Pséch}}{\text{Pféch}} \times 100$$

où Pféch : poids frais de l'échantillon

Pséch : poids sec de l'échantillon

En résumé, la formule du rendement que nous avons jugée plus pratique peut se présenter :

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Pf récolté}}{\text{Surface d'une placette}} \times 10\,000 \times \frac{\text{Pséch}}{\text{Pféch}}$$

où Pf récolté : poids frais de l'ensemble récolté à l'intérieur d'une placette

Surface d'une placette : 4 m²

10 000 m² = 1 ha

Cette formule est la même pour tous les produits : paille, épis, grains, couvertures ou résidus. Généralement, le rendement est exprimé en tonne par hectare (t/ha). Pour les grains, il s'écrit comme suit.

$$\text{Rendement en grains} = \frac{\text{Pfépisi}}{4} \times 10\,000 \times \frac{\text{PSgr}}{\text{Pféchépis}}$$

où Pfépisi : poids frais d'épis récoltés dans la placette

PSgr : poids sec de grains

Pféchépis : poids frais de l'échantillon d'épis

NB : Le nombre de placettes installées dépend de la surface de la parcelle :

- 2 pour les grandes parcelles de système S3 ; nous avons pris la moyenne des 2 placettes
- 1 pour les autres systèmes et les tests.
- le reste de la parcelle sera récolté à part (en dehors des placettes)

3-2-2 Mesure des cultures associées au maïs

La mesure des biomasses produites se fait en deux périodes, la première à la récolte et la seconde à la fin de la saison sèche.

La première s'effectue sur les mêmes placettes que celles de rendement du maïs, et les restes des parcelles sont laissés jusqu'à la fin de la saison. Au cours de cette première récolte, un comptage des pieds des plantes sera réalisé à l'exception du brachiaria sachant que ce nombre dépend du mode d'installation des cultures. En effet, cela est fonction de l'espacement entre lignes et de l'écartement entre poquets.

Les coupes sont ensuite exécutées à 5 à 10 cm du sol. Parmi toutes les plantes d'associations, seul le radis fourrager est arraché. Puis, l'ensemble de la placette et un échantillon seront pesés frais. Après passage à l'étuve durant 72 heures à 60°C, les échantillons seront repesés. Toutefois, les restes sont remis à l'endroit du prélèvement, dans sa placette respective.

Ces procédés nous permettent de connaître le pourcentage de matière sèche (% MS) dans chaque association. La formule pour son calcul est :

$$\% \text{ MS} = 100 - \text{taux d'humidité}$$

Il est indispensable de mesurer la matière sèche, qui est liée au taux d'humidité, afin d'estimer la production de fourrage (Tab 8).

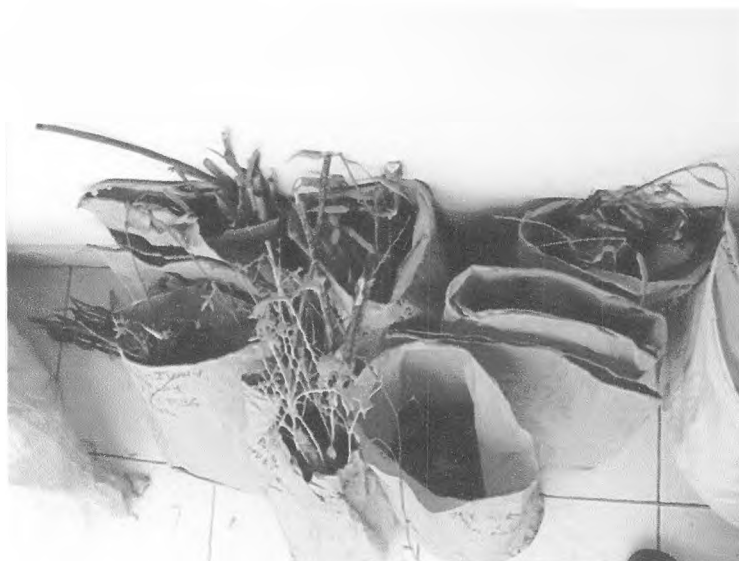


Photo 12 : Echantillon de plantes fourragères
Source : Auteur, 2009

A la fin de la saison froide se déroule la mesure des biomasses aériennes restantes sur les parcelles, des systèmes maïs (S1, S2, S3) et les tests (R). Celle-là se fait par simple fauchage, et après pesage, on restitue ces biomasses sur leurs propres parcelles pour le système SCV, par simple étalage. Elles vont constituer la couverture morte du sol. Le pesage est réalisé pour estimer la production de biomasses, à laisser comme couverture et susceptible d'être exporté pour l'élevage laitier.

3-2-3 Mesure des résidus sur la parcelle

Cette mesure se fait à la récolte sur les mêmes placettes de rendements. Pour chaque carré, nous récupérons et couperons tout ce qui se trouve dans leur intérieur, y compris les résidus tombés, les mauvaises herbes et les résidus secs de haricot en voie de décomposition. Nous pèserons l'ensemble en frais, nous prendrons un échantillon homogène que nous pèserons également en frais. L'introduction dans l'étuve à 60°C pendant 72 heures est nécessaire pour bien les sécher et ensuite les repeser en sec.



Photo 13 : Récolte de résidus

Source : Auteur, 2009

Les restes sont retournés à l'endroit du prélèvement. A la fin de la saison, nous restituons de même tous les échantillons pris, à l'intérieur de chaque propre placette.

3-3 Méthode de traitement des résultats

3-3-1 Analyses des résultats avec le logiciel SAS

Le traitement statistique des données a été réalisé avec le logiciel SAS version 9.1 pour Windows (SAS Institute, Cary, NC, USA). Les analyses de variance ont été réalisées avec la procédure GLM (General Linear Model), en particulier des analyses de variances des moyennes avec le Test Student – Newman – Keuls au seuil de 5 %. L'interaction entre les divers traitements (système et fertilisation) sera testée.

3-3-2 Calcul de l'Indice de Surface Equivalente ou I.S.E

Le I.S.E est une méthode d'évaluation de la réussite ou non d'une association de cultures. Cela étant fait pour savoir si l'association, sur une parcelle réduite de moitié, est plus productive donc favorable. Il engage les composantes associées et en culture pure pour une même surface donné. Par exemple, la superficie accordée à l'association est 1ha, par conséquent, la culture pure de chacune des composantes sera rapportée à la surface équivalente 1ha, la plus pratique est d'utiliser les rendements, déjà exprimés par hectare. L'Indice de Surface Equivalente est donc la somme des rapports du rendement en association sur le rendement en culture pure.

Le I.S.E est calculé selon la formule suivant :

$$\text{I.S.E} = \sum \frac{\text{Rendement obtenu en association}}{\text{Rendement obtenu en culture}}$$

Si sa valeur est :

- ✓ I.S.E < 1 : l'association est défavorable ;
- ✓ I.S.E > 1 : elle est bénéfique.

Divers systèmes de cultures ont été mis au point et testés sur la matrice. Plusieurs plantes fourragères y sont associées au maïs. Pour la vérification des hypothèses, des suivis ont été effectués au cours du stade végétatif et à la récolte. Les résultats issus des suivis ont été analysés statistiquement afin de démontrer l'existence ou non de différence entre les facteurs systèmes et fertilisation.

PARTIE III : ANALYSE ET DISCUSSIONS DES RESULTATS

Chapitre premier : Comparaison de systèmes de culture en grande parcelle de maïs en rotation avec du riz pluvial

1-1 Comparaison des systèmes en terme de rendement

D'après la figure 3, les fertilisations en FM ont donné en général les meilleurs rendements en grain. La fertilisation FM+ n'a pas donné les meilleurs rendements, sauf sur le système S1 SCV, il faut préciser que cette fertilisation FM+ a été appliquée sur les extrémités des parcelles (partie souvent bordée par des arbres), à la fois sur des parcelles anciennement FM et Fu, et a donné des résultats très variables par répétition. De ce fait, nous n'avons pas inclus cette fertilisation dans les analyses statistiques. Les traitements en fertilisation uniquement organique (Fu) présentent les plus faibles rendements car la seule décomposition de ce type de fumure n'arrive pas à combler tous les besoins de la plante au cours de sa croissance et de son développement.

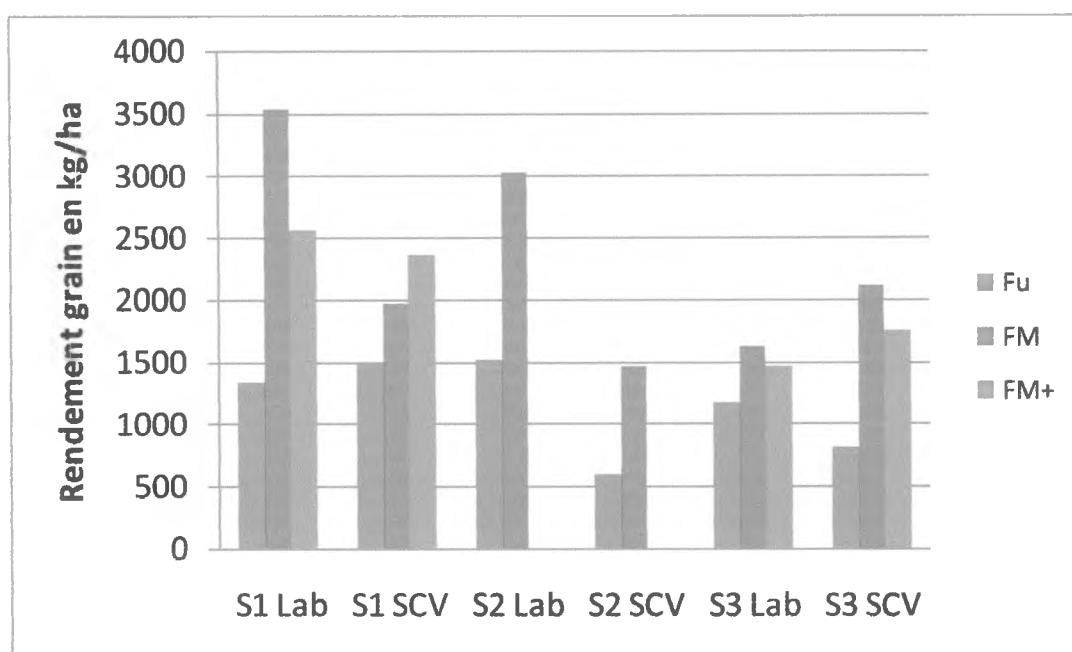


Figure 3 : Rendements en grain

S1 : Maïs + haricot + (avoine),

S2 : Maïs + éleusine,

S3 : Maïs + haricot + (radis fourrager)

+ : en association

() : en dérobée

Fu : fumure organique seule,

FM : fumure minérale recommandée + Fu

FM+ : fumure minérale plus élevée + Fu

Lab : labour,

SCV : Système de culture en semis direct avec couverture végétale

Pour le système S1, des meilleurs rendements sont obtenus en labour par rapport au SCV en FM, mais c'est l'inverse en Fu. Pour le système S2, les meilleurs rendements sont observés en labour par rapport au SCV pour les 2 fertilisations. Pour le S3, les rendements sont meilleurs en SCV par rapport au labour en FM, mais c'est l'inverse en Fu. Il n'y a donc pas de tendance nette d'effet du mode de gestion du sol, toutefois il apparaît nettement que les 2 meilleurs rendements ont été obtenus pour les systèmes S1 et S2 en labour

1-2 Comparaison des systèmes en terme de production de biomasse

1-2-1 Biomasses produites en fanes de maïs

La biomasse produite en fanes de maïs est plus abondante dans les traitements en fertilisation minérale recommandée-FM (Figure 4). Les traitements en Fu donnent le moins de biomasses. Concernant la gestion du sol, les systèmes en labour semblent donner des résultats nettement supérieurs à ceux en SCV, cette tendance est inversée en S3. Les productions de fanes de maïs suivent les mêmes tendances que celles de grain. Les meilleurs rendements en fanes se rencontrent dans les systèmes S2 Lab et S1 Lab surtout en FM.

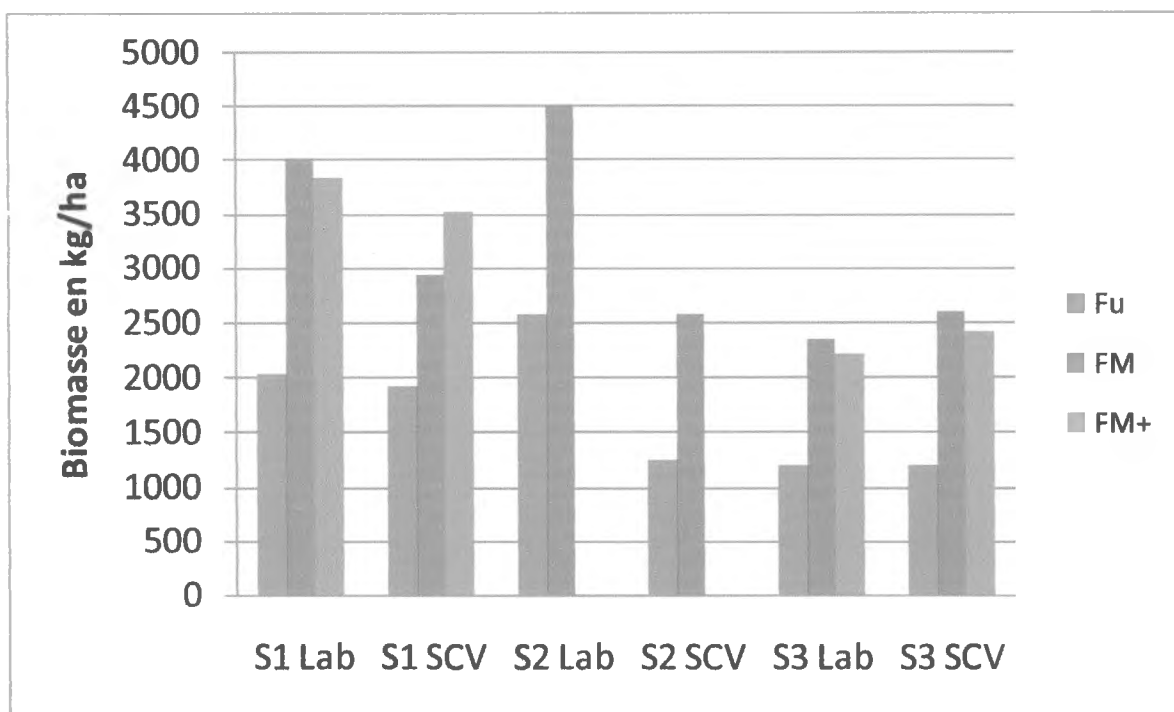


Figure 4 : Biomasses produites en fanes de maïs suivant les différents systèmes

1-2-2 Biomasses produites hors maïs

Les biomasses produites hors maïs sont représentées par les plantes associées et les résidus (essentiellement résidus des haricots associés aux maïs et adventices).

D'après la figure 5, les productions élevées de plantes associées et résidus sont observées dans les trois (3) systèmes : S2 SCV et S3 Lab et S3 SCV où les rendements de maïs sont les plus faibles. Conduit en SCV, l'éleusine (S2) semble favorable à la production de biomasse. Pour les systèmes S3, ces résultats peuvent être expliqués par les caractéristiques propres du radis, c'est une plante très concurrente en fertilisation et en espace par sa vitesse de croissance rapide et son port étouffant. Par contre, l'avoine en S1 qui avait un peu de mal à pousser donne de très faible quantité de biomasse.

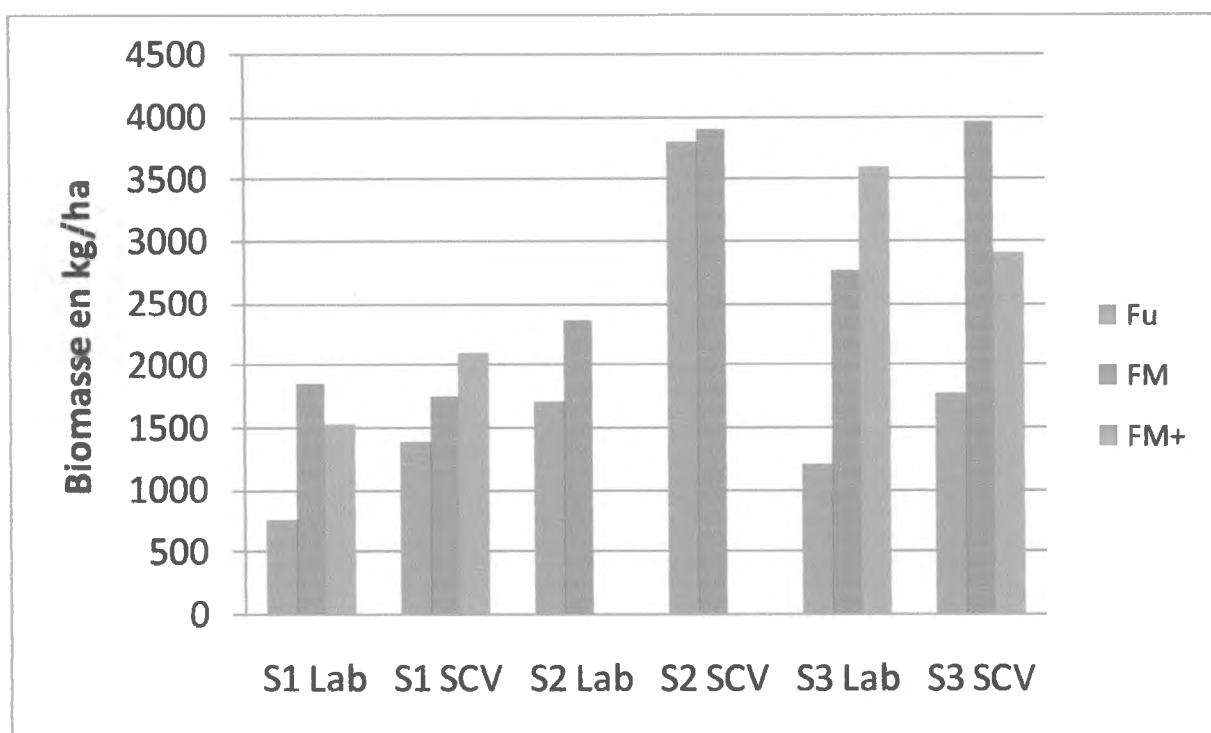


Figure 5 : Comparaison des biomasses produites hors maïs (plantes associées et résidus)

Par ailleurs, la fertilisation minérale recommandée (FM) a généralement un effet positif sur les productions de biomasse hors maïs.

Pour les systèmes soumis au traitement en FM+, le radis (S3) répond mieux à cette fertilisation que l'avoine (S1).

1-2-3 Biomasses totales produites hors grain

La biomasse totale produite hors grain est la biomasse produite en fanes de maïs ajoutée à celles des plantes associées et résidus. La figure ci-dessous nous montre que pour tous les systèmes, la fertilisation FM donne un meilleur rendement par rapport à Fu. Néanmoins, cette dernière donne un assez bon résultat en S2.

Dans tous les systèmes ayant la fertilisation FM+, les résultats largement au-dessus de la moyenne sont similaires, et en se referant aux figures 4 et 5, nous pouvons dire que les quantités de biomasses se sont compensées pour donner ces résultats en biomasses totales.

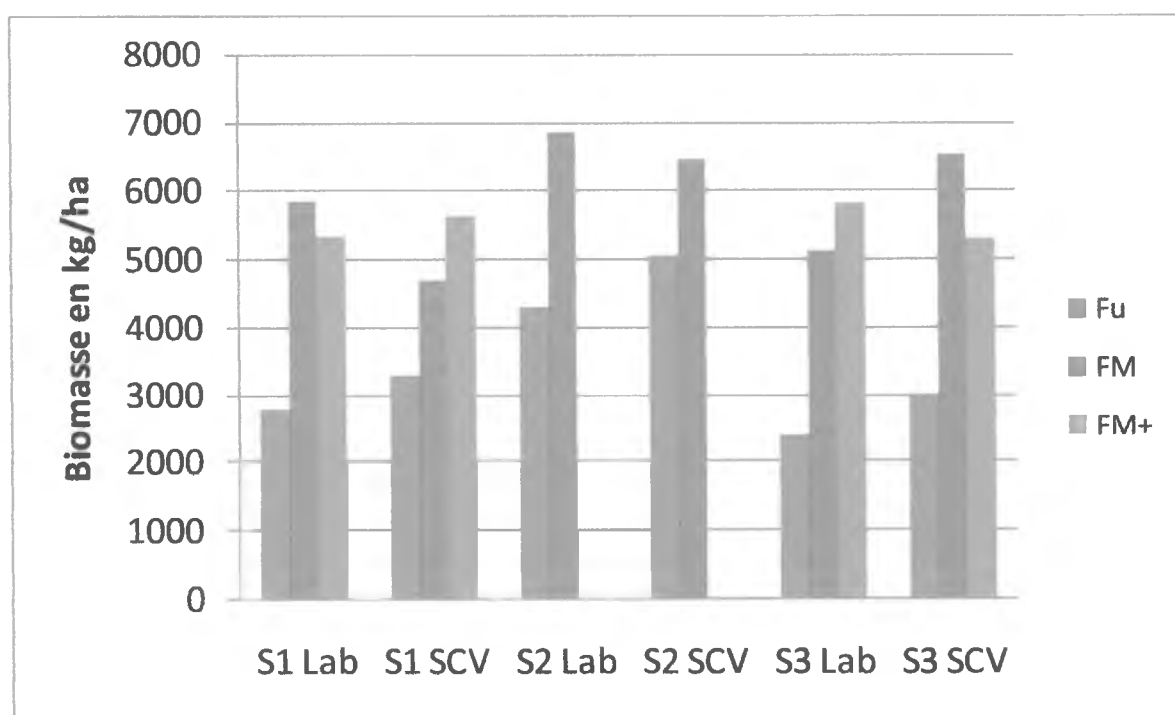


Figure 6 : Comparaison des biomasses totales produites hors grain

1-3 Comparaison par l'analyse statistique des résultats sur 2 campagnes

L'analyse des résultats de production a été réalisée, après vérification qu'il n'y avait pas d'interaction entre les traitements « système » et « fertilisation », sur les trois systèmes (S1, S2, S3) avec les deux fertilisations communes (FM et Fu).

1-3-1 Sur les rendements en grain du maïs

Selon le tableau 10, durant cette campagne 08-09, les rendements en grain varient entre 1300,5 kg/ha et 3013,4 kg/ha pour toute fertilisation confondue. Les valeurs les plus élevées ont été observées sur les systèmes S1 Lab et S2 Lab, et les plus faibles sur S2 SCV,

S3 SCV et S3 Lab. L'effet de la gestion du sol est alors important sur le rendement en grain du maïs, car les mêmes systèmes S1 Lab et S2 Lab ont donné les meilleures valeurs sur les 2 campagnes. Le système S3 présente pour les 2 campagnes les plus faibles rendements. Par ailleurs, une augmentation de rendement est constatée entre les deux campagnes tant sur les différents systèmes toutes fertilisations confondues (FM et Fu seulement) que sur les deux fertilisations tous systèmes confondus.

Tableau 10 : Rendements en grain du maïs obtenus sur les différents systèmes toutes fertilisations confondues (FM et Fu seulement) et sur les deux fertilisations tous systèmes confondus pour les campagnes 2007-08 et 2008-09

Systèmes Fertilisation	Rendement grain kg/ha Campagne 07-08	Rendement grain kg/ha Campagne 08-09
S1 LAB	2237,1 a	3013,4 a*
S1 SCV	1870,8 abc	2164,3 ab
S2 LAB	2504,7 a	2867,2 a
S2 SCV	1957,6 ab	1300,5 b
S3 LAB	1373,2 bc	1775,5 b
S3 SCV	1226,9 c	1865,2 b
FM	2450,4 a	2853,4 a
Fu	1273,1 b	1475,3 b

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

S1 : Maïs + haricot + (avoine),

Fu : fumure organique seule,

S2 : Maïs + éleusine,

FM : fumure minérale recommandée + Fu

S3 : Maïs + haricot + (radis fourrager)

Lab : labour

SCV : Système de culture en semis direct
avec couverture végétale

1-3-2 Sur les biomasses totales hors grain obtenus

D'après le tableau 11, les meilleurs rendements de la campagne 08-09 sont obtenus sur le système S2, celui en SCV est le plus élevé 5766,6 kg/ha grâce à sa production de biomasse

hors maïs. Lors de la campagne 07-08, S2 a donné à la fois le plus élevé (en Labour) et le plus faible (en SCV).

Peu de différences étaient observées lors de la campagne 07-08, pour 2008-09 le système S2 se distingue. Par contre, le mode de gestion du sol ne semble pas avoir de l'influence sur le rendement en biomasse. Mais en tous cas, ces rendements se sont améliorés distinctement de la précédente campagne à celle 08-09.

Entre les deux fertilisations (FM et Fu), les différences de rendement restent toujours aussi significatives. Le traitement en fumure organique seulement produit moins de biomasse.

Tableau 11 : Biomasses totales hors grain obtenues sur les différents systèmes toutes fertilisations confondues (FM et Fu seulement) et sur les deux fertilisations tous systèmes confondus

Systèmes Fertilisation	Biomasse kg/ha Campagne 07-08	Biomasse kg/ha Campagne 08-09
S1 LAB	3337,8 ab	4332,1 b*
S1 SCV	3643,1 ab	4003,5 b
S2 LAB	4389,0 a	5576,6 a
S2 SCV	2904,8 b	5766,6 a
S3 LAB	3228,2 b	3771,9 b
S3 SCV	3010,7 b	4769,9 ab
FM	4336,4 a	5928,7 a
Fu	2501,5 b	3478,2 b

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

De meilleurs rendements sont observés cette campagne par rapport à la précédente, cela peut être lié avec de meilleures conditions climatiques, ainsi qu'un effet plus marqué des traitements (c'est la deuxième campagne avec ces traitements).

Un effet antagoniste plus ou moins marqué entre la production en maïs et celle en plantes associées est observé. Pour les systèmes S3 Lab et S3 SCV qui présentent les plus faibles rendements en grains et de bons niveaux de productions de biomasse peuvent s'expliquer par l'entrée du radis en compétition avec le maïs. Il en est de même pour le S2 SCV. Toutefois, un système comme le S2 Lab présente à la fois un des meilleurs rendements en maïs et en production de biomasse, Ce système apparaît comme l'un des plus intéressants, le S1 Lab vient à la suite.

Chapitre II : Comparaison de systèmes de culture en association de maïs et de plantes fourragères

2-1 Comparaison des systèmes au cours du cycle

La comparaison des systèmes au cours du cycle va porter uniquement sur l'évolution de la hauteur du plant de maïs. Cela nous permet d'estimer l'effet des différentes associations sur la croissance des plants.

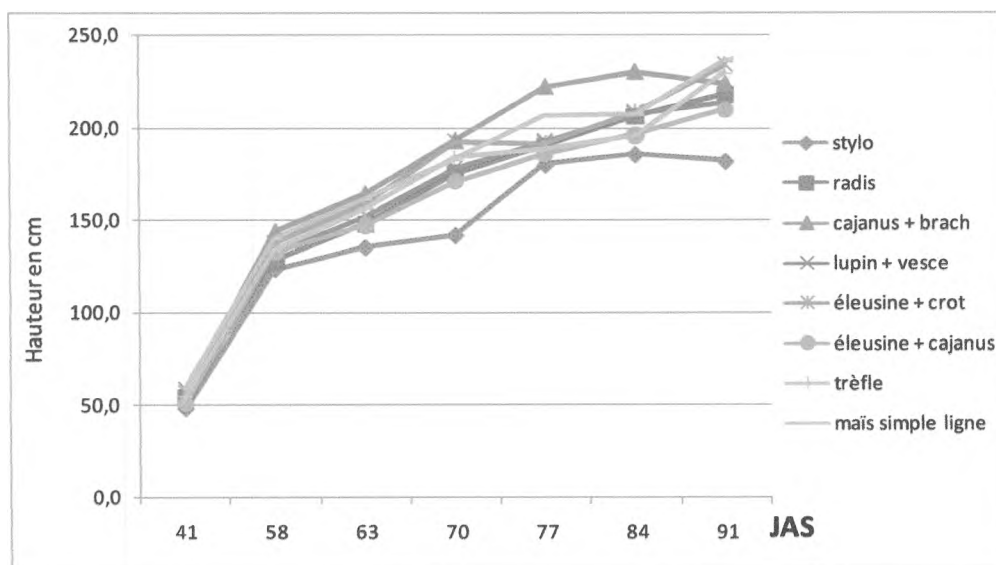


Figure 7 : Evolution de la hauteur des différents systèmes de 41 jours après semis jusqu'à floraison en FM

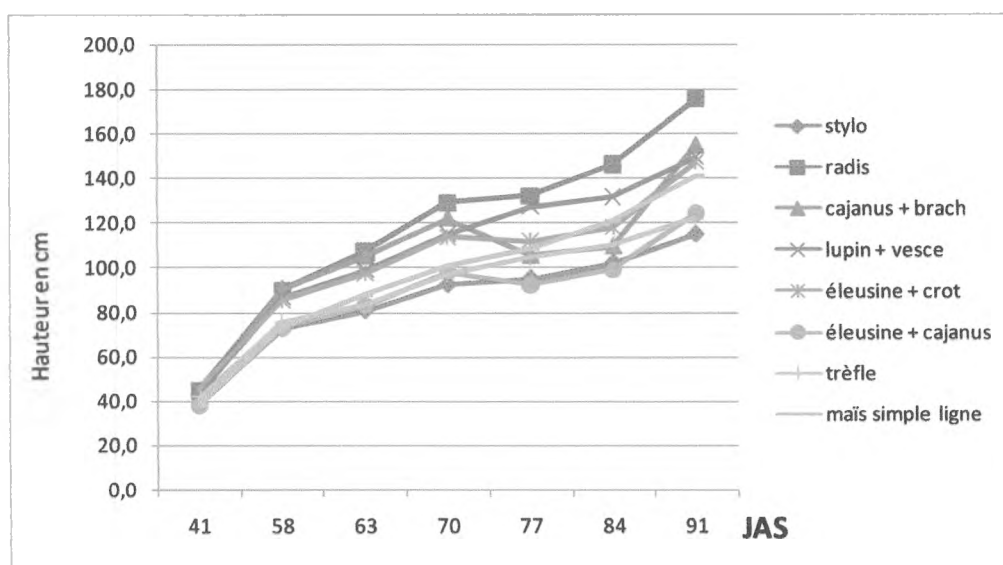


Figure 8 : Evolution de la hauteur des différents systèmes de 41 jours après semis jusqu'à floraison en Fu

D'après les figures 7 et 8, tous les systèmes ont presque la même hauteur au 41^{ème} jour après semis : 50 cm en FM et 40 cm en Fu. Du 58 au 91^{ème} jour après semis, les hauteurs du maïs évoluent ensemble au fur et à mesure du développement de la plante dans tous les systèmes sauf pour le stylosanthes. Les hauteurs sur les systèmes cajanus + brachiaria en FM et radis en Fu excèdent les autres momentanément.

Il est à noter que les hauteurs dans tous les systèmes sont supérieures à 200 cm avec la fertilisation minérale (FM), sauf avec le stylosanthes. Par ailleurs, la hauteur de ce dernier (180 cm) représente néanmoins celle maximale rencontrée en Fu, leur vitesse de croissance est faible. En somme, les résultats observés en fertilisation recommandée (FM) sont meilleur que ceux en fumure organique seule (Fu).

2-2 Comparaisons des productions

2-2-1 Comparaison des systèmes en terme de rendement en grain

Selon la figure 9, les traitements en FM donnent des rendements en grain largement supérieurs à ceux obtenus en Fu, de même pour tous les systèmes, exceptionnellement pour les systèmes : l'éléusine + crotalaire (R2), le trèfle (R7) et le maïs simple ligne (R8) qui donnent des rendements plus élevés par rapport aux autres. Ces valeurs sont en relation avec la hauteur en FM à 91^{ème} jour après semis. La bonne formation de leurs organes végétatifs leur a permis de donner les rendements les plus élevés. Le système avec stylosanthes (R1) offre le plus faible rendement.

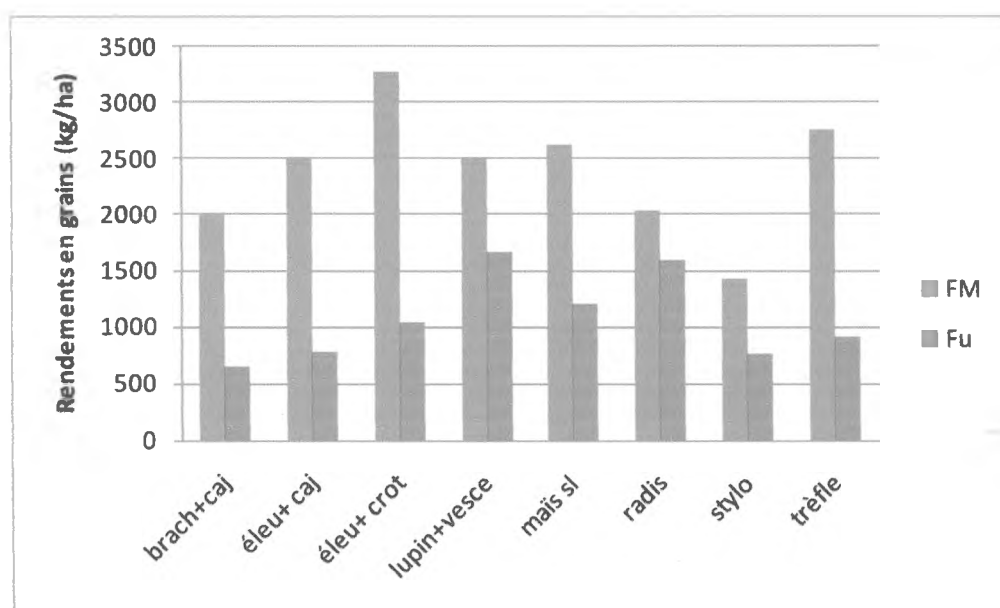


Figure 9 : Comparaison des rendements en grain par association et fertilisation

2-2-2 Comparaison des systèmes en terme de production de biomasse

Dans cette séquence, nous pourrions comparer les productions de biomasses : en fanes de maïs, en plantes associées et au total des biomasses hors grain de maïs.

2-2-2-1 Biomasses produites en fanes de maïs

D'après la figure 10, le traitement en fertilisation minérale recommandée (FM) produit plus de pailles de maïs que le traitement en fumure organique seule (Fu). Le classement de production de fane est identique à celui du grain, sauf pour le maïs simple ligne qui passe en quatrième position, juste après l'éleusine + cajanus. Ce résultat est de ce fait lié à l'évolution de la croissance des pieds de maïs : plus leurs hauteurs sont importantes, mieux ils produisent.

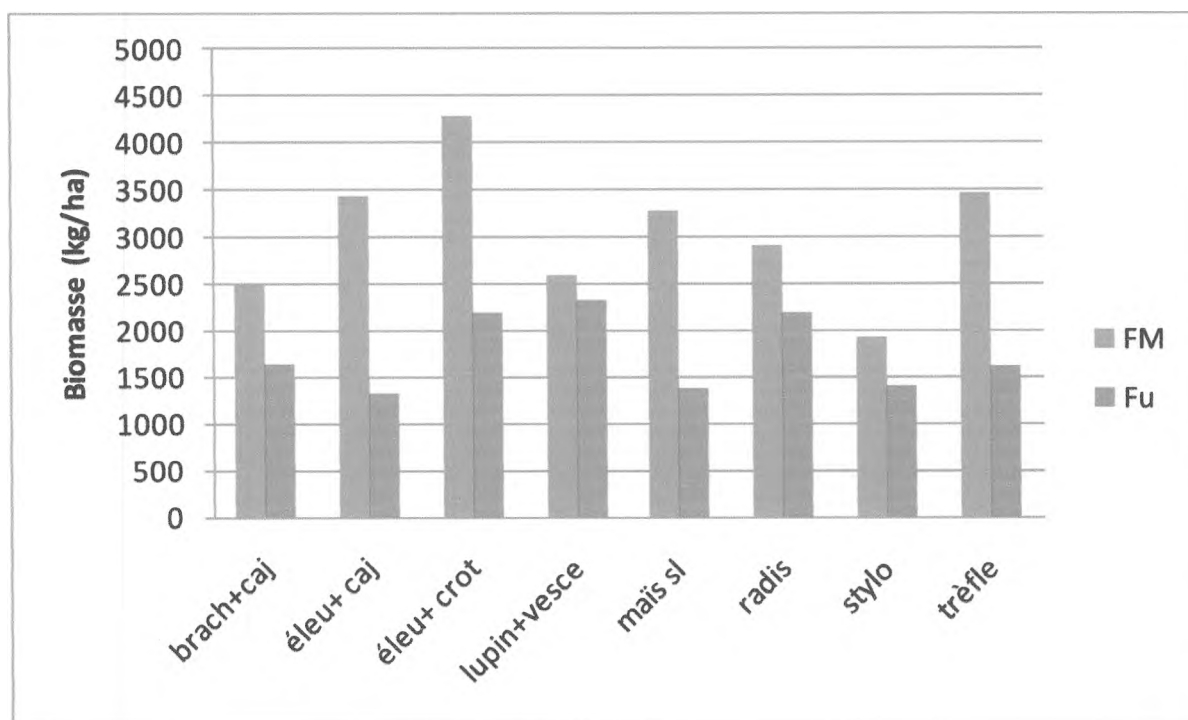


Figure 10 : Comparaison des biomasses produites en fanes de maïs

2-2-2-2 Biomasses produites par les plantes associées

La figure qui suit expose la production en biomasses des plantes associées au maïs dans chaque système. Pour les systèmes avec deux plantes de couverture à la fois, nous avons additionné leur poids. Les quantités de biomasses coupées durant le cycle, pour le brachiaria, sont incluses dans les résultats présentés ci-après.

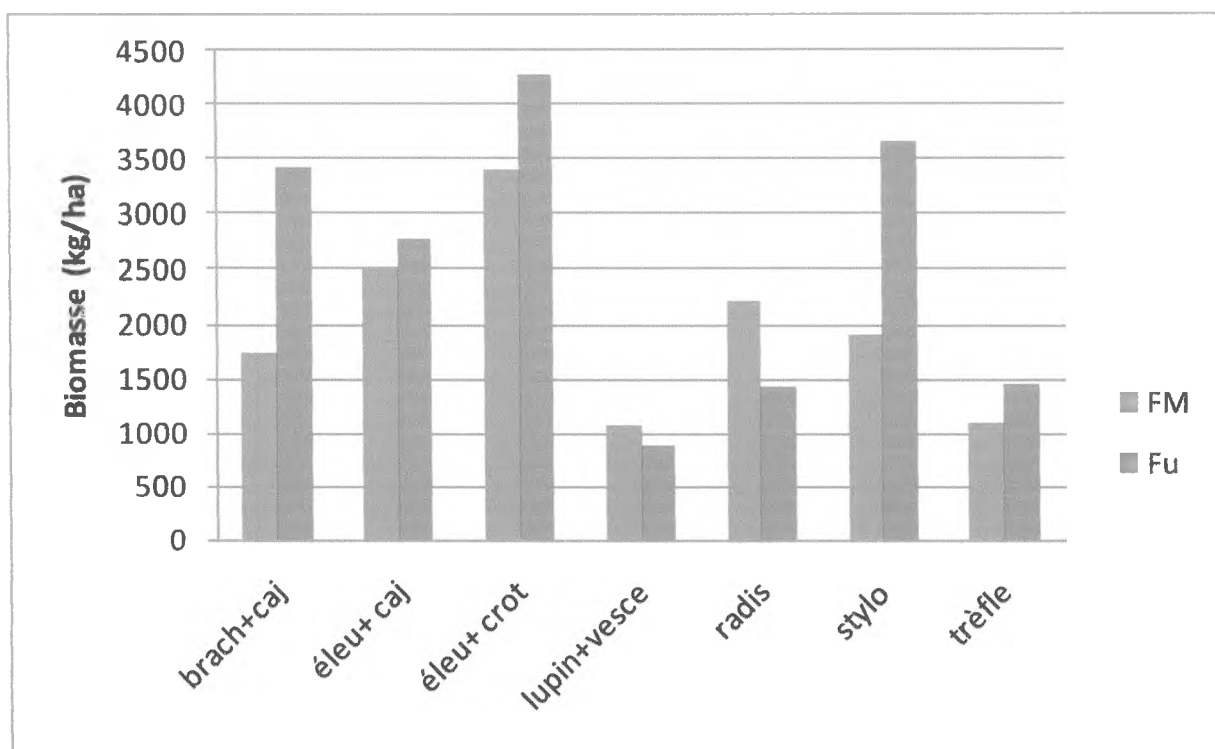


Figure 11 : Comparaison des biomasses produites par les plantes associées par association et fertilisation

La figure 11 nous montre que les plantes associées au maïs produisent généralement plus de biomasse en fertilisation organique (Fu) seule qu'en fertilisation minérale recommandée (FM), l'inverse de ceux obtenus pour le maïs. Sur les deux fertilisations, l'association avec éleusine + crotalaire est la plus productive, plus de 4000 kg/ha en Fu et 3500 kg/ha en FM. Les systèmes stylosanthes et brachiaria + cajanus en Fu viennent ensuite. L'association avec lupin + vesce qui donne la plus faible valeur peut s'expliquer par le retard de la récolte où les lupins étaient déjà à maturité et même secs et sans feuille. Par contre, les résultats obtenus dans les systèmes avec le trèfle sont dus au fait qu'il s'agit d'une plante rampante formant un tapis sur le sol.

2-2-2-3 Biomasses totales produites hors grain

En additionnant les biomasses produites en fanes de maïs avec celles des plantes associées, nous obtenons les biomasses totales hors grain qui suivent.

D'une manière générale, la figure ci-après montre une production plus élevée avec la fertilisation FM dans tous les systèmes sauf pour le brachiaria + cajanus et le radis. L'association avec éleusine + crotalaire offre les meilleurs rendements tant en FM qu'en Fu. Puis, celles produites en systèmes éleusine+cajanus et maïs simple ligne en FM et radis en Fu

viennent ensuite. Les productions en système trèfle sont les plus faibles en Fu suite au très faible poids de cette couverture.

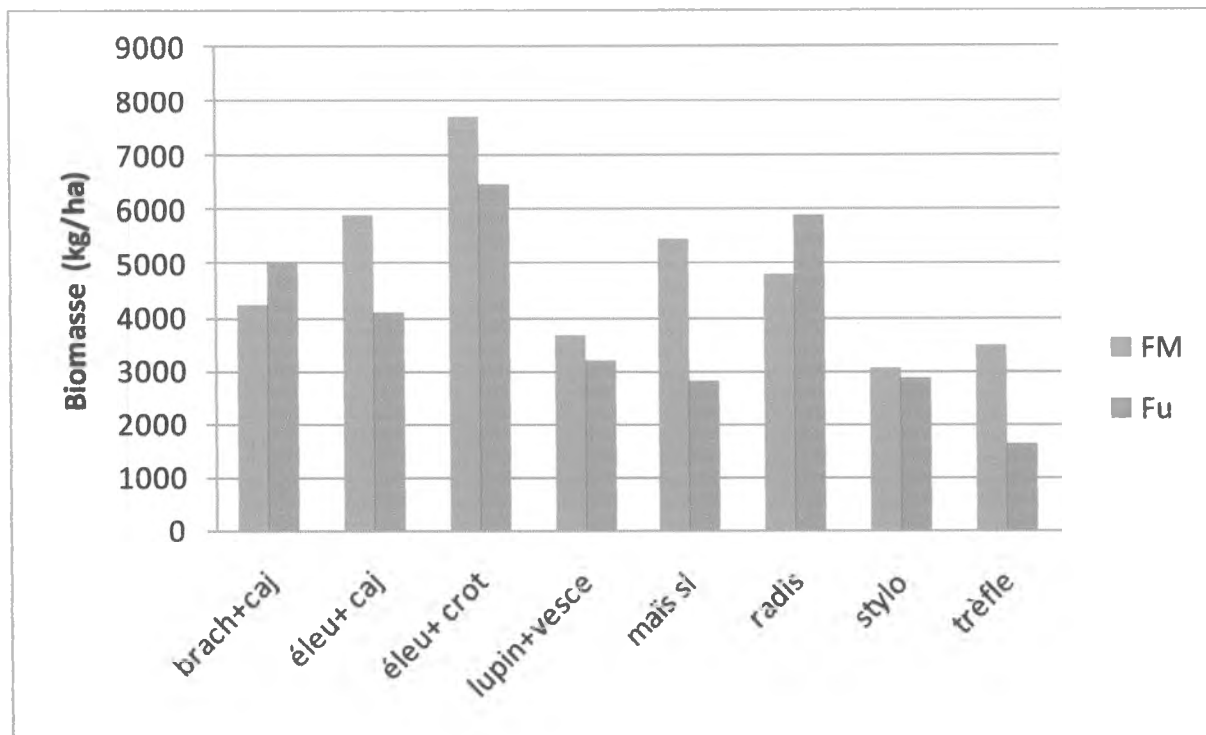


Figure 12 : Comparaison des biomasses totales produites hors grain

2-2-3 Analyse statistique

D'après le tableau 16, les meilleurs rendements en grain sur les différentes associations toutes fertilisations confondues sont obtenus dans les associations avec éleusine + crotalaire (2155,8 kg/ha) et lupin + vesce (2096,0 kg/ha). Par ailleurs, cette première association se distingue sur toutes les productions de biomasses : en fanes de maïs, en couvertures et en biomasse totale hors grain, respectivement avec les valeurs suivantes : 3247,7 kg/ha, 3846,8 kg/ha et 7094,5 kg/ha. La différence de ce système avec les autres est réellement significative. L'association semble être favorable aussi bien pour le maïs que pour les plantes associées. En outre, le maïs avec le stylosanthes a donné le plus faible rendement car ses valeurs au cours des mesures pendant le stade végétatif (hauteur) ont été faibles. De plus, le stylosanthes avait été installé depuis 2 ans sur les parcelles, ses racines ont dominé le profil cultural ce qui a défavorisé la croissance du maïs.

Le système avec brachiaria + cajanus présente aussi des valeurs très faibles de rendement maïs car le brachiaria est une graminée à grande potentialité de concurrence. D'ailleurs, il s'utilise aussi en SCV pour sa capacité à étouffer les mauvaises herbes. Les

écarts du rendement en grain de maïs pur avec ceux associés aux brachiaria + cajanus, éleusine + cajanus, radis et trèfle ne sont pas significatifs.

En fertilisation, les deux sont significativement différentes sur toutes les productions. FM présente les meilleures valeurs, cette tendance s'inverse pour la quantité de biomasse couverture. Concernant les biomasses de maïs, les plants ne trouvent pas assez de nutriments en fumure organique seule (Fu) qui est en voie de décomposition pendant le cycle.

Tableau 12 : Analyse statistique effectuée sur les diverses productions

Associations Fertilisation	Rendement grain kg/ha Campagne 08-09	Biomasse fane kg/ha	Biomasse couverture kg/ha	Biomasse totale hors grain kg/ha
Maïs + Eleu. + caj.	1644,2 ab*	2371,2 ab	2641,0 bc	5012,1 b
Maïs + Eleu. + crot.	2155,8 a	3247,7 a	3846,8 a	7094,5 a
Maïs + Brach. + caj.	1330,4 ab	2061,7 b	2589,0 bc	4650,7 bc
Maïs + Lup. + vesc.	2096,0 a	2459,7 ab	967,4 d	3427,0 cd
Maïs pur	1916,6 ab	2320,4 ab	0 e	2320,4 d
Maïs + radis	1814,8 ab	2560,4 ab	1815,3 cd	4375,7 bc
Maïs + stylo.	1087,4 b	1660,5 b	2785,7 b	4446,2 bc
Maïs + trèfle	1834,0 ab	2534,2 ab	1274,4 d	3808,7 bcd
FM	2399,2 a	3046,6 a	1738,8 b	4785,4 a
Fu	1070,6 b	1757,3 b	2241,1 a	3998,4 b

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

En somme, l'association la plus intéressante à la fois en terme de production de maïs et de biomasses est celle avec éleusine + crotalaire (grâce à la production de crotalaire).

Les associations avec des plantes qui peuvent être laissées sur plusieurs années (cas du stylosanthès, trèfle) ne semblent pas très intéressantes car elles sont longues à installer (elles ne produisent pas beaucoup de biomasse la première année) et peuvent entraîner trop de concurrence à la culture principale la deuxième année (cas du stylosanthès).

Toutefois, les rendements en maïs sont plus faibles que dans les grandes parcelles (différences de date de semis et/ou de maîtrise des semis).

Chapitre III : Evaluation des tests d'associations par l'Indice de Surface Equivalente (ISE)

L'Indice de Surface Equivalente (ISE) ou Land équivalent ratio (LER) calcule le rapport de surface équivalente. Il se définit par la surface relative de culture pure nécessaire pour produire le rendement ou la biomasse de la culture dans l'association.

3-1 Production en culture pure des plantes associées au maïs

En culture pure (fig 13), le radis fourrager qui est le seul dans son genre, produit plus de tubercule que de biomasse végétative. Il en de même pour l'éleusine qui produit de grain au lieu de tubercule. A propos de la biomasse végétative, le brachiaria et la crotalaire montrent les meilleures valeurs. Mais en production de biomasse totale, le brachiaria, l'éleusine et le radis donnent une production supérieure à 10 t/ha. Les valeurs les plus faibles sont représentées par le trèfle et la vesce.

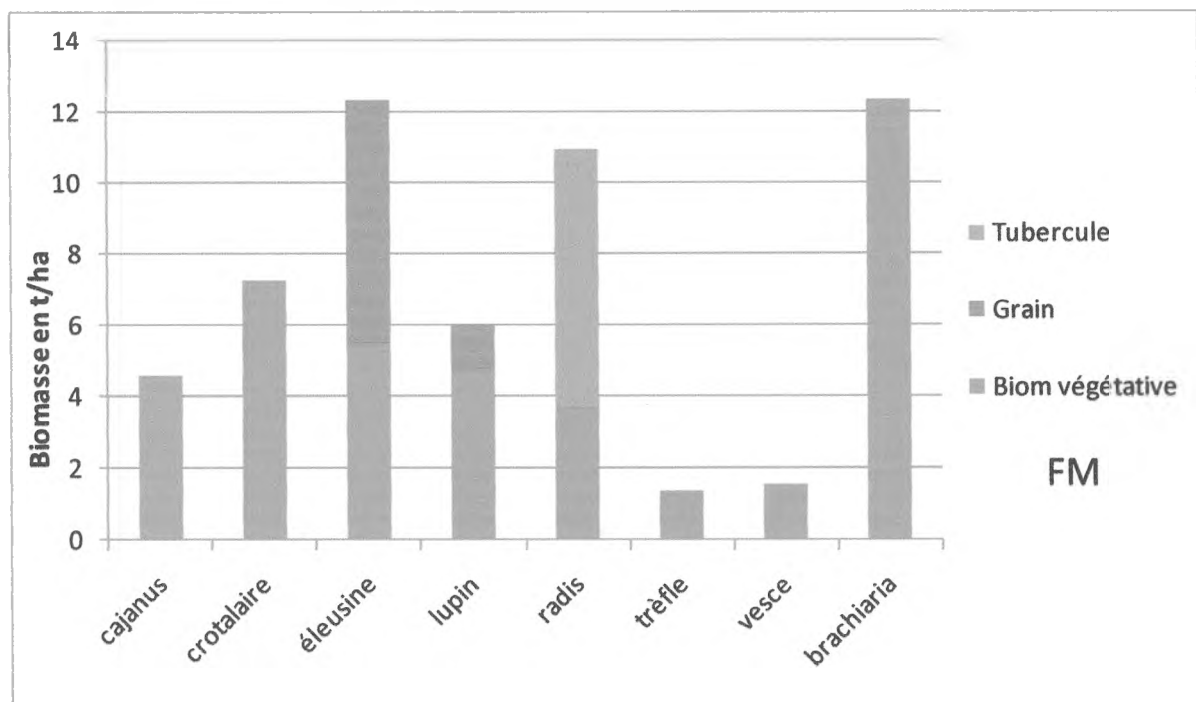


Figure 13 : Biomasses des plantes de couverture produites en culture pure (FM)

En fumure organique seule (fig 14), les rangs de chaque plante dans la production sont plus ou moins identiques à ceux obtenus dans les parcelles sous traitement FM. Le brachiaria et la crotalaire produisent toujours autant de biomasse végétative. Mais les facultés de l'éleusine et du radis ont un peu diminué. Les valeurs du trèfle et de la vesce restent encore les plus faibles.

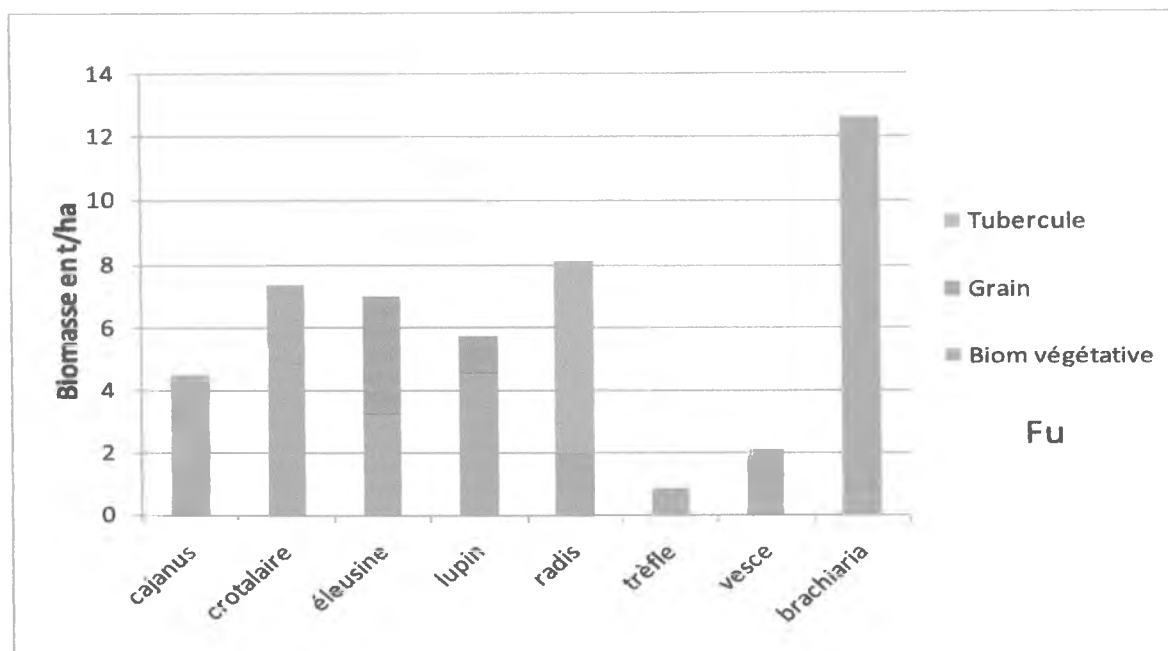


Figure 14 : Biomasses des plantes de couverture produites en culture pure (Fu)

3-2 Indice de Surface Equivalente ou ISE

Les ISE présentés ci-dessous ont été calculés à partir de la production globale de chaque association ou culture pure (biomasse végétative, grain et tubercule).

D'une façon générale, lorsque le ISE est supérieur à 1 l'association est meilleure que la culture pure. Par exemple, un ISE=2,6 (cas trèfle en Fu) signifie qu'il faudrait 2,6 ha en culture pure pour obtenir la même production globale que celle d'1 ha de l'association, ce qui montre que les deux plantes en association ne sont pas en compétition. D'après le graphe ci-dessous, les ISE les plus importants sont observés sur l'association du maïs avec le trèfle et l'éleusine + crotalaire en Fu comme en FM et avec le lupin + vesce en Fu. Seule l'association avec le brachiaria + cajanus en FM a une valeur inférieure à 1. Ceci s'explique par la capacité de développement rapide du brachiaria, il entre en compétition avec le maïs en l'étouffant. En culture pure, cette plante arrive à donner jusqu'à 12 t/ha aussi bien en FM qu'en Fu.

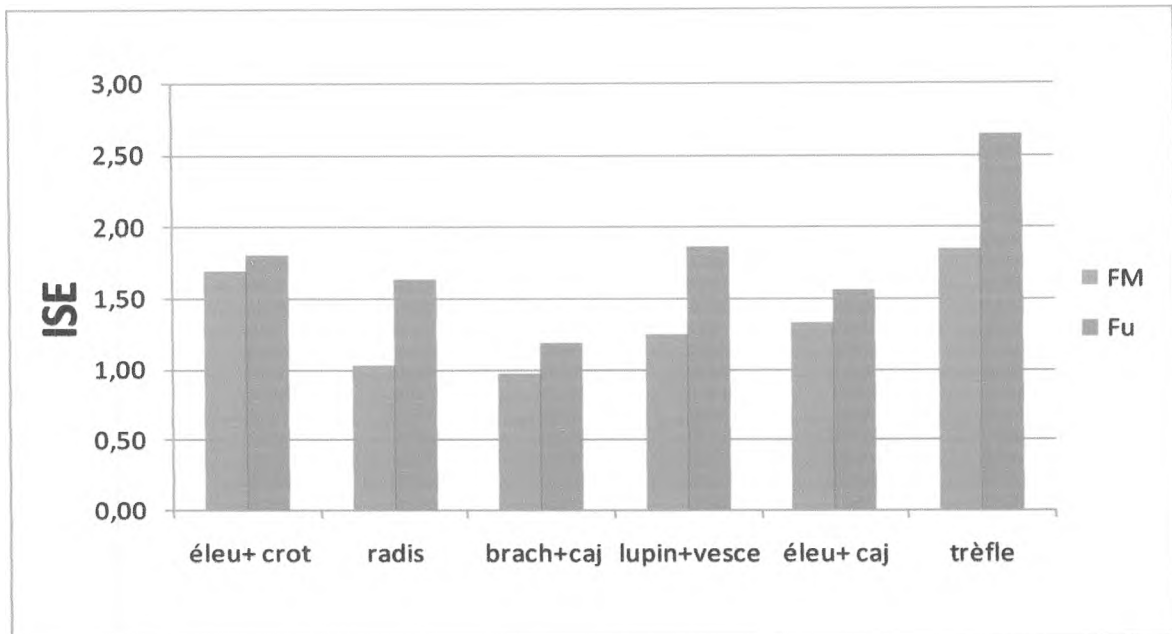


Figure 15 : ISE de l'association

Tous les ISE dans les parcelles de traitement en fertilisation minérale recommandée (FM) sont inférieurs à ceux en fumure organique seule Fu (fig 15). Cela s'explique par le fait que moins de compétition existe en Fu car il y a principalement moins de production végétative de maïs.

Afin de préciser ces résultats, la figure 16 nous montre la part de chaque culture (maïs et plantes associées) dans le ISE final de chaque association.

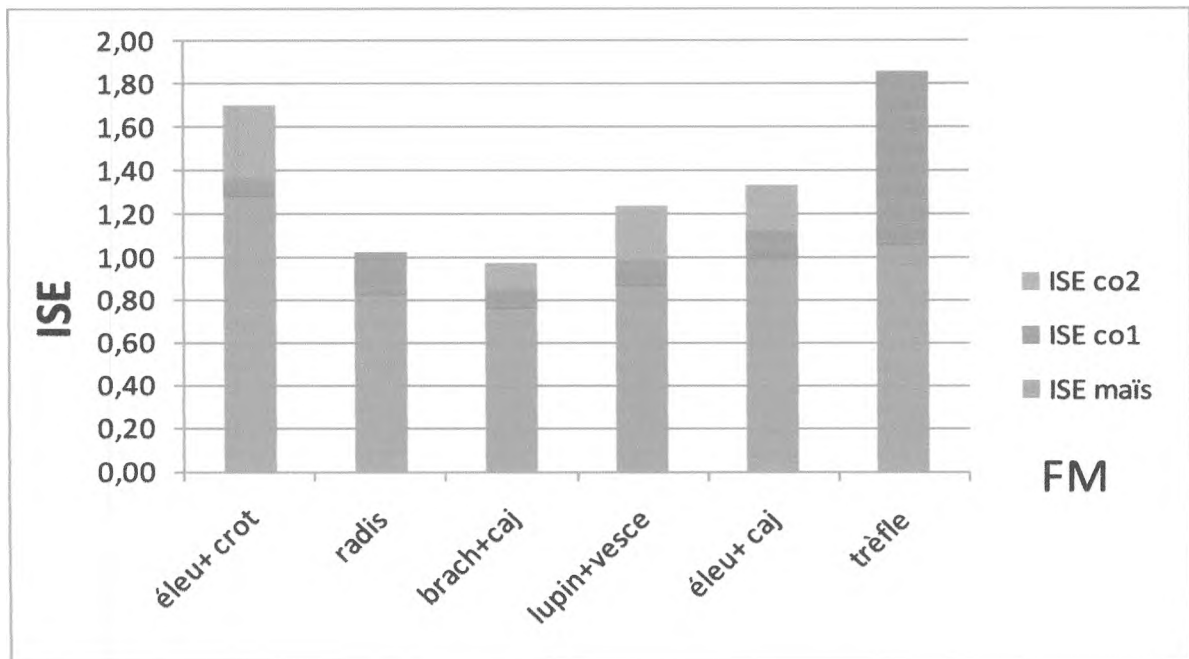


Figure 16 : ISE respectif de chaque plante en traitement FM

ISE co 1 : part de la première couverture dans le ISE

ISE co 2 : part de la deuxième couverture dans le ISE

Tableau 13 : Les couvertures 1 et 2

co 1	co 2
Eleusine	Crotalaire
Brachiaria	Cajanus
Lupin	Vesce
Eleusine	Cajanus

Source : Auteur, 2009

En FM (fig 16), à l'exception de l'association avec l'éleusine + crotalaire et celle avec le trèfle, la part du maïs dans le ISE est toujours inférieure à 1. A part ces deux associations, la production de la couverture est assez faible, ceci peut signifier que les plantes comprises dans les autres associations ont une forte concurrence entre elles.

En Fu (fig 17), le ISE du maïs pouvant dépasser 1 se rencontre sur trois associations : avec l'éleusine + crotalaire, le radis fourrager et le lupin + vesce. Le maïs semble apprécier leur association en Fu. Au sujet des parts des plantes associées, la figure 17 montre que le trèfle a pleinement pris avantage à l'association. Sa part dans l'Indice de Surface Equivalente est supérieure à 1,5, toutefois son installation a été plus difficile sur les parcelles en pur (retard de bouturage), ce qui a pu entraîner des différences de croissance entre pure et associée indépendamment du traitement. Le lupin et le cajanus ont des parts très faibles, cela peut s'expliquer par leur état physiologique. Le lupin est déjà au moment de la récolte en état de sénescence car il a déjà atteint sa maturité avant la récolte. Le cajanus est un arbuste, qui met un peu de temps pour s'implanter dans les conditions climatiques des Hautes Terres, et a donc été battu dans les divers aspects de compétitions existantes. Il faudrait sûrement rechercher des variétés de cajanus plus adaptées à ces conditions d'altitude.

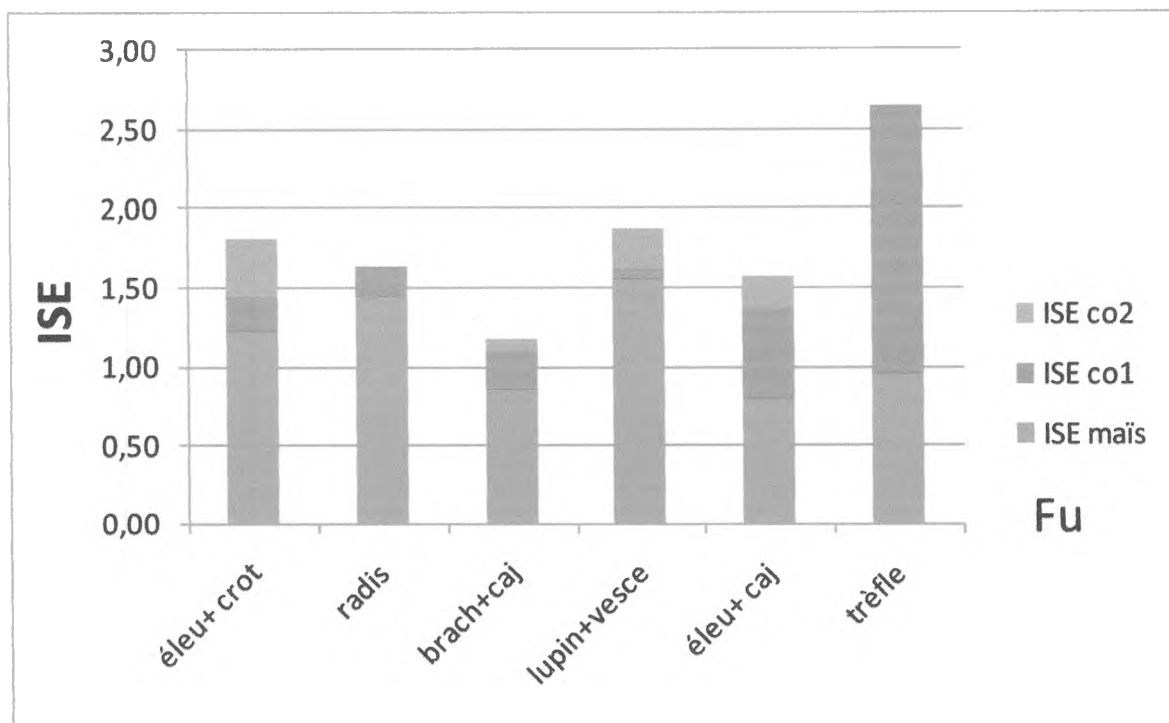


Figure 17 : ISE respectif de chaque plante en traitement Fu

En somme, ces résultats sur les ISE mettent en exergue la compatibilité des associations avec l'éleusine + crotalaire et le trèfle. Afin d'évaluer ces résultats, nous procédons à une analyse statistique de ces valeurs.

3-3 Analyse statistique

Au cours de cette campagne 08-09, le rendement du maïs est défavorisé par le stylosanthes, mais aucune différence entre les ISE n'est significative. Par ailleurs, les seules associations où la valeur du ISE du maïs semble surpasser la culture pure sont les associations avec l'éleusine + crotalaire, le lupin + vesce et le radis. Le maïs tire avantage de leur présence surtout pour la première. Mais en tous cas, statistiquement, aucune différence significative n'est observée.

Toutefois, les ISE totaux sont très révélateurs sur les divers tests. Toutes les associations s'avèrent favorables, soit $ISE > 1$. Le ISE en association avec le brachiaria + cajanus qui est 1,11 est la plus faible valeur. De toutes les valeurs, celle du trèfle (2,21) se distingue. Etant donné que la part du maïs dans le ISE est 0,97 : inférieur à 1, c'est le trèfle qui profite le plus de l'association avec le maïs. Des écarts sont aussi observés sur l'éleusine+crotalaire et le lupin+vesce, ce qui signifie que ces plantes sont plus favorables au maïs.

Tableau 14 : ISE pour le maïs et ISE total obtenus

Associations Fertilisation	ISE Maïs Campagne 08-09	ISE total
Maïs + Eleu. + caj.	0,89 a*	1,45 bc
Maïs + Eleu. + crot.	1,26 a	1,76 ab
Maïs + Brach. + caj.	0,84 a	1,11 bc
Maïs + Lup. + vesc.	1,21 a	1,54 abc
Maïs pur	1,00 a	1,00 c
Maïs + radis	1,19 a	1,38 bc
Maïs + stylo.	0,69 a	Non mesuré
Maïs + trèfle	0,97 a	2,21 a
FM	0,94 a	-
Fu	1,07 a	-

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

Sur les deux fertilisations toutes associations confondues, le ISE du maïs en Fu semble supérieur à celui en FM, mais la différence n'est pas significative.

Le calcul du ISE nous confirme que l'association la plus intéressante est celle avec l'éleusine + crotalaire, mais celle avec lupin et vesce sort du lot également et c'est l'association de 2 légumineuses.

CONCLUSION GENERALE ET SUGGESTIONS

Dans l'ensemble, tout notre travail montre l'importance du choix de l'association du maïs à d'autres cultures. Cette céréale se comporte bien en association de cultures. Pratiquement conçue afin de répondre à certaines contraintes de la zone d'étude (Vakinankaratra), cette étude a été menée pour promouvoir la sécurité alimentaire, par la production de grain de maïs (culture vivrière) et celle de l'alimentation de base des vaches laitières, tout en conservant le sol.

Effectuée au sein du dispositif expérimental de l'URP/SCRID se trouvant dans la commune rurale d'Andranomanelatra, l'étude a permis de montrer et de donner les meilleurs systèmes de culture en terme de rendement et/ou de biomasses produites :

✓ dans les grands systèmes : même si un effet antagoniste plus ou moins marqué entre la production en maïs et celle en plantes associées a été observé, le S2 Lab présente à la fois un des meilleurs rendements en maïs (2867,2 kg/ha) et en production de biomasse (5576,6 kg/ha), le S1 lab, en second, produit également de fort rendement. C'étaient aussi les deux meilleurs systèmes au cours de la précédente campagne. Ces systèmes représentent un intérêt majeur dans la continuation de cette recherche.

✓ dans les parcelles tests : l'association la plus intéressante à la fois en terme de production de maïs (2155,8 kg/ha) et de biomasses (7094,5 kg/ha) est celle avec éleusine + crotalaire (grâce à la production de crotalaire) et celle avec lupin + vesce vient ensuite. Apparemment, ce sont les plus favorables parmi toutes car elles répondent bien aux trois buts fixés. Elles donnent un rendement acceptable de maïs et suffisamment de biomasse susceptible d'être utilisée à la fois pour l'alimentation des vaches laitières (éleusine et vesce) et pour la couverture du sol (crotalaire et lupin).

D'une façon générale, le système labour a été plus convainquant que le SCV en terme de rendement. Mais en termes d'économie d'énergie et de temps, le SCV est le meilleur. En cette fin de saison froide (début de la prochaine campagne), beaucoup de plantes (vesce, crotalaire, cajanus, trèfle) continuent encore à se développer (récolte prévue mais manque de temps). Elles ont constitué une couverture permanente du sol empêchant ainsi le développement des adventices et épargnant le labour mécanique du sol pour la préparation de la prochaine campagne. Il suffit de les couper ou de les traiter à l'herbicide.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons donner des appréciations à chaque plante associée :

❖ les plantes annuelles : les graminées telles l'éléusine et l'avoine, ne concurrencent pas le développement du maïs. Ce sont des fourrages disponibles pour les vaches. Le lupin et la vesce sont deux légumineuses qui semblent s'accommoder avec le maïs. La première s'utilise uniquement en tant que couverture si on veut aller jusqu'à la maturité, et la seconde peut jouer à part cela un rôle fourrager. Par contre, le radis qui est une crucifère étouffe le maïs, il serait plus intéressant seulement dans la rotation pour ses propriétés insecticide et fourragère.

❖ les plantes vivaces : le crotalaire produit une bonne quantité de biomasse et ne semble pas défavoriser le maïs. Le brachiaria, par contre, entre en concurrence avec le maïs. Le cajanus ne se développe pas bien. Les associations avec des plantes perennes (cas du stylosanthès, trèfle) ne semblent pas très intéressantes car ces plantes demandent plus de temps pour s'installer (elles ne produisent pas beaucoup de biomasse la première année) et peuvent entraîner trop de concurrence à la culture principale la deuxième année (cas du stylosanthès).

En tout cas, les meilleures associations sont celles qui sont constituées d'au moins une composante légumineuse, qui a la capacité de fixer de l'azote atmosphérique et fait profiter la culture du maïs et d'une composante fourragère permettant l'exportation de biomasse pour l'alimentation animale.

Pour améliorer cette étude dans les prochaines campagnes, nous avons quelques suggestions qui méritent d'être prises en considération :

- un changement de variété de maïs car la variété de Tombontsoa utilisée actuellement ne donne qu'un épi par plant ;
- une étude plus approfondie sur les valeurs nutritionnelles des fourrages ;
- une étude plus accentuée sur les coupes d'exportation des fourrages ;
- l'utilisation possible des grains d'éléusine en alimentation humaine ;
- abandon du stylosanthès ;
- arrangement du dispositif pour que des parcelles en fertilisation FM+ (sur les bordures) soit soumis aux mêmes conditions que Fu ou FM.

Notre étude n'a été qu'une infime partie de la recherche sur le développement du maïs à Madagascar. Néanmoins, nous espérons qu'elle a pu contribuer aux efforts de chacun sur la recherche du meilleur système de maïs à adopter pour l'intégration avec l'élevage laitier.

BIBLIOGRAPHIE

- 1- AFD.- Le Semis Direct sur Couverture Végétale permanente : Une solution alternative aux systèmes de culture dans les pays du Sud.- Novembre 2006.- 64 p.
- 2- Camille CEDRA.- Les matériels de fertilisation et traitement des cultures : Technologies de l'agriculture.- Collection FORMAGRI, volume 4/5 1ère Edition.-1997.- 343 p.
- 3- CIRAD- GRET.- Mémento de l'agronome.- Editions du GRET, Editions du CIRAD, Ministère français des Affaires Etrangères.- France, décembre 2002.- 1691p.
- 4- Cours d'apprentissage agricole.- Les productions de l'agriculture : pâturage et cultures fourragères.- Formation : Inades.- Côte d'Ivoire, 1982 - 60 p.
- 5- C.BALDY, C.J.STIGTER.- Agro-météorologie des cultures multiples en régions chaudes.- INRA.- Paris, 1993.- 246 p.
- 6- Didier PICARD.- Physiologie et production du maïs.- INRA.- Paris, 1991.- 501 p.
- 7- Dominique SOLTNER.- Les bases de la production végétale : Le sol et son amélioration (Tome I).- 24ème Edition.- 2005.- 472 p.
- 8- Encyclopédie Microsoft Encarta, 2009.
- 9- Fanomezantsoa ANDRIAMAMPIRAY.- PCD Commune rurale Andranomanelatra.- Mars 2003.- 39 p.
- 10- FIFAMANOR et al.- Guide pour les Hautes Terres de Madagascar : Conduite des systèmes de culture sur couverts végétaux et affouragement des vaches laitières.- Antsirabe, Mai 2008.- 90 p.
- 11- FIFAMANOR.- Rapport d'activité 2008.
- 12- G. LE THOMAS.- Employe du fumier pour toutes vos cultures.- Edition ARMA.- Paris 8ème, 1995.- 22 p.
- 13- Guy ROUANET.- La technique d'agriculture tropicale : le maïs.- Maisonneuve & Larose.- 1997.- 142 p.
- 14- IBRAHIM Nahal.- Principes d'agriculture durable.- Edition ESTEM.- 1998.- 121 p.
- 15- Jean Patrick LAFON, Catherine TARAUD- PRAYER et al.- Biologie des plantes cultivées : Organisation- Physiologie de la nutrition.- 2ème édition Tome I, Lavoisier TEC & DOC.- Londres, Paris, New York, 1996.- 233 p.
- 16- Jean Patrick LAFON, Catherine TARAUD- PRAYER et al.- Biologie des plantes cultivées : Physiologie du développement, génétique et amélioration.- 2ème édition Tome II, Lavoisier TEC & DOC.- Londres, Paris, New York, 1998.- 149 p.

- 17- L. Combe, D. Picard.- Elaboration du rendement des principales cultures annuelles.- INRA.- Paris, 1994.- 191 p.
- 18- L. Seguy, RAKOTONDRAMANANA et al.- Le Semis Direct sur Couverture Végétale.sd Permanente : Enjeu et potentiel pour une agriculture durable à Madagascar.- CIRAD/ GSDM.
- 19- L. SEGUY, S. Bouzinac et al.- Choix des plantes de couverture : Thèmes scientifiques, critères et méthodes.- CIRAD CA- GEC.- 1998.
- 20- MAEP.- Recensement de l'agriculture, campagne 2004- 2005.- Madagascar, Janvier 2008.
- 21- Michel VILAIN.- La production végétale : Les composantes de la production, Volume 1.- 3ème édition : Agriculture d'aujourd'hui, Sciences, Techniques, Applications.- Londres, Paris, New York, 1997.- 478 p.
- 22- Michel VILAIN.- La production végétale : La maîtrise technique de la production.- 2ème édition Volume 2 : Agriculture d'aujourd'hui, Sciences, Techniques, Application.- Londres, Paris, New York, 1997.- 449 p.
- 23- Michel VILAIN.- Méthodes expérimentales en agronomie : Pratique et analyse. Technique et Documentation.- 1999.- 337 p.
- 24- Olivier HUSSON et RAKOTONDRAMANANA.- Mise au point, évaluation et diffusion des techniques agro- écologiques à Madagascar.- CIRAD, GSDM, Collection EDITECH.- Madagascar, Octobre 2006.- 67 p.
- 25- Paliwal RIPUSUDAN.- Le maïs en zones tropicales : amélioration et production. FAO.- Rome, 2002.- 382 p.
- 26- P. RAKOTONDRALAMBO.- Création, formation et appui à la diffusion pour des systèmes de culture en semis direct sur couverture permanente des sols dans différentes écologies de Madagascar.- ONG TAFA.- sd.
- 27- PHILIPPE Duchaufour.- Introduction à la Science du sol : sol, végétation, environnement.- 6ème édition de l'Abrégé de pédologie.- Janvier 2001.- 331p.
- 28- RABEZANDRINA René.- Manuel de pédologie Malagasy.- Département Agriculture.- ESSA, Antananarivo, 2000.- 93p.
- 29-République Française, Ministère des relations extérieures et al.- Cultures associées en milieu tropical : élément d'observation et d'analyse.- édition GRET.- Paris, 1982 - 75 p.
- 30- Roger DOUCET.- Science agricole : climat, sol et productions végétales du Québec.- 2ème édition.- Décembre 1997.- 699 p.
- 31- UPDR MAEP.- Monographie de la région du Vakinankaratra.- MAEP Madagascar, juin 2003.- 107 p.

CYBEROGRAPHIE

<http://agroecologie.cirad.fr/pdf/992642458.pdf>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Vakinankaratra>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Ma%C3%AFs>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89leusine>

<http://photosynthese.fr/plantes/plante-6113-cajanus-cajan.htm>

<http://www.rfi.fr/sciencefr/articles/099/article.asp>

http://fr.wikipedia.org/wiki/Rotation_culturale

ANNEXE

Annexe I : Relief et hydrologie dans la région du Vakinankaratra

1- Relief

Son relief se distingue par une altitude élevée, et elle est dominée par des sols volcaniques comprenant plusieurs bassins aménagés : Ambohibary et Faratsiho.

Cette région s'identifie aussi à trois ensembles naturels :

- Le Centre est caractérisé par le massif volcanique de l'Ankaratra où se trouve le plus haut sommet des régions centrales de Madagascar, le Tsiafajavona qui culmine à 2 644 mètres;
- Au sud, la constitution de l'Ankaratra a provoqué dans la partie occidentale une série d'effondrements favorisant la formation de dépressions à fond alluvial et présentant de nombreux cratères et lacs. La zone méridionale, dominée par la chaîne de l'Ibity est constituée d'une succession de cuvettes aux sols sableux, jonchées de blocs de quartzite de toutes tailles ;
- Le Moyen Ouest du Vakinankaratra est constitué par la pénéplaine de Mandoto-Ramaritina où l'altitude s'abaisse à 1 000 m.

2- Hydrologie

La Mahajilo et ses affluents (la Mania, la Kitsamby, la Sakay), ainsi que le Bas Mangoro et son affluent (Onive), traversent la région du Vakinankaratra. Dans l'ensemble, le réseau hydrographique semble dense et assez hiérarchisé. Ainsi, les fleuves Onive et Manandona sont les plus exploités en Agriculture.













Annexe II : Information supplémentaire sur le maïs

1- Importance au niveau mondial

Le maïs est la céréale la plus cultivée au monde, la production de grains devant légèrement celles du riz et du blé. Sa culture concerne près de 150 pays dans les cinq continents, du 50e degré de latitude nord au 50e degré de latitude sud et du niveau de la mer à plus de 3 000 mètres d'altitude [Guy Rouanet, 1984].

Cultivé sur 145,0 millions d'hectares, la production mondiale en maïs a atteint les 709,4 millions de tonne en 2005. Les deux premiers producteurs, États-Unis et Chine, représentent près de 60 % du total mondial, 40 % pour les premiers et 20 % pour la seconde. En Europe, la France, l'Italie et la Roumanie sont les principaux pays producteurs. Les exportations mondiales représentent environ 100 millions de tonnes, soit 14 % de la production.

Tableau 1 : Production mondiale

2005	Production millions de tonnes	Surface cultivée millions d'hectares	Rendement quintaux/hectare
 États-Unis	282,3	30,4	92,9
 Chine	139,5	26,8	52,0
 Brésil	35,1	11,5	30,5
 Argentine	20,5	2,8	73,7
 Mexique	18,0	6,6	27,3
 Inde	14,7	7,8	14,9
 France	13,8	1,7	83,7
 Indonésie	12,0	3,5	34,3
 Afrique du Sud	11,7	3,2	36,5
 Italie	10,5	1,1	93,5
 Roumanie	10,4	2,6	39,8
 Canada	9,5	1,1	86,3
Monde	709,4	145,0	48,9

Source : Faostat

Quintaux : masse de 100 kg

En 2007/08, la production mondiale s'est même hissée à près de 800 millions de tonnes du fait notamment d'une récolte américaine record à plus de 330 millions de tonnes.

2- Valorisation

Cette culture céréalière, très largement cultivée pour son grain, s'utilise aussi bien en alimentation humaine qu'animale. Au niveau mondial, les deux tiers du maïs produit sont utilisés pour l'alimentation animale, 27 % pour l'alimentation humaine. Il existe néanmoins de fortes disparités entre les continents. En Europe de l'Ouest, la totalité du maïs ensilage et environ 80 % du maïs grain sont utilisés pour l'alimentation animale (bovins, aviculture et élevage de porcs). L'essentiel des 20 % du maïs grain restant est utilisé en amidonnerie et semoulerie. Par contre, depuis les années 1900, cette plante est devenue une importante culture vivrière dans beaucoup de pays d'Afrique. Pendant les périodes de soudures, elle constitue un complément d'aliment important à Madagascar.

a- Alimentation humaine

Il est consommé soit sous forme de graines entières (séparées ou sur épi), soit réduit en farine et préparé sous forme de bouillies ou de galettes cuites. La chicha des Amérindiens est une boisson fermentée à partir du maïs. Il s'utilise aussi sous forme de fécule, ou amidon de maïs. Chacun mange du maïs à sa façon. Dans les pays occidentaux, il se consomme comme un légume, 1 kg/an. Par contre, les Américains en mangent environ 7 kg/an. De même, c'est un aliment de base en Afrique et à Madagascar, le maïs est consommé grillé sur un feu de bois ou de charbon, et aussi sous forme de bouillies ou de couscous.

b- Alimentation animale

La plante entière peut être consommée par le bétail comme fourrage frais ou sec ou comme ensilage. Il se prête bien à ce dernier grâce à la teneur élevée en sucre dans la tige. Mais, la teneur assez faible du maïs en protéines, démontrée dans le tableau de la table des valeurs alimentaires des fourrages, oblige à avoir recours à des compléments plus riches en azote. Le tourteau d'arachide est une des composantes de la ration pouvant combler ce manque [FIFAMANOR et al, 2008].

3- Variété cultivée à Madagascar

A Madagascar, beaucoup de variétés de maïs ont été créées ou introduites, cinq seulement sont recommandées. Le tableau ci-après expose les différentes variétés correspondant à chacun des deux types ci-dessus.

Tableau 2 : Les variétés recommandées

Variétés	Durée du cycle (jours)	Caractères
383	120 j au Lac Alaotra (750 m) 130 j vers 1500 m d'altitude 145 j vers plus de 1500 m	Grande taille, grains dentés, cornés blancs et jaunes, adaptée aux régions des Hautes Terres, Moyenne Ouest et Lac Alaotra
374	115 j au Lac Alaotra 130 j vers 1000 m	Tolérant aux maladies foliaires, grains jaunes dentés, cornés, assez grandes tailles
IRAT 200	100 à 120 j	Grains jaunes, dentés, taille pas trop grande, s'adapte à toutes les conditions agro-climatiques de Madagascar
IRAT 290	110 j	Précoce, adapté dans les Hautes Terres
IRAT 218	120 j	Cycle moyenne, productif

Source : MAEP, 1998

La plus cultivé sur les Hautes Terres est le 374, variété connue sous le nom de Meva. Par contre, IRAT 200 est la plus utilisée à Madagascar, variété adaptée à divers milieux.

4- Culture

Le maïs se multiplie uniquement par semis des graines. La pratique culturale dépend de l'opérateur, le semis se fait à la volée, en ligne ou en poquet. La densité de semis est un élément important. Elle correspond à 15 à 25 kg de graines à l'hectare en culture pure et à quelques kilogrammes, jusqu'à 10 en culture associée. Les semences devront être saines pour garantir le meilleur développement des plantes. Et avant tout, la préparation du sol est requise afin de recevoir et conduire la culture.

4-1 Préparation du sol et fertilisation

Le sol doit être ameubli à une profondeur suffisante, si possible à 20 ou 25 cm, après enfouissement d'une fumure organique ou phospho-potassique. Une reprise de labour, suivie

d'une préparation du lit de semences sera effectuée avant le semis. Une des pratiques les plus importantes pour la réussite d'une préparation du sol est la fertilisation.

La fertilisation consiste à apporter à la plante les quantités d'éléments qu'elle n'est pas en mesure de trouver dans le sol au bon moment ou en quantité suffisante. De ce fait, il y a deux types de fumure : de fond et d'entretien. En effet, les besoins du maïs en éléments minéraux ne sont pas constants tout le long de la culture : faibles au début, ils croissent rapidement pour enfin atteindre le maximum [Guy Rouanet, 1984]. Leur absorption est surtout intense dans la période de croissance rapide, épiaison et floraison, pendant un laps de temps relativement court. Le tableau suivant nous montre la dynamique de l'accumulation de la matière organique et la consommation des principaux éléments nutritifs par le maïs. Elle est exprimée en pourcentage du maximum.

Tableau 3 : Consommation des principaux éléments

Phase de croissance et développement	Matière sèche	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
4-5 feuilles	0,1	0,3	0,2	0,2
9-10 feuilles	1,2	4,2	2,5	4,4
Apparition des panicules	24	44	33	69
Floraison	35	61	61	79
Stade laiteux	80	89	88	95
Stade pateux	100	100	94	100
Maturité complète	94	93	100	82

Source : P. SMIRNOV et al, 1977

La fumure azotée exerce une bonne influence sur la croissance végétative et la récolte de maïs. La fumure phosphorée agit favorablement sur le développement des organes reproducteurs des plantes. Elle accélère la formation et la maturation du grain et favorise la croissance et le développement des racines. La forte croissance de la masse végétative du maïs exige une fumure potassique suffisante. Le maïs ne donne généralement de bonnes récoltes que si les plantes sont suffisamment pourvues en éléments nutritifs.

Le maïs répond bien à l'apport de fumier et d'autres engrais organiques. En effet, l'apport de doses moyennes de fumier peut accroître la récolte de grain de maïs de 3 à 10 q/ha. Quand la norme de fumier apporté est augmentée, la récolte s'accroît, surtout sur les sols peu fertiles.

L'association de fumier et d'engrais minéraux assure de bonnes productions avec de moindres doses de fumier [P. SMIRNOV et al, 1977].

Les engrais organiques (fumier, composts) et une grande partie des engrais minéraux sont épandus sous labour avant le semis, c'est la fumure de fond. Normalement, le fumier, bien décomposé, à incorporer dans le sol varie de 5 à 10 t/ha. Pour les engrais minéraux, 200 kg/ha environ de NPK est préconisé. Une fertilisation tardive, dite fumure d'entretien, est épandue en cours de culture, en fonction de la demande des plantes, généralement 110 kg/ha d'urée à la montaison [DRDR, 1989].

4-2 Entretien

Un démariage de un à deux plants par poquets s'impose au stade de 3 à 4 feuilles. Les sarclages sont des opérations indispensables pour le maïs. Souvent, le premier se fait peu de temps après la levée, à 10 jours. Un deuxième, associé parfois à un léger buttage aura lieu à la montaison.

4-3 Récolte

La récolte est fonction du type de culture, donc des organes à obtenir. Elle peut se faire manuellement ou mécaniquement, mais chez les paysans, exclusivement à la main.

Le maïs doux est récolté à 70-72 % d'humidité après environ 90 jours de culture et vendu en épis frais [http://www.agpm.com/toutsavoir/maïs_plante.php].

Le maïs grain est récolté à un taux d'humidité compris entre 25 % et 35 %, quand les spathes de l'épi ont jauni et que les feuilles sont en voie de dessèchement. Le grain est ensuite séché pour atteindre 15 % d'humidité avant d'être stocké ou commercialisé.

Le maïs fourrage se récolte lorsque la teneur en matière sèche de la plante entière est comprise entre 32 et 35 %, à l'état pâteux des grains. Après le broyage, on passe à l'ensilage qui doit se faire dans un local à l'abri de l'air et de la lumière.

Tableau 4 : Calendrier agricole du maïs hybride dans les hautes terres de Madagascar (DRDR)

Préparation du sol	Semis	Entretien	Récolte
Octobre- Novembre	Novembre- Décembre	Décembre- Janvier	Mars- Avril

Source : DRDR

Annexe III : Le haricot

1- Origines

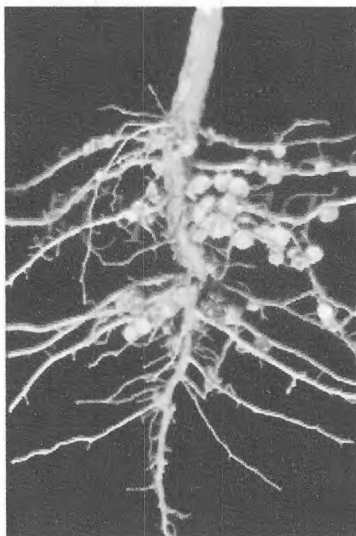
Originaire d'Amérique Centrale et du Sud, le haricot a été domestiqué au Mexique, au Pérou et en Colombie, puis introduit en Europe par Christophe Colomb. Il se cultive généralement dans les pays tropicaux et subtropicaux [DEBOUK Daniel G, 1987].

2- Morphologies

C'est une plante annuelle, grimpante ou buissonnante, légèrement pubescente. Les inflorescences, axillaires ou terminales sont blanches, roses ou pourpres. La longueur des gousses varie selon les variétés : vertes lorsqu'elle est immature et devient ensuite jaune, rougeâtre ou pourpre. Les graines, dicotylédones, sont très diversifiées en forme et en grandeur [HOWARD Potto, 1987]. Du point de vue de la culture, on distingue deux grandes catégories : les haricots à rames donc volubiles et les haricots nains [Microsoft Encarta 2009].

3- Caractéristiques

Le haricot ou *Phaseolus vulgaris* est une plante de la famille des légumineuses à tige herbacée, cultivée pour ses graines et ses gousses comestibles [Microsoft Encarta 2009]. Il en existe des centaines de variétés groupées en trois catégories : les haricots à filets, les haricots mangetout (à cosse verte) ou beurre (à cosse jaune) et les haricots à écosser.



Comme toutes les légumineuses, le haricot est capable de fixer de l'azote atmosphérique. En effet, l'association entre Rhizobium et les légumineuses est qualifiée de symbiose de type mutualiste. Une symbiose, c'est une association étroite entre deux espèces différentes. La symbiose est qualifiée de mutualiste lorsque les deux espèces tirent un avantage de leur association. Lorsque les Rhizobium s'associent aux racines d'une légumineuse, la plante réagit en formant des nodules caractéristiques. C'est un bon précédent cultural pour les graminées.

Photo 1 : Nodules

Source : <http://www.notesnutrition3.htm>

Son cycle végétatif est très court. La récolte se fait, suivant les variétés, deux mois et demi à trois mois après le semis pour la récolte en grains secs, mais commence à partir de 40 jours pour la récolte en gousses immatures.

Annexe IV : Notion sur l'élevage laitier dans le Vakinankaratra

1- Situation et contraintes de la production laitière

Depuis plus d'une trentaine d'années, des efforts sont déployés par le FIFAMANOR pour le développement de la production laitière. Des résultats pertinents ont été obtenus et diffusés dans diverses composantes de l'élevage laitier, notamment la conduite de l'élevage et surtout l'alimentation en se basant particulièrement sur des fourrages de qualité.

Malheureusement, plusieurs contraintes freinent depuis longtemps l'intensification de l'élevage, dont notamment celle de l'alimentation du bétail qui est fonction des conditions existantes : le professionnalisme des producteurs et/ou leurs moyens souvent faibles. En effet, un animal productif a deux types de besoins : d'entretien et de production. Le besoin d'entretien correspond à toutes les dépenses nécessaires pour sa survie : respiration, maintien de la température, renouvellement des tissus. Et celui de production fait référence à toutes les autres fonctions de l'animal comme la production de lait, le travail, la croissance, la gestation, la production de viande et la constitution de réserves. Par conséquent, la ration quotidienne à distribuer doit arriver à couvrir les besoins journaliers de l'animal, sachant qu'une alimentation insuffisante ou un déséquilibre entre les nutriments influent directement sur la production et la composition du lait [Guy CHARRON, 1986].

Malgré l'augmentation continue de la production globale de lait, la production par vache de la région reste encore très faible : 2 485 l/vache/an en 2006. En réalité, malgré les efforts déployés, l'élevage laitier reste semi-intensif à 90 % dans le triangle laitier.

En plus, la surface d'exploitation étant limitée, la plupart des paysans donnent généralement priorité aux cultures vivrières aux dépens des fourrages. Il semble alors qu'il y ait concurrence entre agriculture vivrière et élevage laitier [FIFAMANOR et al, 2008].

Concernant celles de la dernière année, Antsirabe présente la plus grande superficie fourragère, puis Antanifotsy et Faratsiho. Par contre, pour les surfaces destinées à la production de semences et de souches, Faratsiho affiche les plus importantes. Le tableau ci-dessous résume ces écrits, ils sont montrés par zone d'intervention du FIFAMANOR dans la région.

2- Tableau de recensement

Tableau 5 : Répartition par zone des surfaces fourragères

Zone \ Surface (ha)	Surface fourragère existante	Surface existante pour la production de semences fourragères	Surface utilisée pour la production de souches fourragères
Antsirabe	1 768	8	3
Antanifotsy	800	26	8
Betafo	150	4	2
Soanindrariny	93	2	1
Faratsiho	517	86	23
Ambatolampy	342	12	3
Total	3 670	138	40

Source : FIFAMANOR (rapport d'activité 2008)

Tableau 6 : Elevage laitier dans le Vakinankaratra

Indicateur	Total	A/be	An/tsy	B/fo	Soa/ny	Fa/ho	Am/py
Eleveurs laitiers recensés (nbre)	13 332	2 730	1 904	1 034	924	5 122	1 619
Vaches recensées (nbre)	19 709	4 740	2 462	1 936	2 041	6 660	1 870
Jeunes femelles recensées (nbre)	15 716	4 082	2 136	1 693	574	5 779	1 452
Taureaux géniteurs recensés (nbre)	50	17	14	5	5	5	4
Lait produit estimé (litre)	44 998 940	21 468 660	4 938 370	4 751 160	1 792 800	9 739 150	2 308 800
Lait passant dans le circuit de collecte (litre)	28 272 000	14 221 000	3 785 000	3 760 000	1 537 000	3 662 000	1 307 000

Source : FIFAMANOR (rapport d'activité 2008)

Tableau 7 : Production des trois dernières années

Indicateur	2006	2007	2008
Eleveurs laitiers recensés (nbre)	13 015	12 736	13 332
Vaches recensées (nbre)	22 497	21 299	19 709
Jeunes femelles recensées (nbre)	-	-	15 716
Taureaux géniteurs recensés (nbre)	-	-	50
Lait produit estimé (litre)	31 725 300	35 673 700	44 998 940
Lait passant dans le circuit de collecte (litre)	19 234 300	21 511 600	28 272 000

Source : FIFAMANOR (rapport d'activité 2008)

3- Les races bovines à Madagascar

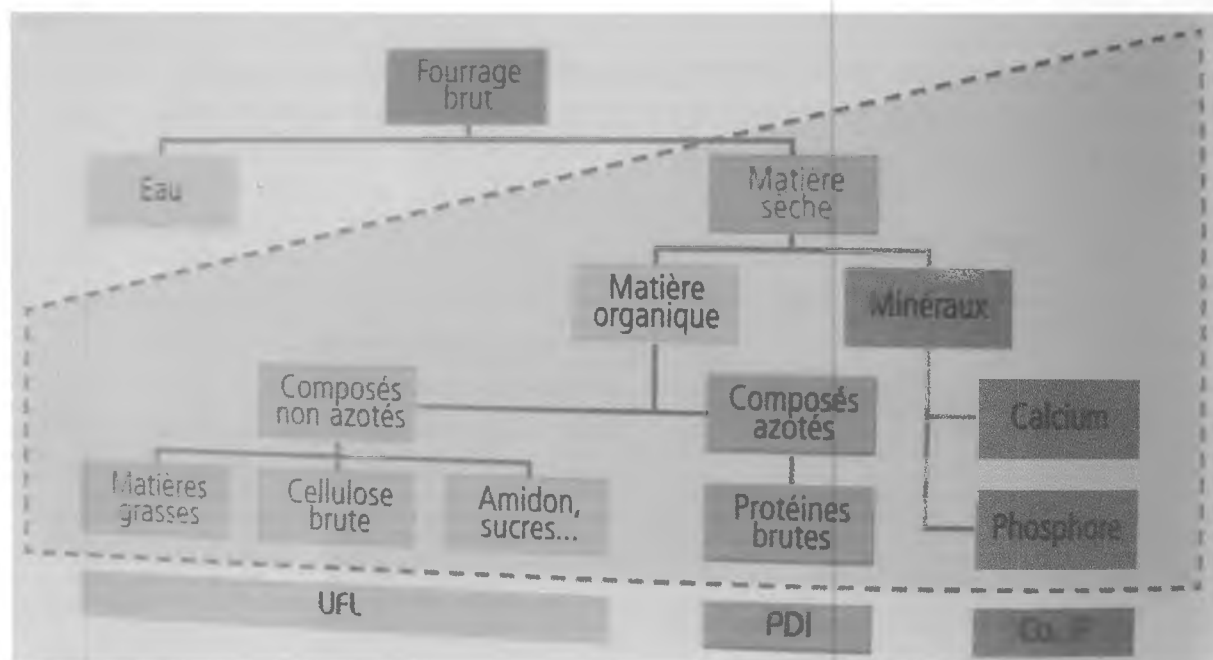
Plusieurs races bovines, dont la plus représentée est la Pie Rouge norvégienne, sont exploitées en pâturage libre :

- zébu malgache : importé des Indes, s'adapte bien aux conditions du pays et produit environ entre 2,7 et 3,6 litres de lait par jour en période de lactation.
- bétail Rana : croisement entre femelles zébus autochtones et mâles de race taurine d'importation normande, bretonne pie noire, bordelais. Une vache arrive à produire jusqu'à 8 litres de lait par jour.
- races améliorées et races pures (Pie rouge norvégienne, Pie noire, etc.) : très peu nombreuses sur le territoire.

4- La composition de la matière de quelques fourrages

Voici la composition en matière du fourrage brut illustrant ces unités :

Organigramme 1 : Composition des fourrages



Source : FIFAMANOR et al, 2008

La valeur alimentaire du fourrage change selon la proportion de ses différents composants. La teneur en eau, la seule composante qui n'apporte ni énergie ni protéines, d'un fourrage brut est très variable : 15 à 85 %. Pour établir ces différents éléments et caractéristiques, on procède à des analyses en laboratoire et des mesures de digestibilité sur les animaux.

Annexe V : Complément sur les modes de gestion du sol

1- Labour

a- Les avantages du labour

Le labour, à une profondeur ne dépassant pas 20 cm, aère le sol en le décompactant. Il mélange au sol les résidus de culture, les fumiers solides, la chaux et les engrais minéraux tout en y introduisant de l'oxygène. Il contrôle plusieurs mauvaises herbes vivaces et repousse la croissance des autres mauvaises herbes au printemps en même temps que la culture. Il brise le cycle des maladies. Il contrôle plusieurs ennemis des cultures, tels que limaces, vers gris, etc.

b- Les inconvénients

Le labour peut entraîner plusieurs risques, les plus connus étant les risques d'érosion et de dégradation du sol à cause de l'absence d'une couverture protectrice en surface du sol. Par ailleurs, avec les méthodes de labour actuelles, les sols s'érodent d'un millimètre par an. Or, pour reconstituer cette minuscule épaisseur, il faut 10 années [<http://fr.wikipedia.org/wiki/Labour>]. De plus, le labour profond entraîne le retournement en surface d'une terre infertile (plus pauvre en humus et de faible stabilité structurale). Les matières organiques sont en général enfouies trop profondément et mal réparties dans le profil. D'autre part, en majorité, la pratique du labour se fait à la main, ce qui demande temps et main d'œuvre.

2- SCV

a- Techniques de base du SCV

❖ Les systèmes sur résidus ou sur couverture végétale morte

Les résidus végétaux sont les parties de la culture non exportées lors de la récolte et laissées sur place, ils sont plus ou moins importants selon la culture et la destination de la culture. Par exemple, pour le maïs grain, ce sont les racines, tiges, feuilles, rafles, alors que pour le maïs ensilage, seules les racines restent. La couverture du sol par les résidus de cultures est une méthode très efficace pour réduire l'évaporation, la croissance des adventices, maintenir l'humidité du sol en saison sèche et arrêter l'érosion. C'est aussi une voie courte pour restituer la totalité de la biomasse et les nutriments qui la constituent à mesure de la dégradation par la macrofaune, de la minéralisation et de l'humification à travers la méso et la microfaune (Rajaonera, 2005).

Les cultures sont installées directement d'une part dans les résidus conservés des cultures annuelles précédentes, éventuellement renforcés par du paillage importé, et d'autre part dans les biomasses des plantes pérennes tuées manuellement par fauche ou desséchées aux herbicides (FIFAMANOR et al, 2008).

❖ Les systèmes sur couverture végétale vivante

Les cultures sont installées dans des couvertures vivantes. Celles-ci peuvent être éventuellement contrôlées par le gel, par herbicide ou par fauchage, pour ne pas entrer en compétition (minérale, hydrique ou pour la lumière) avec les plantes cultivées. Pour assurer une diversité végétale, il faut associer les légumineuses aux couvertures de graminées (FIFAMANOR et al, 2008).

b- Avantages

Les techniques de Semis Direct sur Couverture Végétale Permanente permettent :

- des intérêts agronomiques : les couvertures garantissent le recouvrement permanent du sol, la restauration et le maintien de sa fertilité. Le temps des travaux est valorisé.
- des intérêts environnementaux : comme en milieu forestier, les couvertures végétales permettent d'équilibrer le bilan de matière organique et de ramener à la surface un certain nombre d'éléments nutritifs qui seront redistribués dans le sol et seront disponibles pour la culture commerciale [FIFAMANOR et al, 2008].

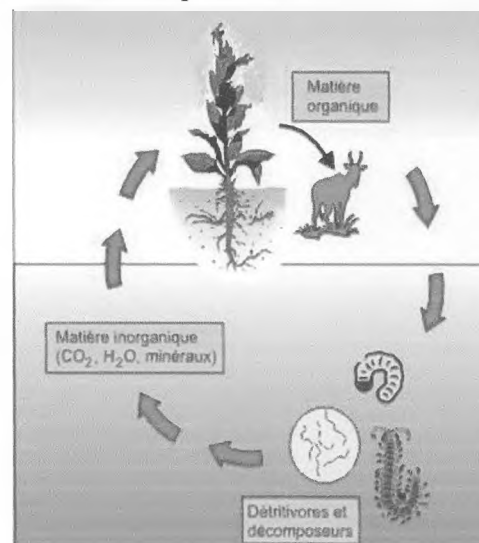


Photo 2 : Cycle de matière organique

Source : <http://www.notesnutrition3.htm>

Intégration agriculture et élevage en SCV : comme il est écrit auparavant, la plupart des plantes de couverture utilisées en SCV sont aussi d'excellents fourrages, offrant la possibilité d'une meilleure intégration avec l'élevage notamment l'alimentation des vaches laitières. Ainsi, la production vivrière et la production de fourrages se font en même temps et toute l'année. De plus, les cultures bénéficient du supplément de fumier [FIFAMANOR et al, 2008]. Les revenus agricoles se diversifient avec un apport de trésorerie régulier et sécurisé.

c- Inconvénients

Si le SCV est présenté comme l'innovation d'une agriculture moderne conciliant l'homme avec la nature, il peut toutefois induire des effets peu appréciés, notamment :

- ✓ la présence de résidus en surface favorise l'infestation de phytopathogènes ;
- ✓ la culture sous couverture végétale ne reflète pas toujours l'image d'une agriculture de grande envergure pour une exploitation plus que vivrière ;
- ✓ la nécessité de l'incorporation dans le système d'une culture pour la production de biomasse diminue sa productivité par rapport au temps d'occupation de l'espace et demeure un frein à sa diffusion quand le sol cultivable est de moins en moins suffisant [Radanielson, 2004].

Annexe VI : Dégradation de la matière organique

Les matières organiques du sol sont l'ensemble des substances carbonées provenant des débris végétaux, des déjections et de cadavres d'animaux, microscopiques et supérieurs. Les animaux dans le sol les fragmentent. Cette fragmentation a pour effet d'augmenter considérablement la surface d'attaque par les bactéries et champignons du sol. Elle constitue ainsi la phase d'initiation de leur processus de dégradation.

1- Les étapes de la décomposition de la matière organique

Sa transformation se fait en deux étapes :

a) La décomposition des matières organiques jeunes ou minéralisation primaire qui comprend deux phases :

D'abord une phase de prolifération microbienne à partir des substances facilement décomposées, le nombre de microbes s'élève rapidement et sont libérés en abondance les résidus de digestion des matières organiques (le CO_2 , l' H_2O , et de l'énergie sous forme de chaleur).

Puis une phase de décroissance microbienne et de libération de substances nutritives organiques et minérales issues à la fois de matières organiques décomposées et de la mort des corps microbiens. Ces substances utilisables pour la plante (les matières minérales : NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} ,...) sont immédiatement fixées par les forces de liaison de l'argile et l'humus qui servent à la synthèse de l'humus.

Une partie de ces substances peut être aussi lessivée au cours de cette décomposition. On peut trouver aussi des produits transitoires : des sucres, des acides organiques, de la cellulose réduite, des matières azotées, de la lignine libérée par la décomposition rapide de la cellulose. Ces produits transitoires constituent la fraction jeune des matières organiques du sol appelée parfois humus jeune.

b) L'humification ou évolution des matières organiques dans le sol

Les composés humiques sont aussi synthétisés au cours de l'humification qui commence aussitôt après la phase de prolifération microbienne, et se poursuit à mesure que décroît le nombre de microbes lors de la phase de décroissance microbienne. Les matières premières de la synthèse de l'humus sont : les résidus de lignine plus ou moins transformés par oxydation ;

les matières azotées (protéines, les acides aminés,...) ; les éléments minéraux qui se lient aux molécules de constituant humique.

Le terme d'humus stable n'est qu'à demi exact. Ces nouvelles substances, bien que résistantes aux attaques microbiennes, sont lentement minéralisées par les micro-organismes à raison de 1,5 à 2 % du stock du sol par an. C'est le deuxième temps de l'évolution des matières organiques du sol : minéralisation lente de l'humus stable ou minéralisation secondaire aboutissant à des substances minérales (NH_4^+ , Ca^{2+} ,...). Par définition, l'humus est la fraction colloïdale organique du sol obtenue par synthèse microbienne et physico-chimique de la matière végétale [Dominique SOLTNER, 2005].

L'ensemble du processus de décomposition peut se résumer dans un schéma, celui qui suit.

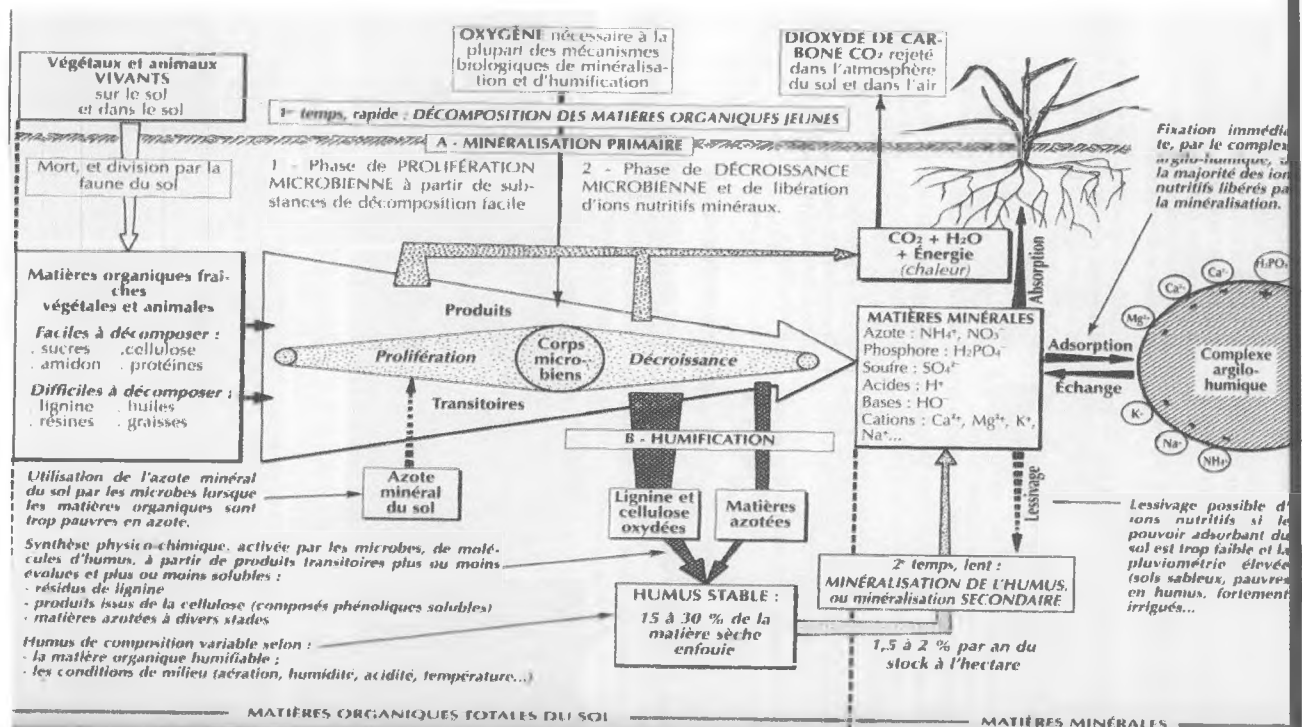


Schéma 2 : Schéma général de l'évolution des matières organiques dans le sol

Source : Dominique SOLTNER, 2005

Ce sont les avantages chimiques de la présence de la matière organique dans le sol mais qu'en est-il physiquement.

2- Avantages physiques

Le passage de la matière organique dans le tube digestif de ces animaux a pour effet de la mélanger à diverses sécrétions intestinales, à des colloïdes humiques. Il s'ensuit la formation

d'agrégats stables dont les plus remarquables sont ceux que laissent les lombrics. Tous ces animaux participent au transport actif de la matière organique dans les horizons du sol. En outre, en fouissant, ces animaux améliorent l'aération du sol ainsi que la circulation de l'eau. Leur présence favorise au plus haut point l'amélioration et le maintien de la structure du sol.

3- Les conditions de réussite de la décomposition de la matière organique

Trois paramètres méritent d'être considérés dans le processus de décomposition de la matière organique : le climat, l'acidité du sol et la végétation [Dominique SOLTNER, 1999].

a- Le climat

Il tient une place prépondérante. Les facteurs les plus importants sont la température et l'humidité. D'une part, une température élevée favorise la décomposition de la matière organique si toutefois l'humidité est suffisante.

D'autre part, à égalité de température, une alternance des saisons contrastées d'humidité et de sécheresse accélère favorablement le processus. Aussi, un milieu très sec rend difficile l'humification et un excès d'humidité du sol, faute de drainage, favorise la formation des humus hydromorphes.

Sur la vitesse de minéralisation, ces alternances saisonnières d'humectation et de dessiccation accélèrent la minéralisation des matières organiques fraîches et des fractions les plus fermentescibles de l'humus ; en même temps elles provoquent une humification de l'humus.

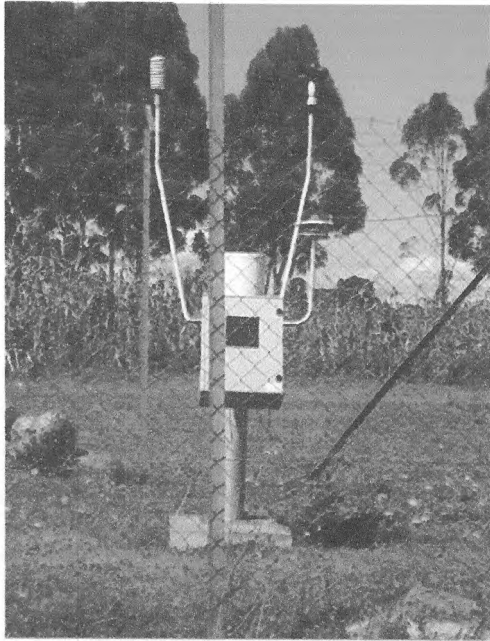
b- L'acidité du sol

L'activité microbienne source de décomposition des matières organiques, d'humification et de minéralisation de l'humus, est en relation directe avec le type de sol. En effet, elle est plus grande dans les milieux neutres et peu acides que dans les milieux acides ou très acides.

c- La végétation

L'espèce végétale influe beaucoup sur l'humification de ses résidus. Trois espèces se distinguent : améliorantes, acidifiantes et intermédiaires. Les premières donnent des résidus végétaux riches en substances hydrosolubles et en azote : C/N inférieur à 25. Il s'agit des graminées et des légumineuses. Les espèces acidifiantes, caractérisées par les résineux et les éricacées, donnent des résidus moins riches. Leur rapport C/N est élevé : plus de 50. Les dernières produisent des résidus à C/N moyen compris entre 30 et 45.

Annexe VII : Photo (3) de la station météorologique CIMEL Andranomanelatra



Source : Auteur, 2009

Annexe VIII : Données sources sur les résultats dans les grands systèmes (en gramme)

Système	Fertilisation	Moyenne de rendement en paille	Moyenne de rendement en grains	Moyenne de rendement en couverture	Moyenne de rendement en résidus	Moyenne de biomasse totale
S 1Lab	FM	4012,90	3540,04	153,51	1692,95	5859,36
	FM+	3826,17	2572,26	116,38	1413,31	5355,86
	Fu	2034,72	1341,81	34,55	735,53	2804,79
S 1SCV	FM	2935,84	1976,89	193,99	1569,10	4698,93
	FM+	3522,48	2361,62	68,39	2027,03	5617,90
	Fu	1923,60	1507,09	57,01	1327,48	3308,07
S 2Lab	FM	4500,72	3033,93	1035,04	1326,59	6862,36
	Fu	2571,10	1517,33	872,95	846,89	4290,94
S 2SCV	FM	2581,87	1467,42	2412,13	1479,32	6473,32
	Fu	1264,29	613,52	2354,81	1440,73	5059,83
S 3Lab	FM	2362,26	1635,65	1419,87	1354,64	5136,78
	FM+	2210,82	1467,95	1909,47	1677,28	5797,57
	Fu	1201,31	1177,80	503,92	701,81	2407,05
S 3SCV	FM	2589,92	2121,50	1820,59	2130,71	6541,22
	FM+	2418,08	1756,60	927,05	1978,24	5323,38
	Fu	1216,48	826,01	643,22	1138,92	2998,63

Annexe IX : Données sources sur les résultats dans les tests d'associations (en gramme)

Couverture	fumure	Moyenne de rendement en paille	Moyenne de rendement en grains	Moyenne de rendement co1	Moyenne de rendement co2	Moyenne de rendement en couverture (co1+co2)	Moyenne de biomasse totale
brach+caj	FM	2492,57	2016,89	1230,44	510,84	1741,27	4233,85
	Fu	1630,91	643,82	3015,01	421,66	3436,67	5929,25
éleu+ caj	FM	3429,35	2512,01	1531,51	965,93	2497,44	4990,01
	Fu	1312,95	776,38	1877,97	906,57	2784,55	5277,12
éleu+ crot	FM	4288,77	3277,35	1061,11	2348,92	3410,03	5902,61
	Fu	2206,69	1034,34	1539,45	2744,02	4283,48	6776,06
lupin+vesce	FM	2590,76	2522,91	640,71	419,26	1059,97	3552,55
	Fu	2328,57	1669,05	350,97	523,82	874,79	3367,36
maïs sl	FM	3270,32	2633,78				2492,57
	Fu	1370,42	1199,32				2492,57
Radis	FM	2912,02	2045,07	2205,87		2205,87	4698,45
	Fu	2208,72	1584,53	1424,76		1424,76	3917,34
Stylo	FM	1924,68	1417,79	1894,76		1894,76	4387,34
	Fu	1396,39	756,95	3676,63		3676,64	6169,21
Trèfle	FM	3464,60	2767,72	1101,05		1101,05	3593,63
	Fu	1603,89	900,26	1447,78		1447,78	3940,35

Annexe X : Données sources sur les résultats dans des couvertures en culture pure (en gramme)

Fertilisation	Culture	Biom végétative	Grain	Tubercule	Total
FM	cajanus	4565,82			4565,82
	crotalaire	7220,93			7220,93
	éleusine	5506,71	6780,30		12287,01
	lupin	4744,99	1316,29		6061,27
	radis	3684,79		7210,26	10895,06
	trèfle	1382,18			1382,18
	vesce	1590,74			1590,74
	brachiaria	12303,34			12303,34
Fu	cajanus	4534,68			4534,68
	crotalaire	7384,02			7384,02
	éleusine	3263,99	3713,63		6977,62
	lupin	4576,29	1180		5756,29
	radis	1960,20		6156,16	8116,36
	trèfle	858,60			858,60
	vesce	2129,41			2129,41
	brachiaria	12608,83			12608,83