



**Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques**

**Département AGRICULTURE**



**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention d'un  
diplôme d'Ingénieur Agronome**

**EVALUATION DE LA BIOMASSE DES PRINCIPALES  
CULTURES ET PLANTES DE COUVERTURE UTILISEES  
DANS LES SCV DANS LE VAKINANKARATRA.**

**Soutenu par Ravaka Faniry RAKOTONDRABE  
Promotion « AMBIOKA »  
(2008-2013)**

**Le 24 Juin 2013**

Devant le jury composé de :

Président : Dr. Harilala ANDRIAMANIRAKA

Examineur : Mr Benjamin RAKOTO

Maître de stage : Dr. Krishna NAUDIN

Tuteur : Dr. Norosoa Christine RAZAFINDRAMANANA-RAKOTONIAINA





*« Confie ton activité au Seigneur et tu réaliseras tes projets »*

PROVERBES 16 :3.

## REMERCIEMENTS

---

Je remercie tout d'abord le **BON DIEU** qui m'a accordé la force, le courage et la bonne santé durant mes cinq années d'études universitaires.

Cette étude n'a pu être réalisée sans le soutien et la collaboration de plusieurs personnes physiques et/ou morales, envers qui j'aimerais bien ici manifester mes sincères remerciements.

Tout d'abord, je tiens à remercier l'URP-SCRiD (Unité de recherche en partenariat sur les systèmes de culture et de riziculture durable), le CIRAD (Centre de coopération international de recherche en agronomie pour le développement) et le FOFIFA (Foibem-pirenena momba ny fikarohana ampiharina ho fampanandrosoana ny ambanivohitra ou Centre national de recherche appliquée au développement dans le monde rural) pour les appuis financiers et techniques nécessaires pour le bon déroulement de la présente recherche.

Je témoigne ma gratitude envers :

- Monsieur **Harilala ANDRIAMANIRAKA**, Docteur en Science Agronomique, Enseignant chercheur et Chef du département Agriculture à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), pour l'honneur qu'il nous a fait de présider le jury de cette soutenance de mémoire malgré ses lourdes responsabilités ;
- Monsieur **Benjamin RAKOTO**, Enseignant-Chercheur à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), d'avoir accepté d'évaluer et de juger ce travail en tant qu'examineur ;
- Monsieur **Krishna NAUDIN**, Docteur en Sciences Agronomique et chercheur du CIRAD notre Maître de stage, pour son assistance et ses conseils durant le travail sur terrain, l'interprétation des résultats et l'élaboration du manuscrit;
- Madame **Norosoia Christine RAZAFINDRAMANANA-RAKOTONIAINA**, Docteur en Science Agronomique, Enseignant-Chercheur à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, notre encadreur pédagogique, pour son appui scientifique, sa disponibilité et le temps qu'elle m'a consacré pour la bonne exécution du manuscrit.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à :

- Tous les enseignants et tous les personnels administratifs et techniques à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA) ;
- Madame **DUSSERRE Julie**, Docteur en écophysiologie et chercheur du CIRAD;

- Monsieur Fidiniaina RAMAHANDRY ANDRIANDRAHONA, Ingénieur de Recherches et Responsable technique et gestionnaire du dispositif de recherches avec SCV au FOFIFA URP/SCRiD - Région Vakinankaratra ;
- les équipes de l'URP/SCRiD Andranomanelatra pour les détails techniques et leur précieuse aide au cours de nos travaux sur terrain;
- les personnels et les techniciens du FOFIFA Antsirabe;
- tous mes amis et la promotion AMBIOKA ; et
- les amis stagiaires et thésards au CIRAD : Mamy, Laingo, Guillaume et Odom.

Je ne remercierai jamais assez mes parents et mon frère qui ont continué à me soutenir dans les moments difficiles et à qui je dois, en grande partie, l'achèvement de ce travail.

A tous ceux que je n'ai pas pu citer ici, qu'ils puissent trouver dans cet ouvrage, l'image de leur contribution et ma sincère gratitude.

*Ravaka Faniry RAKOTONDRABE*

## RESUME

---

Le stockage du carbone est à la fois un enjeu agronomique (amélioration des propriétés organiques du sol) et environnementaux (réduction du CO<sub>2</sub> atmosphérique). La présente étude qui a été entreprise sur un dispositif expérimental à Andranomanelatra (région Vakinankaratra) a pour objectif principal d'estimer le carbone apporté par les principales cultures et les plantes de couvertures selon deux modes de gestion du sol (SCV et le labour). Ce rapport renseigne principalement sur les quantités de carbone que renferment les pools : biomasse aérienne et biomasse racinaire. Des mesures et des prélèvements ont été effectués, pour la biomasse aérienne, la récolte intégrale a été adoptée, pour la biomasse racinaire, la méthode de carottage en surface et en fosse d'un bloc sol-racines a été utilisée. Le stock de carbone dans la biomasse est estimé à partir de sa matière sèche. Le modèle de Hénin-Dupuis a permis ensuite d'évaluer le carbone apporté au sol par la restitution des biomasses (aérienne et racinaire). Cette étude a montré que la production de biomasse ne varie pas en fonction du mode de gestion du sol. Il ressort aussi de cette étude que les stocks de C diffèrent selon le mode de gestion du sol. En système labouré, le déstockage est rapide tandis qu'en SCV, le stockage tend à augmenter. Les résultats montrent des accroissements de l'ordre de 0,10 à 0,47 t C.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> sous SCV par contre en système labouré, le décroissement est de l'ordre de 0,35 t C.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. En conclusion, les systèmes SCV sont efficaces pour le stockage de carbone contrairement aux systèmes labourés grâce à la restitution des parties aériennes.

**Mots clés :** *stockage de carbone, Root/Shoot ratio, carottage, systèmes conventionnels de labour.*

## ABSTRACT

---

The carbon storage is an agronomic (improvement of the organic properties of soil) and environmental issue (reduction of the atmospheric CO<sub>2</sub>). The main objective of this survey is to estimate the carbon brought by the main cultures and the cover crops according to soil management techniques (conservation agriculture CA and conventional tillage systems). This report informs mainly on the quantities of carbon in aboveground and belowground biomass. But in addition to soil management techniques, fertilization is also considered because of its likely effect on biomass production. To reach these objectives, several methods have been combined. Biomass has been estimated by full harvest for aboveground biomass and core-sampling for root biomass. Then, the carbon stock of these biomasses has been estimated. And finally the use of the model of Hénin-Dupuis permitted to estimate the carbon brought soil by the restitution of the biomasses (aerial and root). This survey showed that the production of biomass doesn't vary according to soil management. It is also evident from this survey that the stocks of C defer according to land uses. Tillage system cause carbon loss while in CA systems, the storage has the tendency to increase. Results show growths of the order of 0, 10 à 0, 47 t C.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>t C.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>s under CA. In conclusion, no tillage management was efficient to store carbon contrary to tillage management.

**Keywords:** *carbon storage, Root/Shoot ratios, tropical soils, soil organic storage, Andranomanelatra.*

# SOMMAIRE

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>LISTE DES FIGURES</b> .....   | <b>I</b>  |
| <b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....  | <b>I</b>  |
| <b>LISTE DES ACRONYMES</b> .....   | <b>IV</b> |
| <b>I INTRODUCTION</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>II SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....   | <b>3</b>  |
| II.1 Généralités sur les systèmes sur couverture végétale permanente (SCV) .....           | 3         |
| II.2 Séquestration de carbone .....  | 7         |
| II.3 Les racines .....   | 9         |
| <b>III MATÉRIELS ET MÉTHODES</b> .....   | <b>11</b> |
| III.1 Présentation du site d'étude .....   | 11        |
| III.2 Méthodes .....   | 17        |
| <b>IV RESULTATS</b> .....  | <b>24</b> |
| IV.1 Biomasses produites .....   | 24        |
| IV.2 Estimation du carbone apporté au sol par les biomasses.....                           | 36        |
| IV.3 Modélisation du stock de matière organique dans le sol sur 30ans .....                | 41        |
| <b>V DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS</b> .....  | <b>44</b> |
| V.1 Effet du mode de gestion sur la production de biomasses (aérienne et racinaires) ..... | 44        |
| V.2 Effet du mode de gestion du sol sur l'apport en carbone.....                           | 49        |
| V.3 Apport et intérêts de l'étude.....   | 52        |
| <b>VI CONCLUSION ET PERSPECTIVES D'AVENIR</b> .....  | <b>53</b> |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....   | <b>54</b> |
| <b>ANNEXES</b> .....   | <b>57</b> |

# LISTE des FIGURES

---

|   |    |
|---|----|
| Figure 1: cycle du carbone .....  | 8  |
| Figure 2: Carte de la région de Vakinankaratra.....   | 11 |
| Figure 3: Localisation géographique du site d'étude d'Andranomanelatra.....   | 12 |
| Figure 4: Courbe ombrothermique de Gaussen d'Andranomanelatra (2002-2012).....  | 13 |
| Figure 5: dispositif d'Andranomanelatra.....  | 15 |
| Figure 6: récapitulation du modèle Hénin Dupuis .....   | 22 |
| Figure 7: quantité de biomasse aérienne produite par S1 selon le mode de gestion et la fertilisation ..   | 24 |
| Figure 8: quantité de biomasse aérienne produite par S2 selon le mode de gestion et fertilisation .....   | 25 |
| Figure 9: quantité de biomasse aérienne produite par S3 selon le mode de gestion et fertilisation .....   | 26 |
| Figure 10: quantité de biomasse aérienne produite par l'avoine en pur avec deux fertilisations<br>différentes.....  | 27 |
| Figure 11: Modèle de distribution des racines : entre ligne de crotalaire (a), sous pieds de crotalaire (b)<br>et sous pieds de maïs (c).....                                       | 28 |
| Figure 12: Modèle de distribution des racines : sous pied d'éleusine (a), sous pied de crotalaire (b),<br>entre éleusine et crotalaire (c) et entre crotalaire et cajanus (d) ..... | 29 |
| Figure 13: Modèle de distribution des racines : sous pied de maïs (a), entre lignes de maïs (b) et sous<br>pied d'haricot (c). .....  | 31 |
| Figure 14: Modèle de distribution des racines : entre ligne de riz (a) et sous pied de riz (b).....   | 32 |
| Figure 15: Modèle de distribution des racines : sous pied d'avoine (a) et entre ligne d'avoine (b).....   | 33 |
| Figure 16: quantité de biomasse racinaire des cultures selon les modes de gestion du sol et la<br>fertilisation. ....   | 34 |
| Figure 17: Root/Shoot ratios des plantes et associations de cultures étudiées selon mode de gestion du<br>sol et fertilisation.....   | 35 |
| Figure 18: apport de C au sol par S1 (riz//maïs+crotalaire) en SCV avec la fertilisation FM .....   | 36 |
| Figure 19: apport de C au sol S1 (riz//maïs+crotalaire) en SCV avec la fertilisation Fu .....   | 37 |
| Figure 20: apport de C au sol par S2 : Riz//Eleusine+Crotalaire+Cajanus en SCV avec la fertilisation<br>FM .....  | 37 |
| Figure 21: apport de C au sol par S2 :Riz//Eleusine+Crotalaire+Cajanus en SCV avec la fertilisation<br>Fu.....  | 38 |
| Figure 22: apport de C au sol par S3 : Riz//Haricot+Maïs+Radis en SCV avec la fertilisation FM .....  | 39 |
| Figure 23: apport de C au sol par S3 : Riz//Haricot+Maïs+Radis en SCV avec la fertilisation Fu .....  | 39 |
| Figure 24: apport de C au sol par le témoin S0 : Riz// Maïs+Haricot .....   | 40 |
| Figure 25: évolution du stock de carbone du sol selon différents gestions de sol.....   | 42 |

## LISTE des TABLEAUX

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau 1:</b> Evolution des surfaces cultivées en SCV de 2001 à 2009 par zones par saison .....            | 6  |
| <b>Tableau 2:</b> coefficient de conversion en carbone de quelques plantes.....                                | 21 |
| <b>Tableau 3:</b> quantité de racines dans les fosses de l'association en S1 réparties selon deux horizons. 28 |    |
| <b>Tableau 4:</b> quantité de racines dans les fosses de l'association en S2 réparties selon deux horizons. 30 |    |
| <b>Tableau 5:</b> quantité de racines dans les fosses de S3 réparties selon deux horizons.....                 | 31 |
| <b>Tableau 6:</b> quantité de racines dans les fosses de riz réparties selon deux horizons.....                | 32 |
| <b>Tableau 7:</b> quantité de racines dans les fosses de l'avoine réparties selon deux horizons.....           | 33 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau 8:</b> Root/shoot ratios du maïs dans la littérature ..... | 48 |
| <b>Tableau 9:</b> Root/Shoot ratios du riz.....                       | 49 |

# LISTE des CLICHES

---

|  |    |
|--|----|
| Cliché 1 : (a), (b): enfoncement du cylindre de surface .....  | 18 |
| Cliché 2 : (a) : enfoncement du cylindre de fosse (b) : prélèvements par cylindre de fosse sous pied de maïs .....   | 19 |
| Cliché 3 : (a) : étuve ; (b) : balance de précision.....   | 20 |
| Cliché 4 : (a) : séparation du bloc sol-racines avec de l'eau et du tamis ; (b) : échantillons de racines avec sac étiqueté ; (c) : mise en étuve des racines..... | 20 |

# LISTE des ACRONYMES

---

|                         |  |
|-------------------------|--|
| <b>AFAFT :</b>          | Agriculture, Foresterie et Autres Affectations des Terres.   |
| <b>AFD :</b>            | Agence Française de Développement  |
| <b>A.N.A.E:</b>         | Association Nationale d'Actions Environnementales  |
| <b>ANOVA:</b>           | ANalyse Of VAriance (analyse de variance)  |
| <b>BA :</b>             | Biomasse Aérienne  |
| <b>BR :</b>             | Biomasse Racinaire   |
| <b>C :</b>              | carbone  |
| <b>CIRAD :</b>          | Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement  |
| <b>CO<sub>2</sub> :</b> | Dioxyde de Carbone   |
| <b>FIFAMANOR:</b>       | Etablissement public de recherche et développement avec appui de la Norvège  |
| <b>FOFIFA :</b>         | Foibe Fikarohana ampiarina amin'ny Fampanandrosoana ny enyAmbanivohitra / Centre National de la Recherche appliquée au Développement Rural |
| <b>GES :</b>            | Gaz à Effet de Serre   |
| <b>Gt :</b>             | Gigatonnes   |
| <b>GSDM :</b>           | Groupement Semis Direct de Madagascar  |
| <b>INRA :</b>           | Institut National de Recherche Agricole  |
| <b>IPCC:</b>            | Intergouvernemental Panel on Climat Change   |
| <b>KOBAMA:</b>          | Koba Malagasy  |
| <b>M.A.E.P :</b>        | Ministère d'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche   |
| <b>MS :</b>             | Matière sèche  |
| <b>NH<sub>4</sub> :</b> | Méthane  |
| <b>N<sub>2</sub>O :</b> | Oxyde nitreux  |
| <b>N.P.K :</b>          | Azote-Phosphore-Potassium  |
| <b>ONG :</b>            | Organisme Non Gouvernemental   |

|                   |   |
|-------------------|---|
| <b>P.S.O :</b>    | Projet « Sud-Ouest »  |
| <b>R :</b>        | Root  |
| <b>S :</b>        | Shoot   |
| <b>R/S :</b>      | Root/Shoot ratio  |
| <b>SCV:</b>       | Système de culture sur Couverture Végétale permanente                             |
| <b>TAFA:</b>      | Tany sy Fampanandrosoana  |
| <b>URP/SCRiD:</b> | Unité de Recherche en Partenariat - Système de Culture et de Riziculture Durable. |

# I INTRODUCTION

## I.1 Contexte général et problématique

Le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat GIEC a établi en 1995 l'existence d'une incidence perceptible de l'Homme sur le climat, par le biais des émissions de gaz à effet de serre, principalement de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), de méthane (CH<sub>4</sub>) et l'hémioxyde d'azote ou oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) (FAO, 2001). Depuis 150 ans, la concentration atmosphérique de ces trois principaux gaz à effet de serre (GES) ne cesse d'augmenter (IPCC, 2007). Cette augmentation de GES est souvent d'origine anthropique. Tous les secteurs d'activités émettent des GES et l'agriculture n'est pas en reste.

Un quart environ des GES trouvent leur origine dans le secteur agricole, elle est attribuée aux changements d'affectation des terres, au déboisement et à la combustion de biomasse. L'avantage du secteur agricole, par rapport aux autres secteurs d'activités, est qu'il pourrait constituer un puits de carbone, c'est-à-dire des processus qui absorbent des GES en occurrence le carbone (IPCC, 2007). En fait, la végétation peut stocker du carbone dans ses parties aériennes et dans ses parties souterraines. Parmi les pools de carbone identifiés par l'IPCC (2006), la biomasse épigée est celle qui est la plus communément étudiée du fait de l'existence de différentes méthodes de mesure. Par ailleurs, la mesure et l'estimation de la biomasse hypogée sont généralement difficiles et laborieuses et le plus souvent, les méthodes ne sont pas normalisées (IPCC, 2003). Pourtant ces deux pools constituent des réservoirs non négligeables, entre 50 et 60% du carbone total du système se trouve à la surface du sol ou dans le sol (cité Andriamihaja, 2011).

Pour la Grande Ile, le sol constitue un patrimoine précieux, étant donné que près de 80 % de la population malgache vit de l'agriculture. Pourtant, l'insuffisance alimentaire existe toujours, elle est attribuée d'une part par l'augmentation de la population qui devrait atteindre 24 millions d'habitants en 2015 (Andriamaniraka, 2010) et d'autre part par une croissance trop faible de la production agricole. L'augmentation de la production pourra se faire par une augmentation de la surface exploitée d'où l'obligation d'exploiter les versants des collines appelés « *tanety* ». Or la fertilité des *tanety* est souvent faible, puisqu'ils sont en pente, souvent pauvres en matière organique et peu couverts. Pour assurer donc une production agricole en harmonie avec l'environnement, ce qui est un challenge pour la recherche scientifique et pour le pays, une gestion conservatoire du sol est proposée : les systèmes de culture sur couverture végétale (SCV). Une étude entreprise par Razafimbelo (2005), montre l'effet positif des systèmes SCV pour augmenter le stock de carbone dans le sol. Toutefois, cette étude comme d'autres contient peu d'information sur l'apport en carbone par les parties souterraines des plantes. Or, il est fort possible que la biomasse souterraine pourrait participer à augmenter le stock de C dans le sol. Dans cette étude nous nous sommes donc posés la

question suivante : « *Quelle est la part de la contribution des parties souterraines dans l'apport en carbone des cultures et plantes de couverture dans le sol ?* »

## **I.2 Objectifs**

Cette étude a pour objectif principal d'évaluer l'apport en carbone des parties aérienne et souterraine des cultures et plantes de couverture, ce pour différent système de culture.

Afin d'atteindre l'objectif général, les objectifs spécifiques suivants ont été fixés :

- mesurer les biomasses aérienne et souterraine.
- mesurer la biomasse souterraine en relation avec l'importance de la biomasse aérienne.
- estimer les effets des modes de gestions du sol sur les stocks de carbone mesurés dans ces deux pools.

## **I.3 Hypothèses**

Compte tenu de la problématique avancée et des objectifs fixés, les hypothèses testées au cours de cette étude sont les suivantes :

**Hypothèse 1** : Les pratiques SCV permettent une production en biomasse plus élevée par rapport aux pratiques conventionnelles.

**Hypothèse 2** : Les systèmes SCV permettent une amélioration du statut organique des sols contrairement au labour.

## **I.4 Plan du manuscrit**

Le rapport comporte quatre parties : (i) la synthèse bibliographique, (ii) les matériels et méthodes, (iii) les résultats, et (iv) la discussion.

## II SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

### II.1 Généralités sur les systèmes de culture sur couverture végétale permanente (SCV)

#### II.1.1 Définition et principes de base du SCV

Les systèmes de culture sur couverture végétale permanente (SCV) sont équivalents à l'Agriculture de Conservation.

Les systèmes SCV reposent sur trois principes fondamentaux (Séguy *et al.*, 2009 )

- Pas de travail du sol
- Présence de la couverture végétale permanente, qui favorise une activité biologique intense en contribuant à l'accomplissement de plusieurs fonctions : rôle clef dans le cycle de la matière organique, la structuration du sol et l'alimentation et la santé des plantes.
- Utilisation de successions ou rotations culturales en association avec les plantes de couverture et permettant d'assurer une production de biomasse globalement plus importante et plus stable.

En fonction du type de couvert végétal sur lequel se fait le semis direct, on peut distinguer deux grands types de systèmes SCV (FAO, 2012).

- **Systèmes SCV avec couverture végétale morte** : la couverture végétale est constituée par les résidus de récolte de la culture précédente et les résidus d'une plante de couverture ayant une forte production de biomasse. Elle peut provenir d'une autre parcelle ou avoir été produite sur place par une culture associée à une plante de couverture.
- **Systèmes SCV avec couverture végétale vivante** : ils sont constitués par la plante de couverture maintenue vivante pendant le cycle de la culture principale.

#### II.1.2 Les avantages et les inconvénients du SCV

##### II.1.2.1 Les avantages

L'application des SCV permet de profiter d'un certain nombre de bénéfices d'ordres agronomique et environnemental.

- **Sur le plan agronomique :**

Les plantes de couverture permettent de favoriser le développement de l'activité biologique dans le sol (Kushwaha *et al.*, 2000), augmenter le taux de matière organique dans le sol (Séguy *et al.*, 2001; Six *et al.*, 2002); fournir des éléments nutritifs nécessaires à la vie des plantes notamment l'azote(Dounias, 2001); conserver l'eau du sol, à cause de la meilleure infiltration et de la réduction de l'évaporation ; améliorer la structure du sol en surface et en profondeur grâce aux systèmes racinaires puissants des plantes.

Le SCV permet aussi de contrôler les mauvaises herbes et les maladies des cultures. En effet, les plantes de couverture, selon leur nature, ont des effets temporaires sur l'interruption du cycle des pathogènes (Ratnadass et al., 2011). Les SCV ont également des impacts sur la pression des adventices à travers plusieurs mécanismes : compétition entre plantes de couverture et les adventices, interruption du cycle des adventices (Chauhan and Johnson, 2009).

- **Sur le plan environnemental :**

Les SCV permettent aussi d'apporter des solutions pour résoudre des problèmes environnementaux car ils permettent la protection des sols contre l'érosion (Lal, 1976,; Bolliger et al., 2006; Hobbs, 2007,; FAO, 2012a).

Le SCV permet aussi de stocker du carbone par restitution des biomasses et par la réduction du labour (Scopel *et al.*, 2005 ; Govaerts et al., 2009b). Ils peuvent contribuer à la réduction de l'effet de serre, la réduction de la consommation d'eau pour la production agricole, et productions pluviales dans les zones marginales, la réduction des doses d'engrais et de pesticides, diminuant leur impact sur la pollution et améliorant la qualité et la sécurité alimentaire et présentent un effet tampon pour les flux d'eau et réduction des risques d'inondation · réduction de l'agriculture itinérante et de la déforestation (GSDM, CIRAD, MAEP, & BRL, n.d.)

### ***II.1.2.2 Les inconvénients***

Les obstacles au développement du SCV sont des problèmes d'ordre technique, économique, organisationnel et des problèmes plus généraux d'appropriation des innovations par les paysans. Dans la majeure partie des cas, le premier problème au développement du SCV est le coût élevé de l'installation en première année de culture. Ceci est dû au fait qu'il y a en même temps labour, installation des plants de couverture et utilisation d'herbicides pour la maîtrise de ces plants avant semis. Le problème de pullulation des maladies et prolifération des insectes terricoles créées par la permanence d'un microclimat à forte humidité et à température tamponnée augmente les dépenses ou anéantit la production. Il y a aussi risque de pollution de l'environnement ou d'inhibition du développement de la plante cultivée par mauvaise utilisation des pesticides et herbicides.

### **II.1.3 Historique des SCV dans le monde**

Le semis direct n'est pas un concept récent car il était déjà utilisé par les agriculteurs de l'Égypte ancienne et les Incas dans les Andes d'Amérique du Sud. Ils se servaient d'un bâton pour faire un simple trou dans le sol où la graine était placée à la main et recouverte au pied. Une des formes les plus anciennes du semis direct est le *tapado* (en espagnol) ou *slash and mulch* (en anglais) ou encore abattis sans utilisation de feu est déjà pratiquée il y a longtemps dans les tropiques humides notamment dans les pays de l'Amérique Centrale.

La version moderne de cette forme de semis est apparue dans les années 1940 grâce à la découverte de l'herbicide à base de la molécule 2-4 D et des autres herbicides totaux de contact tels que le Paraquat et le Diquat. Ceci a renforcé la démocratisation du semis direct testé en Amérique du Nord sur les sols vulnérables qui avaient subi de graves problèmes d'érosion suite aux tempêtes de poussières des années 1930 le « *Dust Bowl* ». Et c'est Harry Young, agronome du Kentucky (USA), qui a initié la diffusion du semis direct pour la première fois.

En Europe, les premières recherches sur le semis direct ont été menées en Grande Bretagne, avec la découverte du Paraquat. En France, les premières expérimentations sur le semis direct ont été mises en place par l'INRA (Institut Nationale de la Recherche Agronomique) et l'ITCF (Institut Technique des Céréales et des Fourrages) en 1970. En Espagne, c'est en 1982, que les premières recherches ont été effectuées. Toutes ces expérimentations ont abouti généralement à une même conclusion : un effet positif du semis direct sur le rendement, la réduction du coût de production et la diminution de l'érosion (Razafimbelo, 2005). Plus récemment, au début des années 1990, la nouvelle et la plus importante expansion du semis direct s'est faite dans les Cerrados (savanes) du Brésil.

Les plus grands utilisateurs du semis direct sont les Etats-Unis, le Brésil et l'Argentine avec respectivement 23 700 000, 21 863 000 et 16 000 000 ha soit 21, 50, 55 % de la surface totale cultivée (Derpsh, 1998).

#### **II.1.4 Le SCV à Madagascar**

A Madagascar, les pratiques de semis direct sur couverture végétale permanente (SCV) se sont développées comme une alternative aux systèmes conventionnels fondés sur le labour. Les premiers essais de S.C.V. à Madagascar font suite à une mission de Lucien Séguy. Ils datent sur les Hauts Plateaux, des années 1991-1992 dans le cadre du projet blé de KOBAMA ou Koba Malagasy aux fermes mécanisées à Andranomanelatra, commune rurale d'AntsirabeII dans la Région du Vakinankaratra (H.Charpentier, C.Razanaparany, 2005), et sont inspirés de l'expérience brésilienne. En 1994, quatre institutions dont KOBAMA, FIFAMANOR ou Etablissement public de recherche et développement avec appui de la Norvège, FOFIFA ou Foibe Fikarohana ampiharina amin'ny Fampanandrosoana ny eny Ambanivohitra, et CIRAD ou Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement créent l'ONG Tafa (Tany sy Fampanandrosoana) afin de poursuivre en milieu paysan la mise au point de ces techniques agro-écologiques.

Les zones d'essais allaient progressivement s'élargir :

- dans les Hauts-Plateaux depuis 1994 ;
- dans le Moyen-Ouest, Lac Alaotra avec l'Association Nationale d'Actions Environnementales (A.N.A.E.), dans le Sud-Ouest avec le Projet « Sud-Ouest » (P.S.O.) depuis 1995 ;
- et dans le Sud-Est et le Menabe depuis 1998. (P. Rakotondralambo)

Le Groupement Semis Direct de Madagascar (G.S.D.M.), un réseau national d'institutions a été créé pour coordonner les actions en matière d'agro-écologie et promouvoir une offre technologique adaptée aux grandes écologies de l'île. Lors de la crise politique et économique qui a secoué le pays, l'ensemble de ce dispositif a pu être maintenu entre 2001 et 2003. Depuis janvier 2004, le Ministère d'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche (M.A.E.P.) a délégué au G.S.D.M. la maîtrise d'œuvre du projet « Appui à la diffusion des techniques agro-écologiques à Madagascar »(Raherinindrainy, 2007).

Actuellement Madagascar est un pays avancé, parlant de l'offre technologique diversifiée en matière de S.C.V. pour la petite agriculture familiale. En effet, les S.C.V. développés par la recherche y sont très variés du fait de la diversité agro-écologique de Madagascar. (A.F.D, 2006) Mais les systèmes SCV ne couvrent encore qu'une petite partie du territoire national(GSDM et al., n.d.)

**Tableau 1: Evolution des surfaces cultivées en SCV de 2001 à 2009 par zones par saison**

| saison  | Hauts plateaux | Lac Alaotra | Moyen-ouest | Sud-Est | Sud-Ouest | Autres zones | Total (ha) |
|---------|----------------|-------------|-------------|---------|-----------|--------------|------------|
| 2001/02 |                | 5           |             |         |           |              | 5          |
| 2002/03 |                | 49          |             |         |           |              | 49         |
| 2003/04 | 45             | 124         | 0           | 49      | 30        | 100          | 348        |
| 2004/05 | 99             | 570         | 10          | 128     | 81        | 300          | 1187       |
| 2005/06 | 106            | 1843        | 48          | 504     | 62        | 434          | 2996       |
| 2006/07 | 282            | 1401        | 248         | 849     | 145       | 486          | 3411       |
| 2007/08 | 309            | 1447        | 659         | 679     | 197       | 550          | 3840       |
| 2008/09 | 793            | 2323        | 1414        | 1065    | 168       | 629          | 6391       |

Source : Rakotondramanana, 2009

## **II.2 Séquestration du carbone**

### **II.2.1 Définition de séquestration du carbone**

« La séquestration du carbone » est la capture et le stockage à long terme du carbone atmosphérique (C-CO<sub>2</sub>) par un système sol-plante pendant une durée et sur un espace donné. La « séquestration du C » réfère au problème de la recherche de solutions conduisant à un ralentissement de l'augmentation des concentrations en GES dans l'atmosphère. La notion de séquestration du C doit être étendue à l'ensemble des flux de gaz à effet de serre (GES) que ceux soient carbonés (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) ou non (N<sub>2</sub>O) exprimés en « équivalent C-CO<sub>2</sub> » en tenant compte de leur potentiel de réchauffement global relatif à CO<sub>2</sub> : 23 pour CH<sub>4</sub> et 296 pour N<sub>2</sub>O (IPCC, 2001 ; Bernoux et al., 2006). On peut agir sur la « séquestration du C » aussi bien par un changement d'usage des terres (éviter la déforestation, augmenter la reforestation, la surface des plantations sylvicoles, et développer l'agroforesterie), que par une modification des itinéraires techniques pour un agro-système donné (IPCC, 2001). La mesure de stock concerne exclusivement l'étude de la quantité de carbone contenue dans le système sol-plante. (Bernoux et al., 2006).

### **II.2.2 Cycle et formes de carbone**

- **Cycle de carbone**

En général, il existe trois grands compartiments (réservoirs) de carbone : l'atmosphère, la biosphère et les océans (Dixon *et al.*, 1991 ; Watson *et al.*, 1996 in Lescuyer & Locatelli, 1999). Différentes forces peuvent engendrer la migration du carbone de ces réservoirs de l'un à l'autre. Elles peuvent être de nature différente : physique, chimique ou biologique. On peut citer les forces de la biosphère à savoir la photosynthèse (Rabeharisoa, 2004), la minéralisation et la fermentation ; les forces de l'hydrosphère à savoir la dissolution, l'érosion et le dégazage ; les forces de l'atmosphère et enfin les forces de la lithosphère (sédimentation, volcanisme) (Renaudat, 2005).

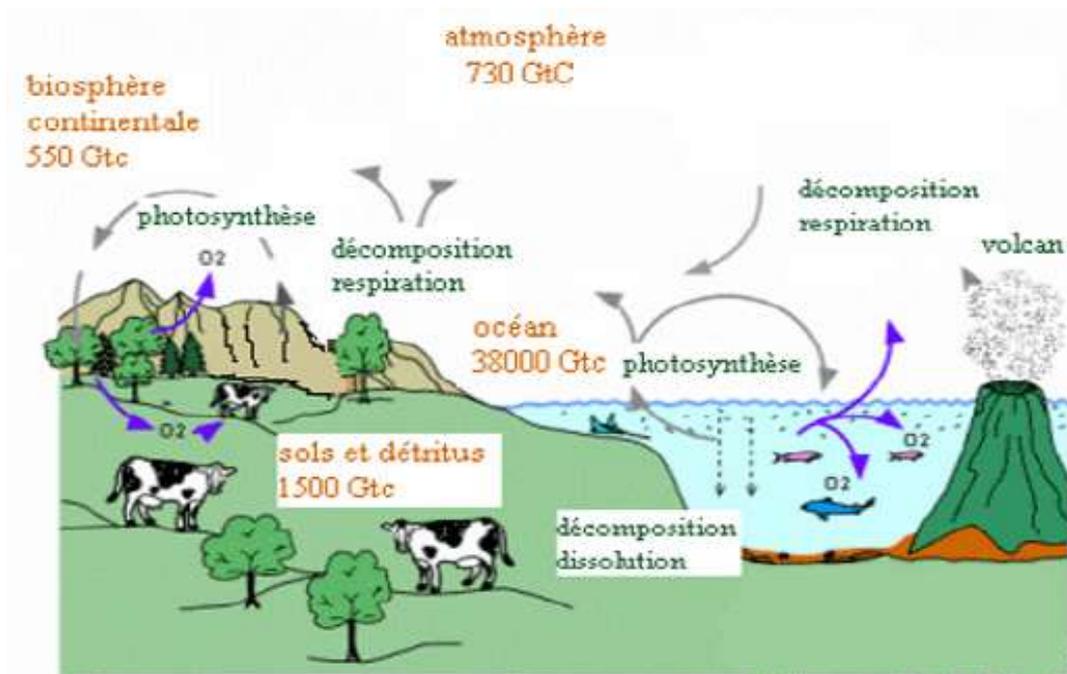


Figure 1: cycle du carbone

Source : Robin, 2009

- **Formes de carbone**

Il existe deux formes de carbone

- Le carbone inorganique : composé qui n'est pas du vivant et ne contient pas de lien C-C et CH comme le  $CO_2$  atmosphérique, calcaire  $CaCO_3$ .
- Le carbone organique : représenté par  $CH_2O$ . Il s'agit de molécules beaucoup plus grosses et plus complexes avec carbone C, hydrogène H et oxygène O comme éléments de bases mais d'autres éléments en faibles quantités peuvent venir les joindre : azote N, phosphore P et soufre S.

Concernant la contribution des écosystèmes terrestres au stockage de carbone, le carbone organique du sol représente le plus grand réservoir en interaction avec l'atmosphère avec 1 500 et 2 000 Gt C à 1m de profondeur et le carbone inorganique avec 750 Gt. Mais la végétation emmagasine considérablement moins que le sol avec 650 Gt (Renaudat, 2005).

### II.2.3 Les pools de carbone

Un pool de carbone ou réservoir est défini comme un système capable d'accumuler ou de libérer du carbone selon la définition de l'AFAFT ou Agriculture, Foresterie et Autres Affectations des Terres. Cinq pools de carbone y sont définis : la biomasse aérienne, la biomasse souterraine, le bois mort, la litière et la matière organique du sol (IPCC, 2006).

- **Biomasse aérienne ou biomasse épigée** : l'ensemble de la biomasse de la végétation vivante aérienne, ligneuse et herbacée, y compris les tiges, souches, branches, écorces, semences et feuillage.
- **Biomasse souterraine ou biomasse hypogée** : l'ensemble de la biomasse de racines vivantes.
- **Bois mort** : l'ensemble de la biomasse ligneuse morte qui n'est pas contenue dans la litière, et qui est sur pied, au sol ou dans le sol.
- **Litière** : l'ensemble de la biomasse morte de taille supérieure à la limite définie pour la matière organique des sols (2 mm) et inférieure au diamètre minimum choisi pour le bois mort (10 cm), mort sur le sol, à divers stades de décomposition, et située au-dessus ou à l'intérieur du sol minéral ou organique.
- **Matière organique du sol** : inclut le carbone organique des sols minéraux à une profondeur spécifiée choisie par le pays. Les racines minces vivantes et mortes et la matière organique morte (bois mort, litière) à l'intérieur de la terre inférieures au diamètre minimum adopté (2 mm) pour les racines et le bois mort et la litière sont incluses dans les matières organiques du sol lorsqu'il n'est pas possible de les distinguer empiriquement. La profondeur du sol par défaut est de 30 cm.

Cette étude s'est focalisée uniquement sur les deux pools de carbone à savoir : la biomasse épigée et la biomasse hypogée.

#### **II.2.4 SCV, séquestration du carbone et stock de carbone**

Des études effectuées confirment l'importance de la pratique des SCV dans la séquestration du carbone ou stockage du carbone. L'importance de cette séquestration dépend de la nature, de la typologie des systèmes de culture pratiqués : les plus performants pour cette fonction sont ceux qui produisent le plus de biomasse aérienne à C/N et teneur en lignine élevée, et qui possèdent des systèmes racinaires très développés en surface et en profondeur pour pouvoir utiliser efficacement l'eau profonde du sol, en dessous de la zone d'activité racinaire des cultures commerciales (Séguy, Bouzinac, & Maronezzi, 2001).

### **II.3 Les racines**

- **Fonctions des racines :**

Le système racinaire assure de multiples fonctions parmi lesquelles l'approvisionnement de la plante en eau et en éléments nutritifs, le maintien de la structure du sol et de son statut organique, ou encore la réduction des risques d'érosion. Ces fonctionnalités sont particulièrement importantes en conditions tropicales de sols pauvres et fragiles.

Les racines sont des puits et sources de carbone. En effet, le carbone destiné au système racinaire est soit utilisé pour le métabolisme des cellules soit stocké sous forme d'amidon

(Wallart, 1980 ; Mong et al., 1992). Après décomposition des racines, une partie de leur carbone est libéré dans l'atmosphère et une autre partie se transforme en matière organique dans le sol (débris de racines mortes et des exsudats racinaires). En effet, cet apport influence directement la nutrition de la plante ainsi que les propriétés physico-chimiques des sols (capacité d'échange des cations) par sa minéralisation et son importance dans la dynamique de l'azote.

L'absorption de l'eau et des éléments nutritifs dépend non seulement de la longueur et de la surface des racines, mais aussi de leur répartition dans les différents horizons. Outre le diamètre ainsi que le poids et la longueur, la densité des racines constitue un paramètre déterminant le degré d'exploitation du sol (Groot, Traoré, & Koné, 1998).

Cependant, l'apport des biomasses par les racines est difficile à mesurer, d'autant plus que les contributions des très petites racines (qui se renouvellent rapidement) et des produits de la rhizodéposition. La rhizodéposition se rapporte à l'ensemble des composés organiques libérés par les racines vivantes, elle joue un rôle important dans la prolifération des microorganismes tout en modifiant les équilibres entre les différentes populations microbiennes qui sont importantes. Dans tous les cas, la production de biomasse par les racines est considérable. En fait, elle représente souvent plus de 50% de la production totale et peut dépasser 5 à matière sèche chez les graminées. Cette biomasse racinaire est protégée dans le sol où elle est à l'abri du bétail (et est ainsi entièrement restituée au sol), et se minéralise lentement (Seguy et al., 2009).

- **Etude du système racinaire** (Cf. Annexe 1)

L'étude des racines pose de nombreux problèmes méthodologiques. En effet, si le système racinaire d'une plante dépend du milieu dans lequel elle se développe, pour une même espèce, les résultats obtenus en culture hydroponique ou culture hors-sol seront très différents de ceux obtenus en vase de végétation ou en pleine terre et les deux premières techniques ne pourront pas être retenues lorsqu'il s'agira d'utiliser les résultats à certaines fins. En pleine terre, les résultats varient aussi énormément suivant la nature du sol, (Simon et Eich, 1955), suivant la concurrence exercée par les plantes environnantes (Troughton, 1957) suivant aussi le traitement auquel est soumise la plante (Baker et Garwood, 1961 ; Picard, 1966). D'autre part, en pleine terre toujours, les études sont très délicates et laborieuses.

Diverses méthodes d'étude de l'enracinement ont été décrites et utilisées selon le but de l'étude (étude descriptive ou étude visant à quantifier une production racinaire), la nature du sol (dureté, texture...) et les espèces botaniques rencontrées (absence ou présence d'une racine pivot, végétation abondante ou pauvre ...)

### III MATERIELS ET METHODES

#### III.1 Présentation du site d'étude

##### III.1.1 Situation géographique

La région de Vakinankaratra se trouve sur les Hautes-terres centrales malgaches, entre 18°59' et 20°03' de latitude Sud et 46°17' et 47°19' de longitude Est et s'étend sur une superficie de 19.205 km<sup>2</sup> (DRDR de la région du Vakinankaratra, 2007). Elle est composée de six Districts : Ambatolampy, Antanifotsy, Antsirabe I, Antsirabe II, Betafo et Faratsiho.

L'étude a été faite à Andranomanelatra, situé dans le district d'Antsirabe II. Antsirabe se trouve à 168 km au Sud d'Antananarivo, à une altitude comprise entre 1.500 et 1.600 m et s'étend sur une superficie de 2.949 Km<sup>2</sup>. Andranomanelatra se trouve à 16 km au nord-est de la ville d'Antsirabe, au centre des Hautes Terres Malgaches, à une altitude de 1.645 m, à la latitude 19°46'45''S et la longitude 47°6'25''E.

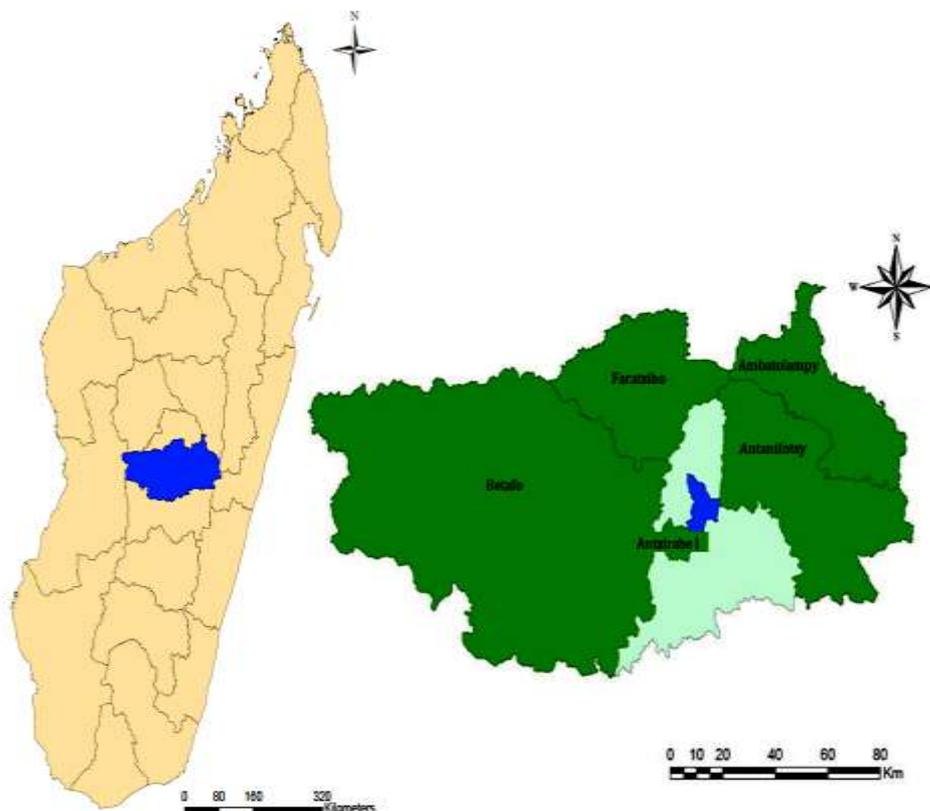


Figure 2: Carte de la région de Vakinankaratra

Source : BD 200 FTM



**Figure 3: Localisation géographique du site d'étude d'Andranomanelatra**

*Source : BD 200 FTM et 2010 Google-Données Cartographiques©2010-Europa-Technologies.*

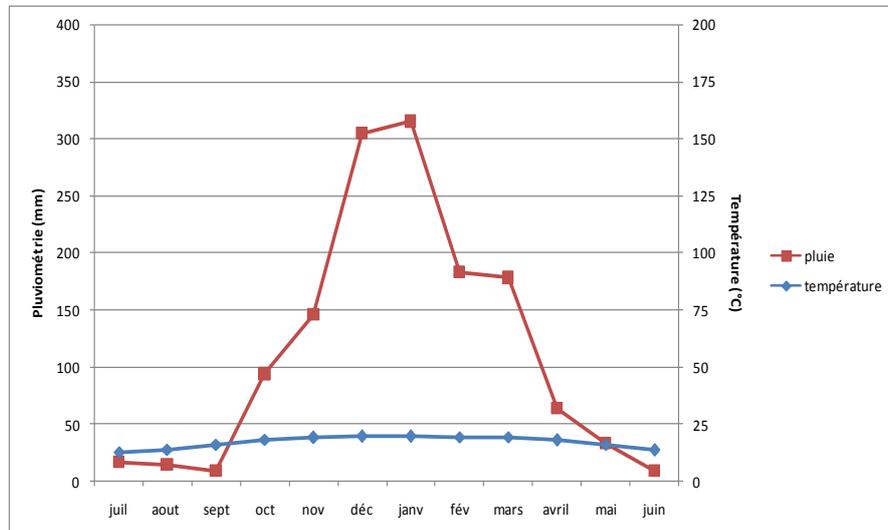
### III.1.2 Climat

Le climat de la région est du type subtropical avec deux saisons contrastées:

- une saison sèche et froide (hiver), de mai à septembre avec une précipitation mensuelle inférieure à 30 mm, et une température moyenne mensuelle de 13,8°C
- une saison humide et chaude, d'octobre à avril avec une précipitation mensuelle supérieure à 50 mm, et une température moyenne mensuelle de 18,7°C.

La température moyenne annuelle est de 16°C avec des températures minimales pouvant atteindre des valeurs négatives pendant la saison sèche de l'ordre de -1,6 °C, et maximales de 31°C. La pluviométrie annuelle varie de 900 à 2000 mm, avec une moyenne annuelle de 1400 mm. (Michellon, et al., 2004).

Le diagramme ombrothermique du site établi sur la moyenne des données climatiques (Cf. Annexe 2) durant les dix dernières années (2002 à 2012) est représenté par la figure 3:



**Figure 4: Courbe ombrothermique de Gausсен d'Andranomanelatra (2002-2012)**

Source : Station météorologique CIMEL à Andranomanelatra

### III.1.3 Sol

Les sols d'Andranomanelatra se sont développés sur des alluvions volcano-lacustres et sont décrits par Zebrowski et Ratsimbazafy (1979) comme des sols ferrallitiques fortement désaturés humifères. Et d'après Soil Survey Staff (2003), les sols d'Andranomanelatra sont classifiés comme des sols ferrallitiques argileux à variante andique ou Ferralsols selon la classification de la FAO (1998).

### III.1.4 Végétation

La superficie couverte par la forêt naturelle est faible, la forêt artificielle composée de peuplement de pins « *Pinus patula* et *Pinus. Merkusii* » et d'eucalyptus « *Eucalyptus robusta* » prédomine.

La plupart des surfaces est dominée par les formations graminéennes qui sont des savanes herbeuses basses, communément appelées « *bozaka* », dominées par des espèces de graminées pérennes (plantes vivaces qui vivent plusieurs années) et cespiteuses (*une plante qui pousse en touffe dense*) telles que « *Pennisetum pseudotriticoides* », « *Trachypogon spicatus* » ou « *Aristida rufescens* » ; ou des jachères plus ou moins récentes, envahies par des espèces rudérales (*qui vivent spontanément dans les sites fortement transformés par l'activité humaine*) ou nitrophiles (*plantes qui poussent dans des sols riches en azote*) telles que : *Euphorbia hirta* (Euphorbiacées), *Cassia ramosoides* (Cesalpiniées), *Rhynchelytrum repens*,

*Cynodon dactylon*, *Eragrostis atrovirens*, *Alloteropsis semialata*, *Sporobolus pyramidatus*, *Digitaria longiflora* (Graminées), in (Razafindramanana, 2011).

Dans les bas-fonds et les plaines lacustres se trouvent des marais à joncs et parfois à Viha, qui sont en voie de disparition (Zebrowski & Ratsimbazafy, 1979, DRDR de la Région du Vakinankatra, 2007).

### **III.1.5 Activités de la population locale**

Andranomanelatra est une excellente zone de production, d'une vaste gamme de cultures. La principale activité de la population est l'agriculture, les paysans accordent une importance particulière sur la culture du riz (en rizière) et les cultures vivrières sur *tanety* (maïs, manioc, soja, pomme de terre, haricot).

Andranomanelatra est également une zone de production fruitière très variée: pêcher, prunier, pommier, poirier etc.

Quant à l'élevage, les paysans de la commune d'Andranomanelatra peuvent élever plusieurs types de bovins. Les zébus servent essentiellement à la traction (transport et travaux des champs) et sont nourris grâce à la vaine pâture. Les vaches laitières sont conduites en stabulation et nourries à partir des fourrages cultivés et d'aliments achetés. L'ensemble des bovins est nourri avec les paille de riz disponibles en fin de récoltes et le fumier (ou poudrette de parc selon les cas) est utilisé pour la fertilisation des parcelles. La plupart des familles engraisse un ou deux porcs de race locale ou importée pour la vente et possède quelques poules de race locale pour la vente et l'autoconsommation (Penot, Rakotofiringa, & Tokarski, 2007).

### **III.1.6 Dispositif expérimental**

#### **III.1.7 Description du dispositif**

Le dispositif d'Andranomanelatra a été mis en place en 2002/2003 par l'URP/SCRID. Ce dispositif, installé sur une surface de 32.200m<sup>2</sup> et dont la surface de chaque parcelle varie de 850 m<sup>2</sup> à 4400 m<sup>2</sup>, sert de support expérimental. Deux types de modes de gestion s'imposent sur le dispositif : (i) systèmes de culture avec couverture végétale permanente, et (ii) un système conventionnel de labour. Tous les systèmes sont installés avec deux niveaux de fertilisation :

- i. Une fumure purement organique notée « Fu » correspond à l'apport de 5 t.ha<sup>-1</sup> de fumier de ferme, et
- ii. Une fumure organo-minérale notée « FM » avec un apport organique identique au précédant (5 t.ha<sup>-1</sup> de fumier), auquel s'ajoute un apport d'engrais minéraux (150 kg de N<sub>11</sub>P<sub>22</sub>K<sub>16</sub> et 50 kg d'urée en une fois à 35 à 40 jours au plus tard après le semis.

Le dispositif est disposé en blocs complets répartis au hasard avec 4 répétitions (bloc )

La figure 5 montre le plan détaillé du dispositif expérimental.

### DISPOSITIF CENTRAL PCP-URP SCRiD / (ARO'S) à ANDRANOMANELATRA Campagne 2012-2013

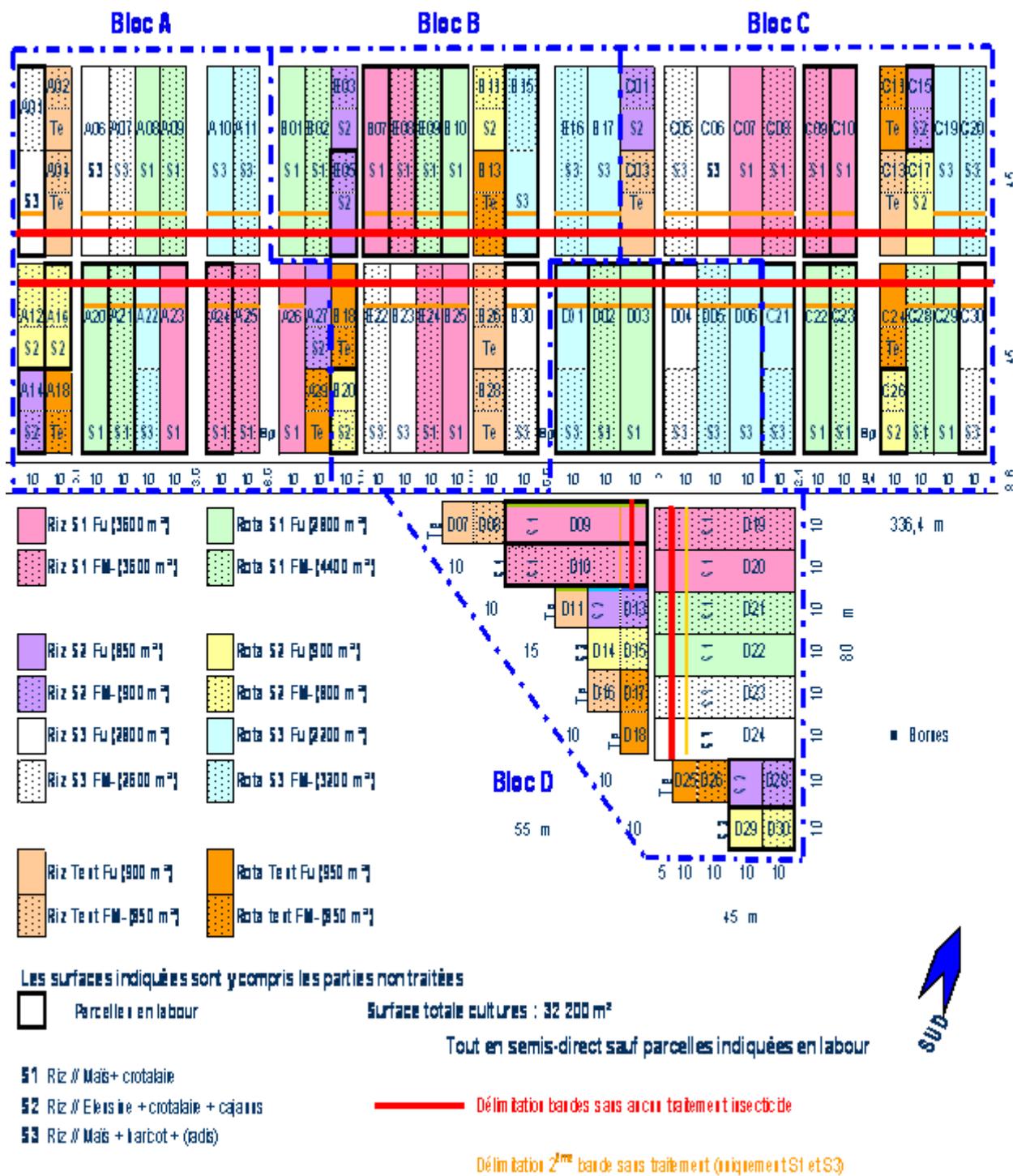


Figure 5: dispositif d'Andranomanelatra

### III.1.8 Itinéraire technique

#### a) Préparations des parcelles

Pour les systèmes conventionnels, l'opération de labour s'effectue manuellement à l'aide de l'*angady* (sorte de bêche à fer plat et étroit) jusqu'à 25 cm de profondeur.

Et pour les systèmes SCV, les résidus de cultures sont laissés sur les parcelles et le semis est effectué manuellement à travers le *mulch* et/ou la couverture vivante.

#### b) Semis

##### • **Système S1 : riz // maïs + crotalaire**

Pour les parcelles en riz, la variété Chhomrong Dhan est utilisée. Pour les parcelles en association, le maïs et la crotalaire sont semés simultanément avec une simple ligne de maïs et deux lignes de crotalaire à 25cm de celle du maïs; l'écartement entre deux lignes de maïs est de 1 m et de 50 cm entre deux lignes de crotalaire ; et la distance sur la ligne pour maïs et crotalaire est la même qui est de 40 cm. La variété du maïs utilisée est la variété « Tombontsoa ».

##### • **Système S2 : riz // éleusine + crotalaire + cajanus**

Pour les parcelles riz, la variété utilisée est toujours la variété Chhomrong Dhan. Et le semis est identique au système S1. Pour les parcelles en association, les plantes de couverture sont semées simultanément, avec les densités habituelles, en lignes alternées à 40 cm. L'éleusine, avec ses semences très petites, doit être semée presque en surface, c'est-à-dire à peine recouverte. La moitié de la surface subit une coupe optimale du cajanus et de l'éleusine pendant le cycle cultural.

##### • **Système S3 : riz // maïs + haricot + (radis fourrager)**

Pour les parcelles riz, la variété utilisée est toujours la variété Chhomrong Dhan ; les parcelles non traitées et nouvellement non traitées sont gardées. Pour les parcelles en association, les maïs sont semés en doubles lignes en quinconce à 40 cm ; écartées de 160 cm, 3 lignes de plantes d'haricot sont associées entre les lignes de maïs à 40 cm, sur les lignes, les distances entre poquets restent inchangées (maïs : 40 cm ; haricot : 20 cm). Le maïs et le haricot sont semés simultanément ; le radis fourrager est semé en dérobée (densité 20\*20 cm) pas avant fin février. La variété d'haricot utilisée est la variété « lingot blanc Soafianarana » et variété « Tombontsoa » pour le maïs. La gestion par coupe du radis se fait de 2,5 à 3 mois après le semis et les racines sont laissées en place.

##### • **Parcelles testes**

Elles sont utilisées pour comparer un certain nombre de systèmes en petites parcelles uniquement en SCV.

Test riz : la variété utilisée est toujours la variété Chhomrong Dhan, le semis se fait en poquets (8 graines), distants de 20 cm x 20 cm.

Test rotation : deux systèmes sont comparés :

- Avoine pure, le semis se fait en poquet de 20 cm x 20 cm, et
- Avoine associé avec vesce semés en simultanément, deux lignes d'avoine pour une ligne de vesce, à 20 cm et 40 cm entre les poquets de vesce.

Les parcelles sont subdivisées, la moitié avec une coupe seule vers le 15 janvier, la moitié avec d'autres coupes (au moins une à 45 jours après la 1<sup>ère</sup>).

Durant cette expérimentation, trois systèmes de culture (S1 : riz//maïs+crotalaire, S2 : riz//éleusine+crotalaire+cajanus, S3 : riz//haricot+maïs) et le test d'avoine en pur sont étudiés (Cf. Annexe 3).

## III.2 Méthodes

### III.2.1 Prélèvements et mesure sur terrain

Les travaux sur terrain se sont déroulés au cours du mois de mars 2013. Le maïs, le riz et l'avoine étaient au stade de floraison tandis que la crotalaire et l'éleusine en début de floraison. Le prélèvement de biomasse aérienne pour le haricot a été fait en Février (période de récolte).

Au moment de l'étude, le radis fourrager n'était pas encore semé et le cajanus était encore immature ce qui nous a empêché de faire des prélèvements sur ces plantes. Toutes les données sur ces plantes sont alors recueillies de la production sur le même dispositif de l'année précédente.

Pour cette étude, deux compartiments de biomasses ont été collectés : la biomasse aérienne et la biomasse racinaire.

#### III.2.1.1 Biomasse aérienne ou biomasse épigée

La méthode directe ou destructive ou encore récolte intégrale a été utilisée pour quantifier la biomasse aérienne. Elle consiste à faucher au ras du sol l'ensemble de la végétation dans une surface définie et d'effectuer sur terrain la mesure de poids de matière fraîche et la prise d'un échantillon pour la détermination de l'humidité (T.Jaffré, Fritsch, & Namur, 1983).

Le prélèvement a été effectué à l'aide d'un cadre métallique dont les dimensions varient selon les plantes pour faciliter la délimitation de la surface à prélever.

- Pour l'association en S1 (**maïs+ crotalaire**), le prélèvement consistait à couper deux poquets de maïs et de couper au ras du sol toutes les crotalaires dans le cadre de 50 cm x 100 cm.
- Pour l'association en S2 (**éleusine + crotalaire + cajanus**), tous les éleusines et toutes les crotalaires dans le cadre de 1m x 1m ont été fauchés au ras du sol.
- Pour l'association en S3 (**maïs+haricot+radis**), le prélèvement a été fait dans un cadre de 0,5 m x 2m.

- Pour le **riz**, le prélèvement a été effectué dans un cadre de 1 m x 1 m. Il est à noter que le prélèvement du riz a été effectué sur les parcelles en S3 et les valeurs obtenues sont utilisées pour tous les systèmes en rotation avec le riz (S1, S2, S3).
- Pour l'**avoine** cultivée en pur, la surface à prélever était de 1 m<sup>2</sup>.

La biomasse collectée dans l'aire de prélèvement a été pesée sur terrain pour avoir le poids de la matière fraîche. La biomasse ainsi pesée a été placée dans de sac étiqueté, avant la mise en étuve pour estimer la teneur en matière sèche de la biomasse.

### ***III.2.1.2 Biomasse racinaire ou biomasse hypogée***

Diverses méthodes peuvent être utilisées pour la quantification de la biomasse hypogée mais le choix a porté sur la méthode de sondage ou de carottage. Elle consiste à effectuer des prélèvements par des sondes à carotter. Nombreux sont les types de sondes et ils sont plus ou moins complexes. Le prélèvement des carottes peut se faire de deux façons (i) soit en creusant une fosse et en enfonçant la sonde horizontalement dans les parois de la fosse : cette méthode est destructive mais présente l'avantage de pouvoir faire une rapide observation du profil avant de délimiter les horizons à prélever ; (ii) soit en enfonçant la sonde verticalement à partir de la surface du sol, cette méthode est moins destructive.

#### **III.2.1.2.1 Prélèvement sur terrain par carottage en surface**

L'appareil utilisé est fabriqué dans un tube en fonte acier de 6 mm d'épaisseur et de 10,1 cm de diamètre intérieur (**Cliché.1**). La tête de la sonde est limée pour faciliter sa pénétration dans le sol. La procédure consiste à prélever une carotte de sol-racines jusqu'à une profondeur de 40 cm (divisée en deux horizons : 0-20cm et 20-40cm) à l'aide de la sonde, puis récupérer la terre contenue dans la carotte dans un sac en plastique étiqueté. Le nombre et les points de prélèvement varient suivant le système étudié (Cf. Annexe 4 et 5).



**(a)**



**(b)**

**Cliché 1 : (a), (b): enfoncement du cylindre de surface**

Source : Auteur

### III.2.1.2.2 Carottage en fosse

La méthode consiste à confectionner une fosse de 2 m de profondeur, placée sur le bord de chaque parcelle étudiée. La fosse se situe à 10 cm environ des pieds des plantes (**Cliché.2**). La carotte utilisé pour le prélèvement est fabriquée en acier avec un diamètre de 8 cm et une hauteur de 10cm. L'objectif de cette méthode est de mesurer la répartition des racines tout au long du profil afin d'extrapoler les autres mesures qui n'ont été faites que jusqu'à 40cm de profondeur par le carottage en surface. Les profondeurs de prélèvements varient selon le système de culture étudié (Cf Annexe 6).



(a)



(b)

**Cliché 2 : (a) : enfoncement du cylindre de fosse (b) : prélèvements par cylindre de fosse sous pied de maïs**

Source : Auteur

Les prélèvements en fosse ont été réalisés exclusivement sur les parcelles en semis direct (SCV) avec la fertilisation Fu. Les échantillons (bloc sol-racines) obtenus par carottage en surface et en fosse sont ramenés au laboratoire dans des sacs plastiques étiquetés et gardés en chambre froide jusqu'au traitement.

## III.2.2 Travaux de laboratoire

### *III.2.2.1 Pour la biomasse aérienne*

Les échantillons sont placés dans l'étuve réglée à 60 °C pendant 72 heures (**Cliché.3a**). Lorsque les échantillons sont trop volumineux, l'ensemble de l'échantillon est pesé (**Cliché.3b**), et seulement une aliquote est passée à l'étuve.



(a)



(b)

**Cliché 3 : (a) : étuve ; (b) : balance de précision**

Source : Auteur

### ***III.2.2.2 Pour la biomasse racinaire***

Les racines sont récupérées au jet d'eau à travers de deux tamis superposés (1 mm et 0,5 mm) (**Cliché.4a**). Après élimination des impuretés (sables, brindilles, charbon, cailloux, ...) et ressuyage, les racines retenues sont pesées, puis placée dans un sac étuvable étiqueté (**Cliché.4b**). Ensuite, elles sont passées à l'étuve réglée à 60 °C pendant 72 heures (**Cliché.4c**) puis pesées à l'aide d'une balance de précision pour avoir le poids de la matière sèche.



(a)



(b)



(c)

**Cliché 4 : (a) : séparation du bloc sol-racines avec de l'eau et du tamis ; (b) : échantillons de racines avec sac étiqueté ; (c) : mise en étuve des racines**

Source : Auteur

### III.2.3 Traitements et analyses des données

Cette partie concerne le calcul de la quantité de biomasses et le calcul des stocks de carbone dans chaque pool ainsi que les analyses statistiques afin de vérifier les hypothèses posées.

#### III.2.3.1 Estimation de la biomasse

- **Biomasse aérienne** : Après les mesures sur terrain et les traitements au laboratoire, la valeur de la biomasse sèche est ramenée à l'hectare (Cf. Annexe 7 pour le calcul de matière sèche MS).

- **Biomasse racinaire** :

Pour ramener la quantité de racines obtenue par le cylindre de surface à l'hectare, une pondération sur une surface représentative de la parcelle (surface élémentaire) est nécessaire. La quantité de racines ainsi obtenue est divisée par la surface du cylindre pour avoir la quantité de racine par cylindre avec laquelle on fera l'extrapolation à l'hectare des racines dans l'horizon 0-40cm (Cf. Annexe 8).

Pour les racines obtenues par cylindre de fosse, l'équation de régression de distribution des racines sur le profil du sol est utilisée pour avoir la quantité de racines existantes dans différentes profondeurs (Cf. Annexe 9). L'objectif de ce type de prélèvement est d'avoir la quantité de racines dans les profondeurs au-delà de 40cm par intégration de l'équation de régression.

#### III.2.3.2 Estimation du stock de carbone dans les biomasses

Pour calculer le stock de carbone dans les biomasses, le coefficient de conversion de la biomasse sèche (poids sec) en carbone est utilisé selon l'équation suivante :

$$\text{Quantité de carbone stockée} = \text{coef.} \times \text{Poids Sec}$$

Ce coefficient de conversion varie selon la plante considérée mais généralement il est autour de 0,5. Ces valeurs sont regroupées dans le tableau 2:

**Tableau 2: coefficient de conversion en carbone de quelques plantes**

| plantes                                | coefficient |
|--|-------------|
| Graminées (maïs, éleusine,...)         | 0,41        |
| Céréales (riz, avoine, ...)            | 0,45        |
| Légumineuses (haricot, crotalaire,...) | 0,3 à 0,4   |

#### III.2.3.3 Estimation de carbone apporté au sol par les systèmes de culture étudiés

Le modèle Hénin Dupuis a été utilisée pour décrire l'évolution des matières organiques dans le sol d'une parcelle cultivée à long terme. Proposé en 1945, il s'agit d'un modèle mathématique simple. Il fait intervenir deux paramètres : le coefficient d'humification  $k_1$  (sans unité) qui dépend de la nature des apports organiques et le coefficient de minéralisation

$k_2$  (exprimé en % par an) qui dépend des conditions pédoclimatiques (Wylleman R et al., 2001).

Pour que le niveau de matière organique d'un sol reste constant, il faut que, par unité de temps, la quantité qui se forme compense la quantité qui se détruit par minéralisation. En effet, il se détruit d'autant plus de matière organique par unité de temps que sa concentration dans le sol est plus élevée. Par concentration, on obtient le tonnage de carbone par hectare dans la couche 0-40cm (Laudelout, 1945).

La quantité de matière organique présente dans le sol au temps  $t$  est donnée par l'équation suivante :

Avec  $y_t$  : quantité de carbone dans le sol au temps  $t$  (en tonnes de carbone);

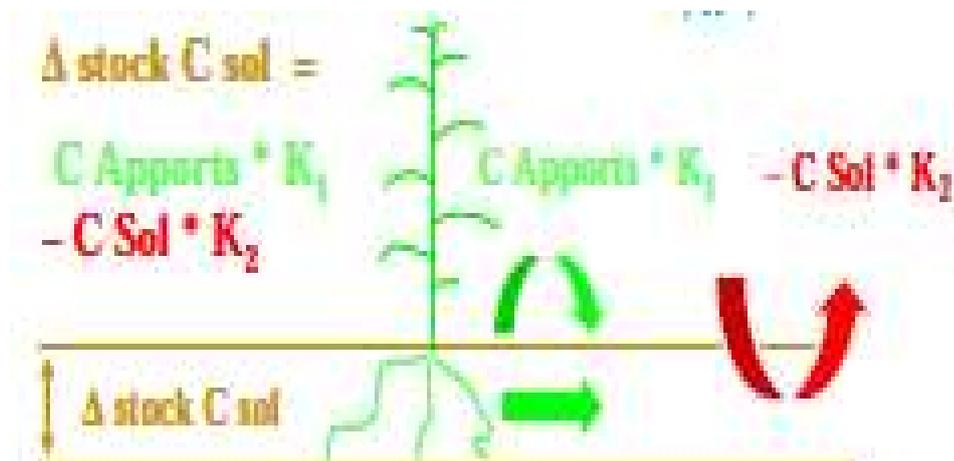
$y_0$  : quantité de matière organique humifiée dans le sol au temps  $t = 0$  (en tonnes de carbone)

$t$  : temps ;

$x$  : apport annuel de matière organique (en tonnes de matière sèche);

$K_1$  : coefficient isohumique, dépend de la nature des apports organiques;

$K_2$  : coefficient de minéralisation, dépendant des conditions pédoclimatiques.



**Figure 6: récapitulation du modèle Hénin Dupuis**

Source : (Autfray et al., 2006)

Il est à noter que notre étude tient compte des apports de carbone par le fumier. Ce dernier renferme environ 12% de son poids sec en carbone (Données Andranomanelatra) (Cf Annexe 10).

Les données nécessaires pour la simulation sont les suivantes :

- Le stock de carbone dans le sol d'Andranomanelatra a été calculé par la formule :  
**Stock C = teneur en C x densité apparente x épaisseur de sol** (Feller, 1995).
- Les teneurs en carbone organique du sol d'Andranomanelatra sont de 3,76% pour l'horizon 0-20cm et 4,135% pour l'horizon 20-40cm (Razafimbelo, 2005).
- La densité apparente du sol : les sols d'Andranomanelatra sont très argileux avec une densité apparente moyenne de 0,87 g.cm<sup>-3</sup> pour l'horizon 0-20cm et 0,95 g.cm<sup>-3</sup> pour l'horizon 20-40cm (Razafimbelo, 2005). Ces valeurs sont trouvées sur sols labourés et dans notre simulation, on les garde pour les sols en SCV car on considère que les sols étudiés sont initialement labourés avec l'hypothèse que toutes les situations auraient eue le même stock de C à la mise en place des systèmes SCV.
- L'épaisseur du sol considéré est de 20cm pour les deux horizons (0 à 20cm et 20 à 40cm).
- Le coefficient K1 : 0,12 pour le maïs, 0,15 pour le riz, 0,18 pour les légumineuses (haricot, crotalaire, ...) et 0,3 pour le fumier (Ancelin, Duranel, Duparque, Fleutry, & Dersigny, 2007) (Charreau, 2009).
- Le coefficient K2 : 0,017 pour les sols en semis direct en milieu tropical et 0,046 pour les sols labourés en milieu tropical. (Schvartz, Muller et Decroux, 2005)

#### **III.2.3.4 Analyses et traitements statistiques**

Les données ont été enregistrées sous Microsoft Excel 2007 et y sont organisées en tableau croisé dynamique. Nos données sont aussi traitées dans le logiciel XLSTAT 2008. Les traitements statistiques effectués sont :

- ❖ **les statistiques descriptives** : déterminent les caractéristiques d'une population tels que les paramètres de tendance (moyenne, médiane, mode...) et les paramètres de dispersion (étendue, variance, écart-type, coefficient de variation...).
- ❖ **les statistiques analytiques** : consistent à tester les hypothèses de recherche. Dans cette étude, il s'agit surtout de comparer les moyennes obtenues pour chaque plante (étude de biomasse aérienne) et pour chaque culture (étude de biomasse racinaire). Des tests de normalité et de comparaison de la variance ont été réalisés au préalable pour déterminer si des tests paramétriques peuvent être utilisés. L'analyse de la variance (ANOVA) à un ou deux facteurs a été utilisée afin de détecter l'effet du mode de gestion du sol (SCV et labour), la fertilisation apportée (FM et Fu) ainsi que l'interaction entre les deux sur les variables (Cf. Annexe 11 et 12).

## IV RESULTATS

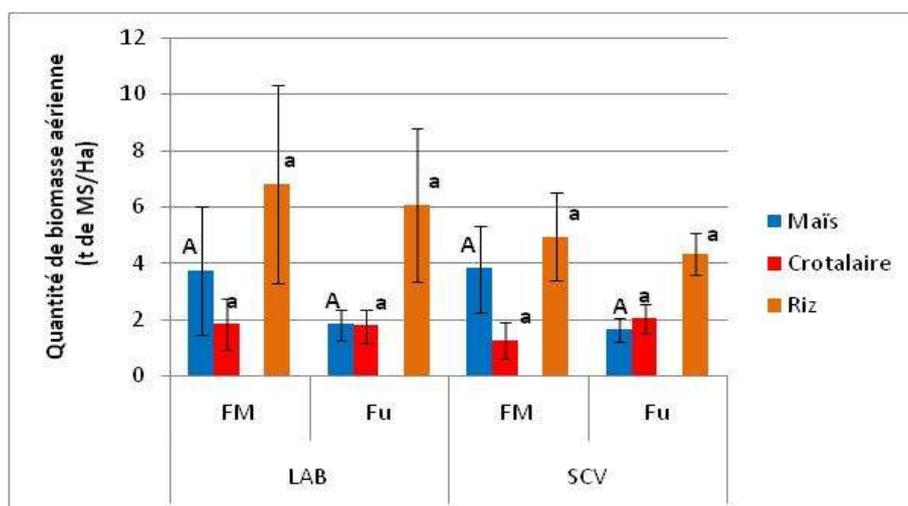
### IV.1 Biomasses produites (Cf. Annexe 13)

#### IV.1.1 Biomasse aérienne

Les biomasses de cajanus et du radis fourrager n'ont pas été mesurées sur terrain, étant donné que les plantes de cajanus étaient encore immatures et celles du radis fourrager pas encore semées lors de la phase de travail sur le terrain. Pour ces deux plantes les quantités des biomasses aériennes utilisées dans ce rapport proviennent des mesures effectuées sur le même dispositif l'année précédente (2012).

##### IV.1.1.1 Biomasse aérienne produite par le système S1 : riz//maïs+crotalaire

La biomasse aérienne produite par le système S1 est représentée par la figure 7 :



**Figure 7: quantité de biomasse aérienne produite par S1 selon le mode de gestion et la fertilisation**

*Pour une même plante les valeurs suivies de la même lettre indique qu'elles ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% d'après le test de Tukey.*

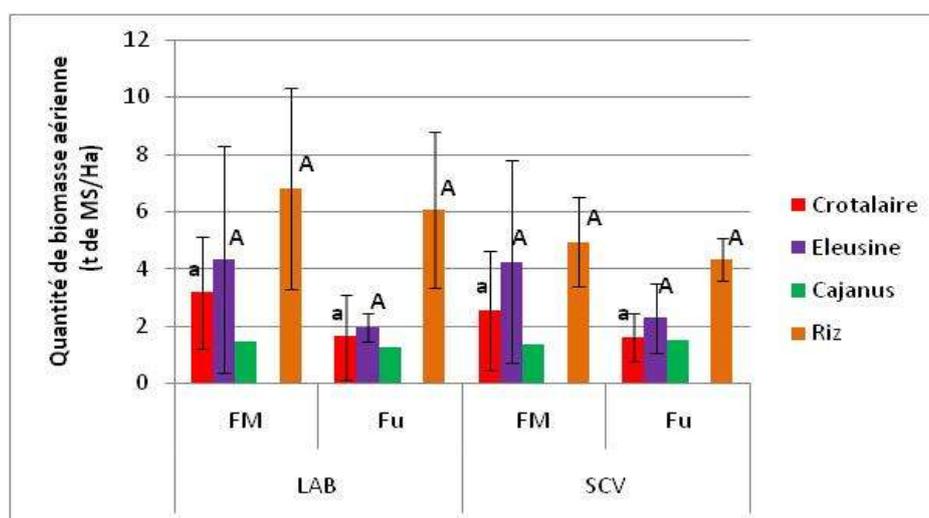
La quantité de biomasse aérienne du maïs n'est pas significativement différente entre les traitements étudiés (SCV vs LAB) et la fertilisation apportée (FM vs Fu). Suivant l'ordre décroissant, la quantité pour chaque traitement est de  $(3,8 \pm 1,53)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec apport FM ;  $(3,74 \pm 2,27)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec apport FM ;  $(1,8 \pm 0,55)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec apport Fu et  $(1,62 \pm 0,41)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec apport Fu.

Une observation similaire est constatée pour les deux autres cultures : crotalaire et riz. Pour la crotalaire, la quantité obtenue pour chaque traitement est de  $(1,83 \pm 0,93)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec apport FM ;  $(1,71 \pm 0,59)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec apport Fu ;  $(1,25 \pm 0,66)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec apport FM et  $(2,03 \pm 0,59)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec apport Fu.

Pour le riz, la quantité de biomasse aérienne produite pour chaque traitement est de  $(6,81 \pm 3,53)$  t de  $MS.ha^{-1}$  en labour avec apport FM ;  $(6,05 \pm 2,73)$  t de  $MS.ha^{-1}$  en labour avec apport Fu ;  $(4,93 \pm 1,56)$  t de  $MS.ha^{-1}$  en SCV avec apport FM et  $(3,8 \pm 1,53)$  t de  $MS.ha^{-1}$  en SCV avec apport Fu.

#### IV.1.1.2 Biomasse aérienne produite par le système S2 : riz// éléusine+crotalaire+cajanus

La biomasse aérienne produite par le système S2 est représentée par la figure 8 :



**Figure 8: quantité de biomasse aérienne produite par S2 selon le mode de gestion et fertilisation**

*Pour une même plante les valeurs suivies de la même lettre indique qu'elles ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% d'après le test de Tukey.*

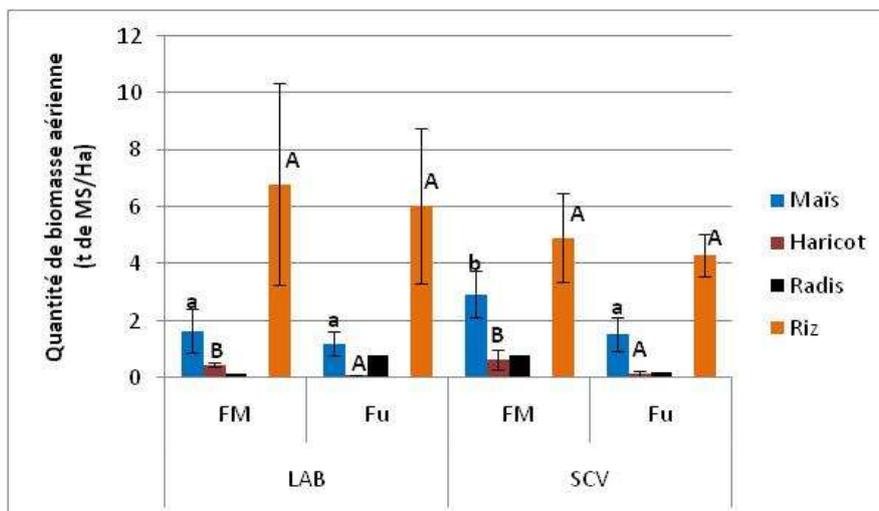
Les résultats obtenus pour l'éléusine indiquent une absence de différence significative de la quantité de biomasse aérienne de l'éléusine entre les systèmes SCV et labourés, de même au niveau de la fertilisation (Figure 8). D'ordre décroissant, ces valeurs sont de  $(4,31 \pm 3,97)$  t de  $MS.ha^{-1}$  en labour avec apport FM ;  $(4,23 \pm 3,54)$  t de  $MS.ha^{-1}$  en SCV avec apport FM ;  $(2,28 \pm 1,22)$  t de  $MS.ha^{-1}$  en SCV avec apport Fu et  $(1,94 \pm 0,54)$  t de  $MS.ha^{-1}$  en labour avec apport Fu.

Une observation similaire est constatée pour les autres plantes : crotalaire et riz. Pour la crotalaire, les résultats sont de  $(3,15 \pm 1,95)$  t de  $MS.ha^{-1}$  en labour avec apport FM ;  $(2,54 \pm 2,10)$  t de  $MS.ha^{-1}$  en SCV avec apport FM ;  $(1,62 \pm 1,49)$  t de  $MS.ha^{-1}$  en labour avec apport Fu et  $(1,61 \pm 0,83)$  t de  $MS.ha^{-1}$  en SCV avec apport Fu.

En ce qui concerne le riz, les valeurs obtenues sont les mêmes qu'en système S1.

#### IV.1.1.3 Biomasse aérienne produite par le système S3 : riz//haricot+maïs+radis fourrager

La biomasse aérienne produite par le système S2 est représentée par la figure 9 :



**Figure 9: quantité de biomasse aérienne produite par S3 selon le mode de gestion et fertilisation**

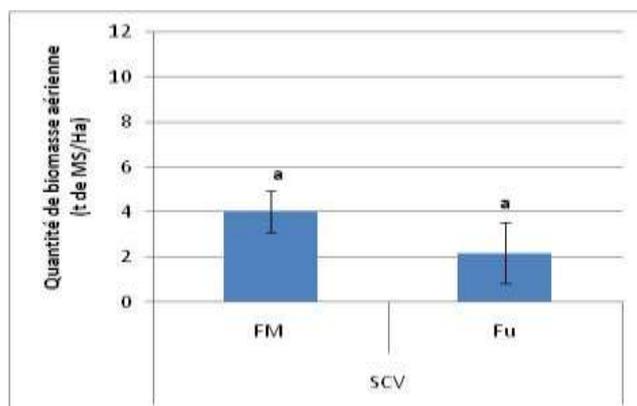
*Pour une même plante les valeurs suivies de la même lettre indiquent qu'elles ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% d'après le test de Tukey.*

Pour le maïs, les différences entre les traitements étudiés (SCV vs LAB) et la fertilisation apportée (FM vs Fu) sont significatives. La quantité de biomasse aérienne la plus élevée est de  $(2,94 \pm 0,80)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec apport FM. Les valeurs pour les autres traitements sont de  $(1,66 \pm 0,77)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec apport FM ;  $(1,54 \pm 0,60)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec apport Fu et  $(1,21 \pm 0,41)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec apport Fu.

Pour le haricot, l'existence de différence significative entre la fertilisation apportée (FM vs Fu) est notée. La quantité de la biomasse aérienne en SCV avec apport FM est supérieure ( $0,63 \pm 0,3$  t de MS.ha<sup>-1</sup>) par rapport à celle en SCV avec apport Fu ( $0,13 \pm 0,11$  t de MS.ha<sup>-1</sup>). La quantité de biomasse aérienne obtenue en labour avec apport FM ( $0,45 \pm 0,06$  t de MS.ha<sup>-1</sup>) est aussi élevée que celle obtenue en labour avec apport Fu ( $0,13 \pm 0,11$  t de MS.ha<sup>-1</sup>). Quant au riz, les valeurs sont les mêmes qu'en système S1.

#### IV.1.1.4 Biomasse aérienne produite par l'Avoine

La biomasse aérienne produite par l'avoine est représentée par la figure 10 :



**Figure 10: quantité de biomasse aérienne produite par l'avoine en pur avec deux fertilisations différentes**

Les valeurs suivies de la même lettre indiquent qu'elles ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% d'après le test de Tukey.

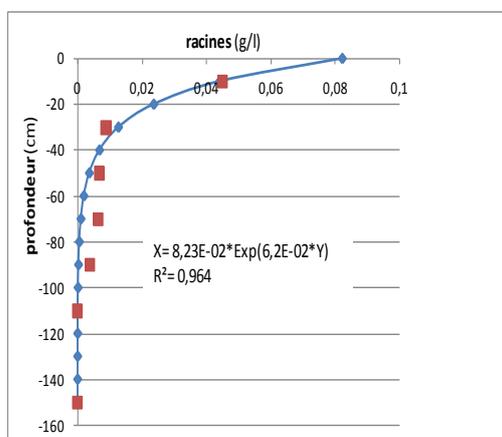
Les résultats obtenus indiquent une absence de différence significative entre les quantités de biomasse aérienne produites par l'avoine avec deux niveaux de fertilisation (FM et Fu). Sous parcelles FM et Fu, les quantités de biomasses aérienne sont respectivement de  $(4,03 \pm 0,96 \text{ t de MS}\cdot\text{ha}^{-1})$  et  $(2,18 \pm 1,32 \text{ t de MS}\cdot\text{ha}^{-1})$ .

#### IV.1.2 Biomasse hypogée ou biomasse racinaire

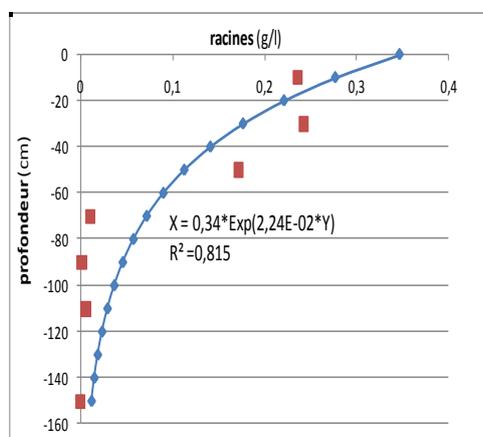
##### IV.1.2.1 Modèle de distribution des racines

Les modèles de distribution des racines dans le sol en fonction de la profondeur (cm) sont représentés dans les figures suivantes :

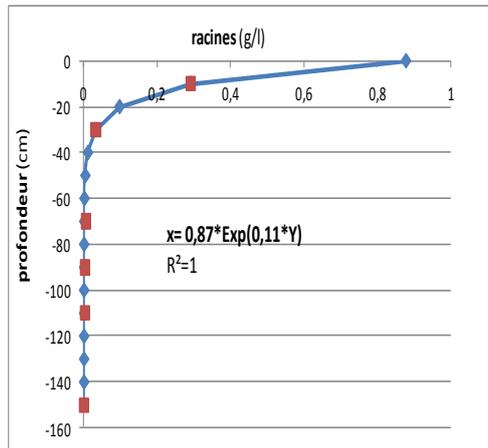
##### a- Distribution dans la fosse de l'association en S1 : maïs+crotalaire



(a)



(b)



(c)

**Figure 11: Modèle de distribution des racines : entre ligne de crotalaire (a), sous pieds de crotalaire (b) et sous pieds de maïs (c).**

La densité de racines au niveau d'un pied de crotalaire (jusqu'à 0,35 g.l<sup>-1</sup> de sol) est beaucoup plus élevée que celle entre deux pieds de crotalaire (jusqu'à 0,08 g.l<sup>-1</sup> de sol). Sous pied de maïs, cette densité peut atteindre jusqu'à 0,8 g.l<sup>-1</sup> de sol.

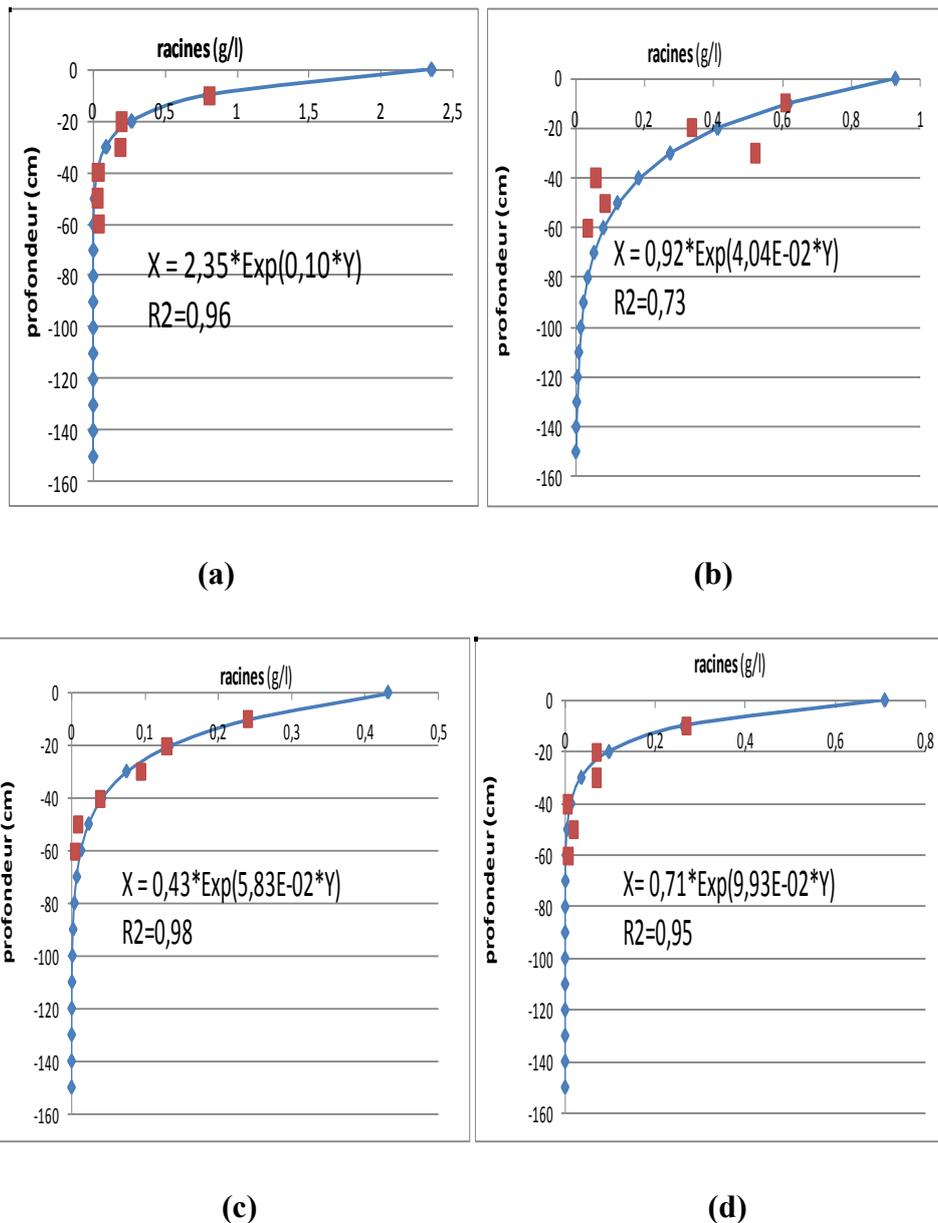
Entre deux pieds de crotalaire (**Fig. 11a**), la quantité de racines par unité de volume diminue régulièrement pour disparaître à partir de 100 cm sous pied de crotalaire (**Fig.11b**) et à partir de 80cm sous pied de maïs (**Fig.11c**).

**Tableau 3: quantité de racines (en g.l<sup>-1</sup>) dans les fosses de l'association en S1 répartie selon deux horizons (Cf Annexe 9)**

| Horizons        | Sous Pied maïs | Entre Ligne crotalaire | Sous Pied crotalaire |
|-----------------|----------------|------------------------|----------------------|
| 0-40 cm (a)     | 7,87           | 1,21                   | 9,14                 |
| +40cm (b)       | 0,9            | 0,1                    | 6,26                 |
| rapport (b)/(a) | <b>0,12</b>    | <b>0,08</b>            | <b>0,68</b>          |

Le tableau 3 montre que les racines de ces plantes (maïs et crotalaire) se concentrent dans l'horizon 0-40cm. Sous pied de maïs, 11, 43% de la quantité totale de racines se trouve au-delà de 40cm de profondeur. Cette proportion est de 68,49% sous pied de crotalaire et de 8,26% entre deux pieds de crotalaire.

**b- Distribution dans la fosse de l'association en S2 : éléusine+crotalaire+cajanus**



**Figure 12: Modèle de distribution des racines : sous pied d'éléusine (a), sous pied de crotalaire (b), entre éléusine et crotalaire (c) et entre crotalaire et cajanus (d)**

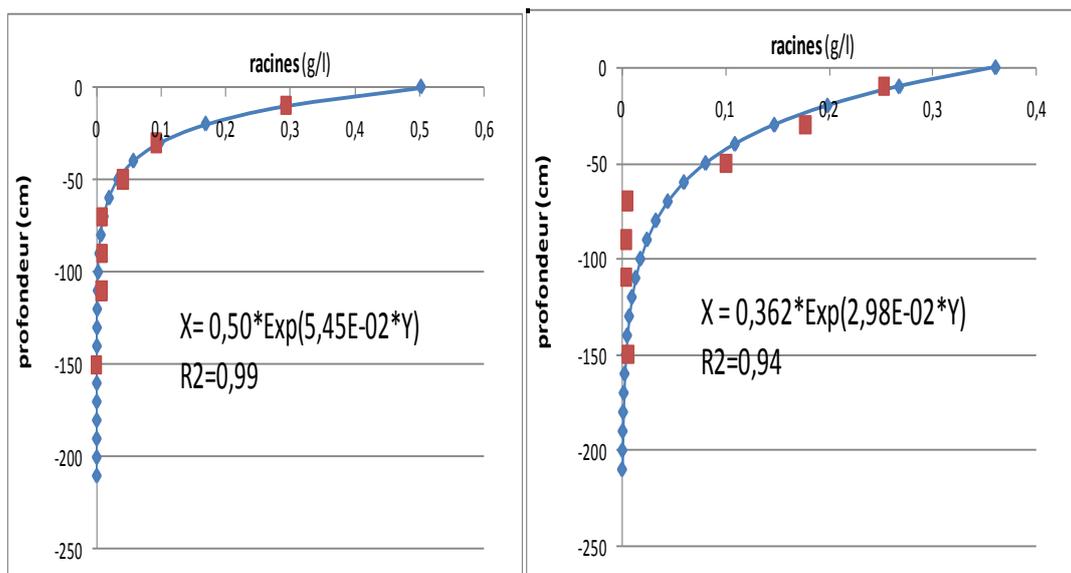
La quantité de racines par unité de volume au niveau d'un pied d'éléusine (**Fig.12a**) ( $2,5g \cdot l^{-1}$  de sol) est beaucoup plus élevée que celle entre un pied d'éléusine et un pied de crotalaire (**Fig.12c**) ( $0,45g \cdot l^{-1}$  de sol). Sous pied de crotalaire (**Fig.12b**) et entre un pied de crotalaire et un pied de cajanus (**Fig.12d**), cette densité peut atteindre respectivement 0,9 et  $0,7g \cdot l^{-1}$  de sol. La profondeur d'enracinement de l'éléusine est de 50cm (**Fig.12a**) et pour la crotalaire, elle peut atteindre jusqu'à plus 100cm (**Fig.12b**).

**Tableau 4: quantité de racines (en g.l<sup>-1</sup>) dans les fosses de l'association en S2 répartie selon deux horizons (Cf Annexe 9)**

| Horizons        | Sous Pied éleusine | Sous Pied crotalaire | Entre Ligne éleusine et crotalaire | Entre Ligne crotalaire et cajanus |
|-----------------|--------------------|----------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 0-40 cm (a)     | 21,32              | 18,39                | 6,67                               | 7,02                              |
| +40cm (b)       | 0,27               | 4,54                 | 0,71                               | 0,13                              |
| rapport (b)/(a) | <b>0,013</b>       | <b>0,25</b>          | <b>0,11</b>                        | <b>0,019</b>                      |

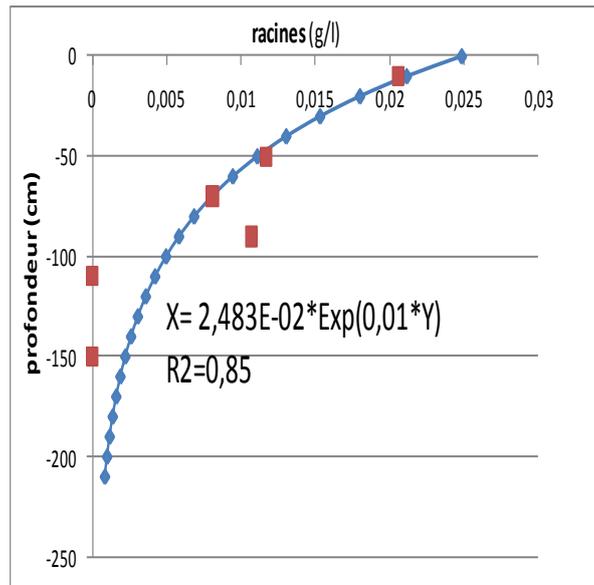
On remarque que la plupart des racines étant concentrée dans les couches superficielles (0-40cm). Sous pied d'éleusine, on retrouve 1,26 % de la totalité de racines au-delà de 40cm de profondeur. Cette proportion est de 24,68 % sous pied de crotalaire, 10,64% entre pied d'éleusine et crotalaire et 1,85% entre pied de crotalaire et cajanus.

**c- Distribution dans la fosse de l'association en S3 : haricot+maïs+radis fourrager**



**(a)**

**(b)**



(c)

**Figure 13: Modèle de distribution des racines : sous pied de maïs (a), entre lignes de maïs (b) et sous pied d'haricot (c).**

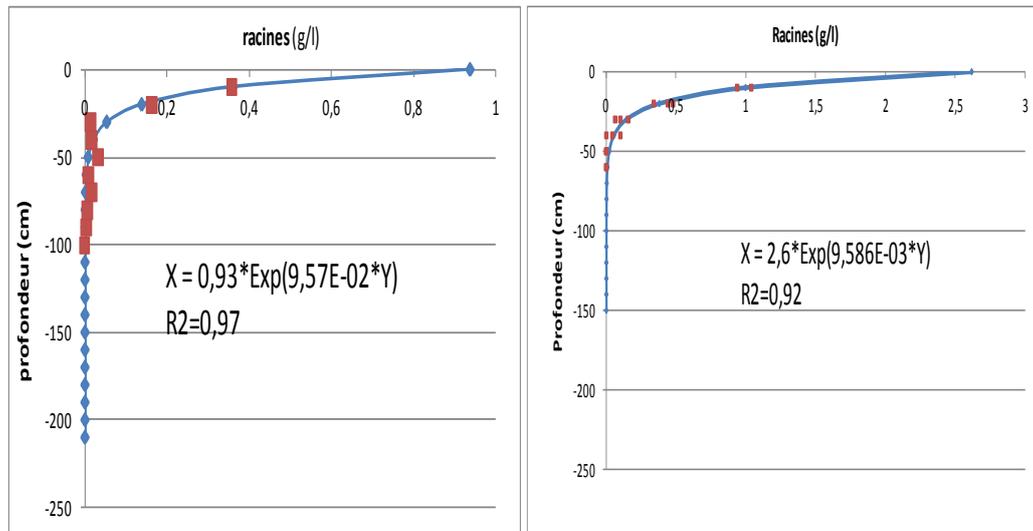
La quantité de racines par unité de volume de sol sous pied de maïs est plus élevée que celle entre pied avec respectivement une quantité jusqu' à 0,5 et 0,35  $\text{g.l}^{-1}$  de sol de sol (**Fig.13a,b**)

Les racines se concentrent dans l'horizon superficiel (0-40 cm). Le tableau montre la proportion de racines dans l'horizon au-delà de 40cm par rapport à l'horizon 0-40cm. Cette proportion est de 12,62% ; 43,51% et 46,82% respectivement sous pied de maïs, entre pied de maïs et sous pied d'haricot.

**Tableau 5: quantité de racines (en  $\text{g.l}^{-1}$ ) dans les fosses de S3 répartie selon deux horizons (Cf Annexe 9)**

| Horizons        | Sous Pied maïs | Entre Ligne maïs | Sous Pied haricot |
|-----------------|----------------|------------------|-------------------|
| 0-40 cm (a)     | 8,16           | 8,41             | 1,73              |
| +40cm (b)       | 1,03           | 3,66             | 0,81              |
| rapport (b)/(a) | <b>0,13</b>    | <b>0,44</b>      | <b>0,47</b>       |

#### d- Distribution dans la fosse de riz



(a)

(b)

**Figure 14: Modèle de distribution des racines : entre ligne de riz (a) et sous pied de riz (b).**

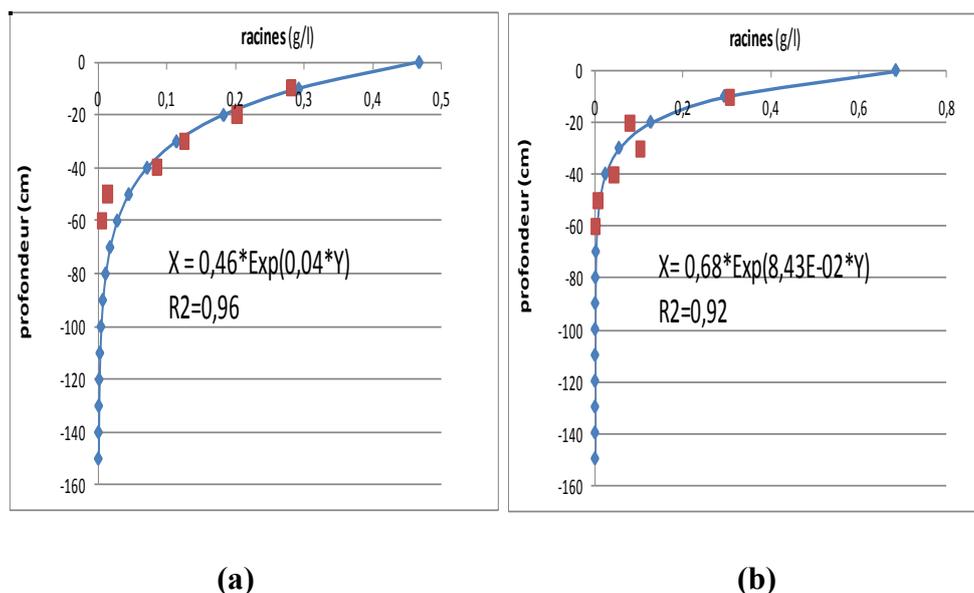
Les figures 14 (a) et (b) montrent que l'enracinement du riz peut aller jusqu'à 70cm de profondeur mais la quantité par unité de volume tend à diminuer en profondeur. En effet, sous pied de riz, la densité est de  $9,59\text{g.l}^{-1}$  entre 0-40 cm de profondeur et de  $0,21\text{g.l}^{-1}$  au delà de 40 cm. Entre ligne de riz, elle est de  $5,63\text{g.l}^{-1}$  entre 0-40 cm de profondeur et de  $0,95\text{g.l}^{-1}$  au delà de 40 cm.

**Tableau 6: quantité de racines (en  $\text{g.l}^{-1}$ ) dans les fosses de riz répartie selon deux horizons (Cf Annexe 9)**

| Horizons        | Sous pied de riz | Entre ligne de riz |
|-----------------|------------------|--------------------|
| 0-40 cm (a)     | 9,59             | 5,63               |
| +40cm (b)       | 0,21             | 0,95               |
| rapport (b)/(a) | <b>0,02</b>      | <b>0,17</b>        |

Les racines du riz se concentrent dans l'horizon 0-40cm que ce soit sous pied ou entre pied. La proportion de racine au-delà de 40cm de profondeur par rapport à la quantité totale est de 2,18% sous pied du riz et de 16,87% entre pied.

### e- Distribution dans la fosse d'avoine



**Figure 15: Modèle de distribution des racines : sous pied d'avoine (a) et entre ligne d'avoine (b)**

Sous pied et entre pied d'avoine, la quantité de racines par unité de volume diminue régulièrement pour disparaître respectivement à 90 et 80cm. En effet, la densité de racines sous pied d'avoine ( $0,46 \text{ g.l}^{-1}$ ) est inférieure à celle entre pied ( $0,68 \text{ g.l}^{-1}$ ).

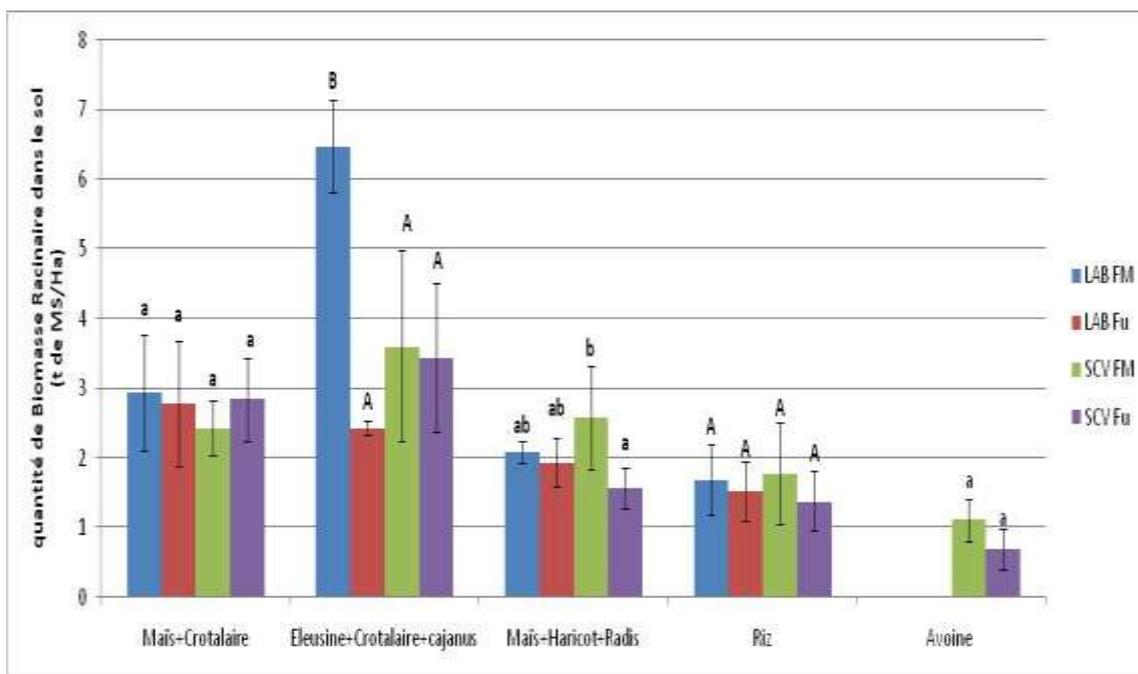
**Tableau 7: quantité de racines (en  $\text{g.l}^{-1}$ ) dans les fosses de l'avoine répartie selon deux horizons (Cf Annexe 9)**

| Horizons        | Sous Pied avoine | Entre Ligne avoine |
|-----------------|------------------|--------------------|
| 0-40 cm (a)     | 8,45             | 7,83               |
| +40cm (b)       | 1,52             | 0,27               |
| rapport (b)/(a) | <b>0,18</b>      | <b>0,03</b>        |

La proportion de racines dans l'horizon au-delà de 40cm de profondeur par rapport à l'horizon 0-40cm est de 17,98% sous pied et de 3,44% entre pied.

#### IV.1.2.2 Quantité de biomasse racinaire produite

La quantité de biomasse racinaire pour tous les traitements étudiés est représentée dans la figure 16.



**Figure 16: quantité de biomasse racinaire des cultures selon les modes de gestion du sol et la fertilisation.**

*Pour une même plante ou une même association, les valeurs suivies de la même lettre indique qu'elles ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% d'après le test de Tukey.*

Pour l'association maïs-crotalaire, les différences observées pour la biomasse ne sont pas significatives entre les traitements étudiés (SCV vs LAB) et la fertilisation apportée (FM vs Fu). Les valeurs obtenues sont  $(2,93 \pm 0,82)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec apport FM ;  $(2,78 \pm 0,89)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec apport Fu ;  $(2,42 \pm 0,39)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec apport FM et  $(2,84 \pm 0,59)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec apport Fu.

Pour l'association éléusine-crotalaire-cajanus, la quantité de biomasse racinaire produite est significativement différente entre la fertilisation apportée (FM vs Fu). La quantité produite en labour avec FM  $(6,47 \pm 0,65)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> est largement élevée par rapport aux autres. Les autres valeurs sont  $(3,6 \pm 1,37)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec apport FM ;  $(3,44 \pm 1,06)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec apport Fu et  $(2,42 \pm 0,10)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec apport Fu.

Pour l'association maïs-haricot-radis fourrager, une observation similaire est observée. La production de biomasse racinaire en SCV avec apport FM  $(2,58 \pm 0,73)$  t de MS.ha<sup>-1</sup> est plus élevée par rapport aux autres. Il s'en suit la production sous traitement labour avec apport

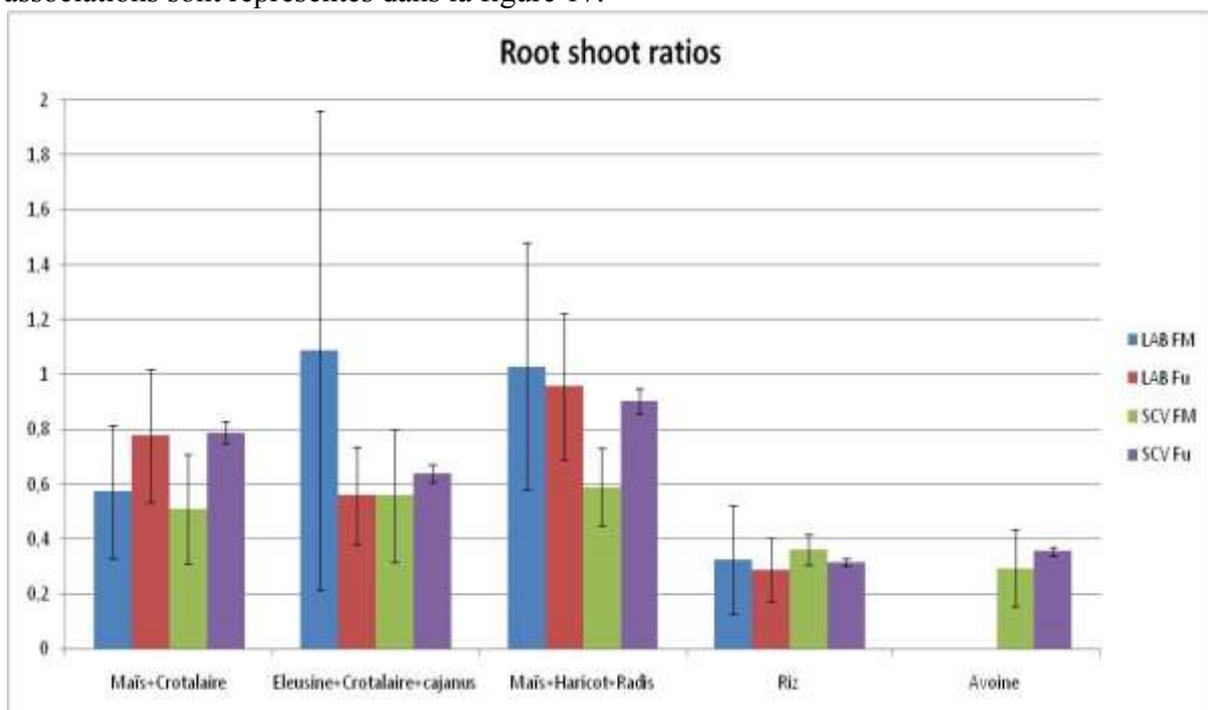
FM ( $2,08 \pm 0,16$  t de MS.ha<sup>-1</sup>), celle sous traitement labour avec apport Fu ( $1,92 \pm 0,35$ ) et celle sous traitement SCV avec apport Fu ( $1,56 \pm 0,48$  t de MS.ha<sup>-1</sup>).

Pour le riz, une absence de différence significative est constatée. La quantité de biomasse racinaire est de ( $1,77 \pm 0,73$ ) t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec apport FM ; ( $1,69 \pm 0,51$ ) t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec apport FM ; ( $1,52 \pm 0,42$ ) t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec apport Fu et ( $1,37 \pm 0,42$ ) t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec apport Fu.

Pour l'avoine, une absence de différence significative entre le niveau de fertilisation est constatée. Les valeurs obtenues avec apport FM et Fu sont respectivement ( $1,11 \pm 0,30$ ) t de MS.ha<sup>-1</sup> et ( $0,68 \pm 0,29$ ) t de MS.ha<sup>-1</sup>.

#### IV.1.3 Le Root/Shoot ratio

La relation entre biomasse racinaire et biomasse aérienne est décrite par les ratios de la biomasse du Root/Shoot (Kummerow, 1982) Ce rapport permet de déterminer la biomasse racinaire en fonction de la biomasse aérienne. Il est défini comme étant la biomasse racinaire divisée par la biomasse aérienne (Mokany *et al.*, 2006). Les Root/Shoot ratios des cultures et associations sont représentés dans la figure 17.



**Figure 17: Root/Shoot ratios des plantes et associations de cultures étudiées selon mode de gestion du sol et fertilisation**

Pour l'association maïs-crotalaire, le ratio est élevé en labour avec apport Fu ( $0,77 \pm 0,24$ ) et en SCV avec apport Fu ( $0,78 \pm 0,21$ ). En labour avec apport FM ( $0,57 \pm 0,24$ ) et en SCV avec apport FM ( $0,51 \pm 0,19$ ) les ratios sont similaires.

Pour l'association éléusine-crotalaire-cajanus, un ratio élevé de l'ordre de  $(1,08 \pm 0,87)$  en labour avec apport FM est constaté. Les autres ratios sont  $(0,64 \pm 0,13)$  en SCV avec apport Fu ;  $(0,55 \pm 0,24)$  en SCV avec apport FM et  $(0,55 \pm 0,17)$  en labour avec apport Fu.

Pour l'association maïs-haricot-radis fourrager, le rapport est le plus élevé en labour avec apport FM avec une valeur de l'ordre de  $(1,02 \pm 0,45)$ , il s'en suit les ratios en labour avec apport Fu  $(0,95 \pm 0,26)$  et en SCV avec apport Fu  $(0,90 \pm 0,40)$ . Le ratio est le plus faible en SCV avec apport FM avec une valeur de  $(0,59 \pm 0,14)$ .

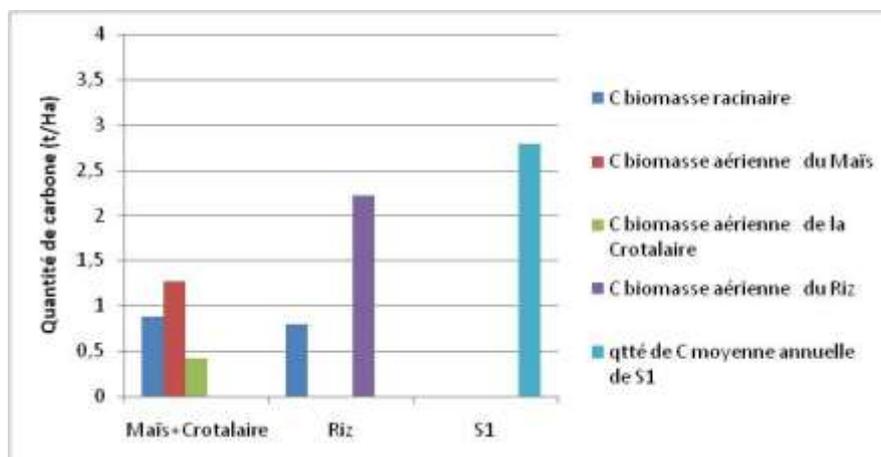
Pour le riz, les ratios selon l'ordre décroissant sont de  $(0,36 \pm 0,05)$  en SCV avec apport FM ;  $(0,32 \pm 0,19)$  en labour avec apport FM ;  $(0,31 \pm 0,06)$  en SCV avec apport Fu et  $(0,28 \pm 0,11)$  en labour avec apport Fu.

En ce qui concerne l'avoine, les ratios obtenus avec apport FM et apport Fu sont respectivement  $(0,29 \pm 0,14)$  et  $(0,35 \pm 0,10)$ .

## IV.2 Estimation du carbone apporté au sol par les biomasses (Cf. Annexe 14)

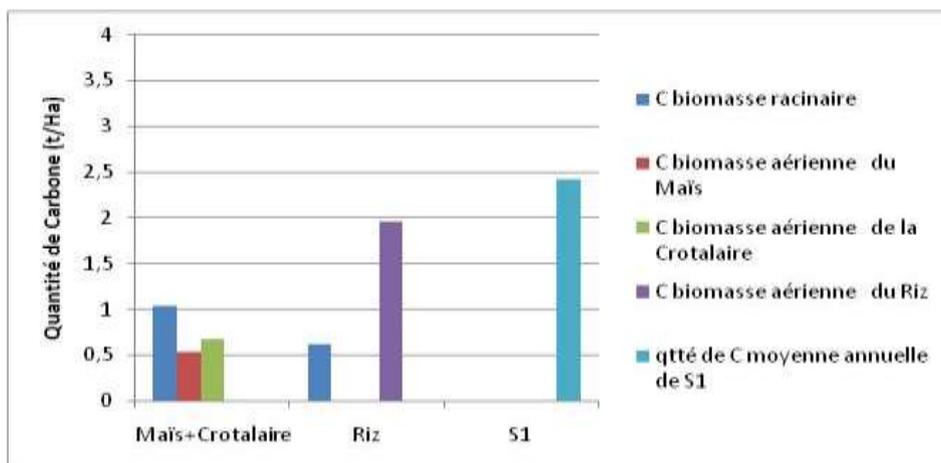
### IV.2.1 Apport au sol par le système S1 : Riz//Maïs+Crotalaire

Les quantités de carbone contenues dans les biomasses (aérienne et racinaire) de la rotation biennale S1 sont représentées dans les figures 18 et 19:



**Figure 18: apport de C au sol par S1 (riz//maïs+crotalaire) en SCV avec la fertilisation FM**

La figure 18 montre qu'avec apport FM le riz et l'association maïs-crotalaire fournissent à peu près les mêmes quantités de carbone par la biomasse racinaire. Elles sont respectivement  $0,79 \text{ t de C.ha}^{-1}$  et  $0,87 \text{ t de C.ha}^{-1}$ . La quantité de carbone apportée par la biomasse aérienne du riz est la plus élevée ( $2,21 \text{ t de C.ha}^{-1}$ ). Elle est suivie respectivement par celle du maïs ( $1,26 \text{ t de C.ha}^{-1}$ ) et celle de la crotalaire ( $0,41 \text{ t de C.ha}^{-1}$ ). En moyenne, les biomasses aérienne et racinaire du système S1 : riz//maïs+crotalaire avec FM apportent  $2,79 \text{ t de}$



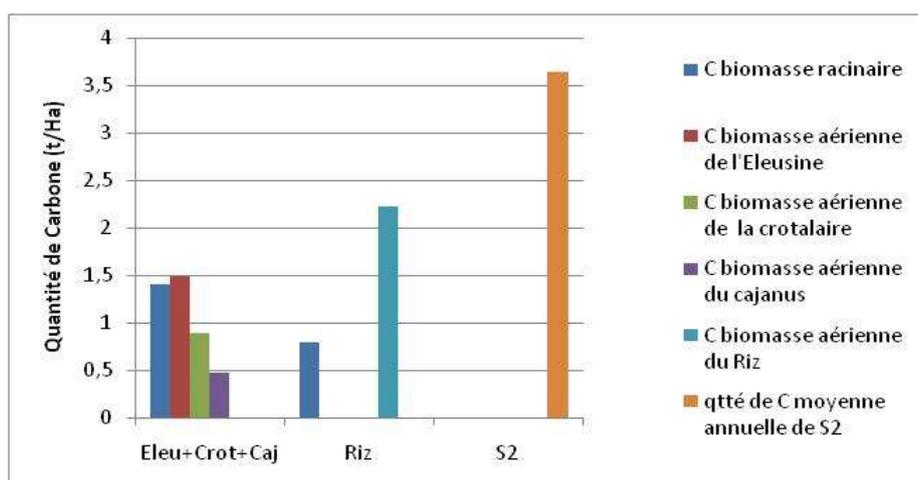
**Figure 19: apport de C au sol S1 (riz//maïs+crotalaire) en SCV avec la fertilisation Fu**

Le carbone apporté par la biomasse aérienne du riz (1,95 t de C.ha<sup>-1</sup>) est plus élevé que celui apporté par le maïs et la crotalaire avec respectivement 0,54 t de C.ha<sup>-1</sup> et 0,67 t de C.ha<sup>-1</sup>. Par contre, la quantité de carbone apportée par la biomasse racinaire est plus élevée pour l'association (1,03 t de C.ha<sup>-1</sup>) que pour le riz (0,62 t de C.ha<sup>-1</sup>).

En moyenne, les biomasses aérienne et racinaire du système S1 : riz//maïs+crotalaire avec Fu apportent 2,41 t de C.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>.

#### IV.2.2 Apport au sol par le système S2 : Riz//Eleusine+Crotalaire+Cajanus

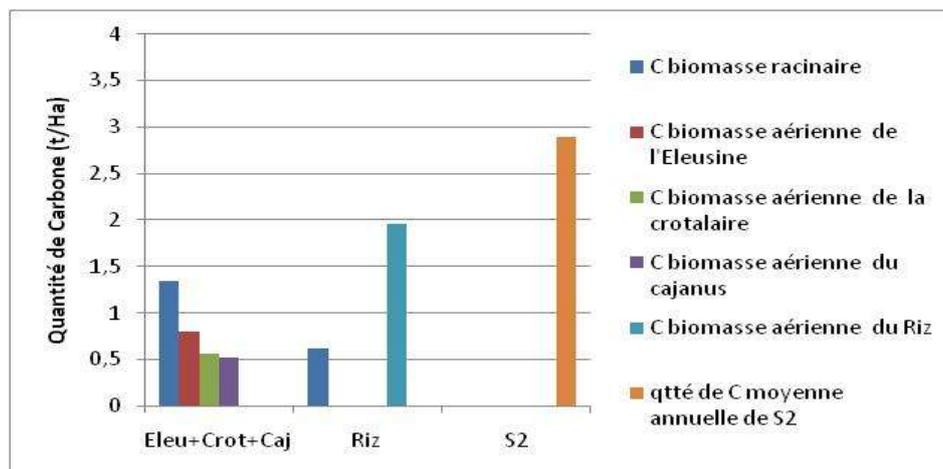
Les quantités de carbone contenues dans les biomasses (aérienne et racinaire) de la rotation biennale S2 sont représentées dans les figures 20 et 21.



**Figure 20: apport de C au sol par S2 : Riz//Eleusine+Crotalaire+Cajanus en SCV avec la fertilisation FM**

La quantité de carbone apportée par la biomasse racinaire de l'association éléusine-crotalaire-cajanus (1,40 t de C.ha<sup>-1</sup>) est plus élevée que celle apportée par la biomasse racinaire du riz (0,79 t de C.ha<sup>-1</sup>) (**Fig.20**). Le carbone apporté par la biomasse aérienne est de 2,21 t de C.ha<sup>-1</sup> pour le riz. Pour l'association éléusine-crotalaire-cajanus, les quantités sont respectivement 1,48 ; 0,89 et 0,47 t de C.ha<sup>-1</sup>.

En moyenne, le système S2 : riz//éléusine-crotalaire-cajanus en SCV avec FM apporte 3,63 t de C.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> par la restitution de la biomasse racinaire et de la biomasse aérienne.



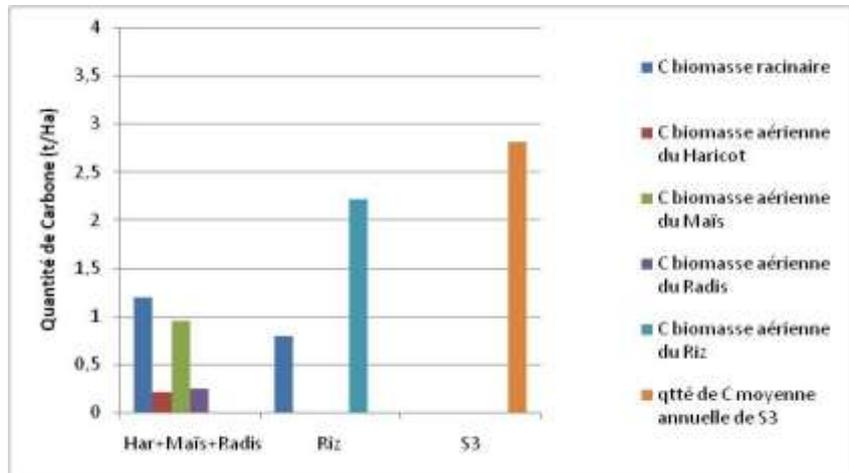
**Figure 21: apport de C au sol par S2 :Riz//Eleusine+Crotalaire+Cajanus en SCV avec la fertilisation Fu**

Le carbone apporté par la biomasse racinaire du riz (0,62 t de C.ha<sup>-1</sup>) est nettement inférieur par rapport à celui apporté par l'association éléusine-crotalaire-cajanus (1,34 t de C.ha<sup>-1</sup>). Par contre le carbone apporté par la biomasse aérienne du riz (1,95 t de C.ha<sup>-1</sup>) est plus élevé par rapport à celui apporté par l'association : 0,79 t de C.ha<sup>-1</sup> pour l'éléusine, 0,56 t de C.ha<sup>-1</sup> pour la crotalaire et 0,51 t de C.ha<sup>-1</sup> pour le cajanus.

Le système S2 : riz//éléusine-crotalaire-cajanus en SCV avec Fu apporte en moyenne 2,89 t de C.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> (biomasses aérienne et racinaire). On constate une différence entre la quantité moyenne annuelle de carbone apporté par le système S2 avec FM (**Fig.20**) et avec Fu.

### IV.2.3 Apport au sol par le système S3 : Riz//Maïs+Haricot+Radis fourrager

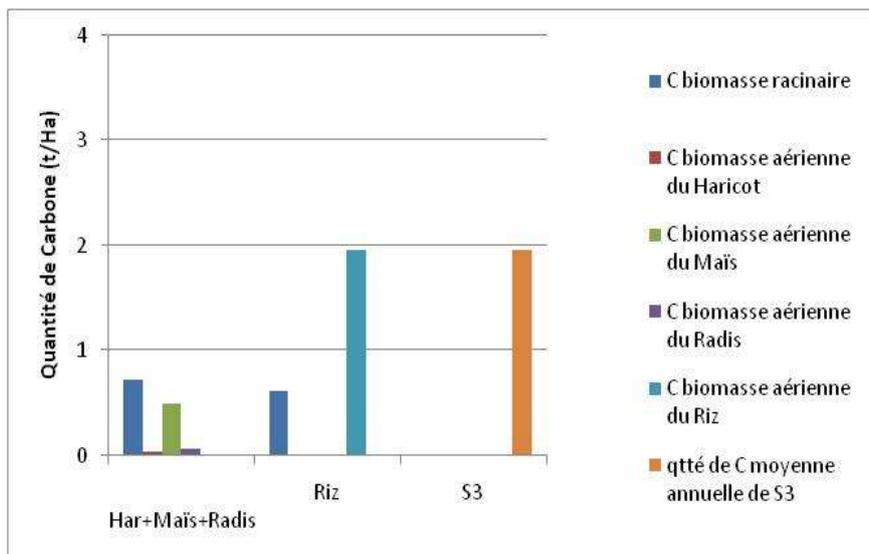
Les quantités de carbone contenues dans les biomasses (aérienne et racinaire) de la rotation biennale S3 sont représentées dans les figures 22 et 23.



**Figure 22: apport de C au sol par S3 : Riz//Haricot+Maïs+Radis en SCV avec la fertilisation FM**

L'apport en carbone par la biomasse racinaire est plus élevé pour l'association haricot-maïs-radis fourrager ( $1,19 \text{ t de C.ha}^{-1}$ ) que pour le riz ( $0,79 \text{ t de C.ha}^{-1}$ ). Par contre pour le carbone apporté par la biomasse aérienne, il est plus élevé pour le riz ( $2,21 \text{ t de C.ha}^{-1}$ ) par rapport aux apports des plantes en association.

En moyenne, le système S3 : riz//maïs-haricot-radis fourrager en SCV avec FM apporte  $2,81 \text{ t de C.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ .



**Figure 23: apport de C au sol par S3 : Riz//Haricot+Maïs+Radis en SCV avec la fertilisation Fu**

Une observation similaire est constatée au niveau du système S3 en SCV avec apport Fu (Fig.23). L'apport de carbone par la biomasse racinaire est de l'ordre de 0,6 t de C.ha<sup>-1</sup> pour le riz et 0,72 t de C.ha<sup>-1</sup> pour l'association haricot-maïs-radis. On note une quantité de C provenant de la biomasse aérienne plus élevée pour le riz (1,95 t de C.ha<sup>-1</sup>) par rapport à celle apportée par l'association (0,04 t de C.ha<sup>-1</sup> pour l'haricot ; 0,50 t de C.ha<sup>-1</sup> pour le maïs et 0,07 t de C.ha<sup>-1</sup> pour le radis). Le système S3 : riz//maïs-haricot-radis fourrager apporte en moyenne 1,95 t de C par les biomasses aérienne et racinaire.

#### IV.2.4 Apport au sol par le système S0 : Riz//Maïs+Haricot (témoin)

Le système S0 avec Riz//Maïs+Haricot, a été considéré comme témoin lors de la modélisation de l'impact des apports des systèmes de culture sur la teneur en C du sol. Ce système a été choisi comme témoin puisque c'est le système le plus couramment employé par les paysans du Vakinankaratra. Pour ce système, le sol est labouré sans restitution des résidus de culture. Le carbone du sol est exclusivement issu de la biomasse racinaire. Il faut aussi noter que seule fertilisation FM est gardée pour le système S0.

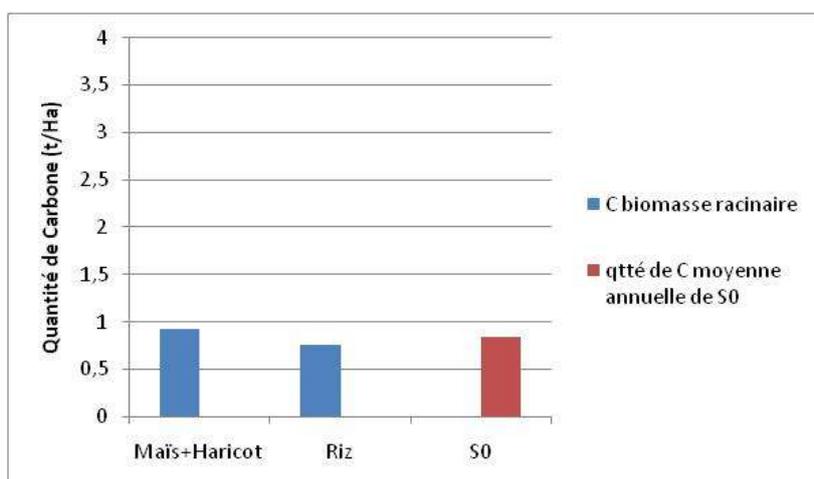


Figure 24: apport de C au sol par le témoin S0 : Riz// Maïs+Haricot

La figure 24 montre que l'apport de carbone ne varie pas trop que ce soit avec le riz ou avec l'association maïs-haricot. Les quantités obtenues sont donc de 0,92 t de C.ha<sup>-1</sup> pour l'association et de 0,76 t de C.ha<sup>-1</sup> pour le riz.

Le système S0 : riz//maïs-haricot apporte en moyenne 0,84 t de C.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>.

### **IV.3 Modélisation du stock de matière organique dans le sol sur 30ans** (Cf. Annexe 14)

Le modèle Hénin-Dupuis est utilisé dans cette étude pour la simulation des évolutions des stocks en matière organique du sol (MOS) ou carbone organique. Les systèmes de culture étudiés lors de cette simulation sont :

- **Des systèmes en SCV :**

**S1** : rotation riz//maïs+crotalaire avec deux fertilisations : FM et Fu

**S2** : rotation //éleusine+crotalaire+cajanus avec deux fertilisations FM et Fu

**S3** : rotation riz//haricot+maïs+radis fourrager avec deux fertilisation FM et Fu

- **Un système S0 en labour :** rotation riz//maïs+haricot avec apport FM, considéré comme témoin

L'évolution du stock de carbone (en  $t \cdot ha^{-1}$ ) dans le sol selon le modèle de Hénin Dupuis est représentée dans la figure 25 :

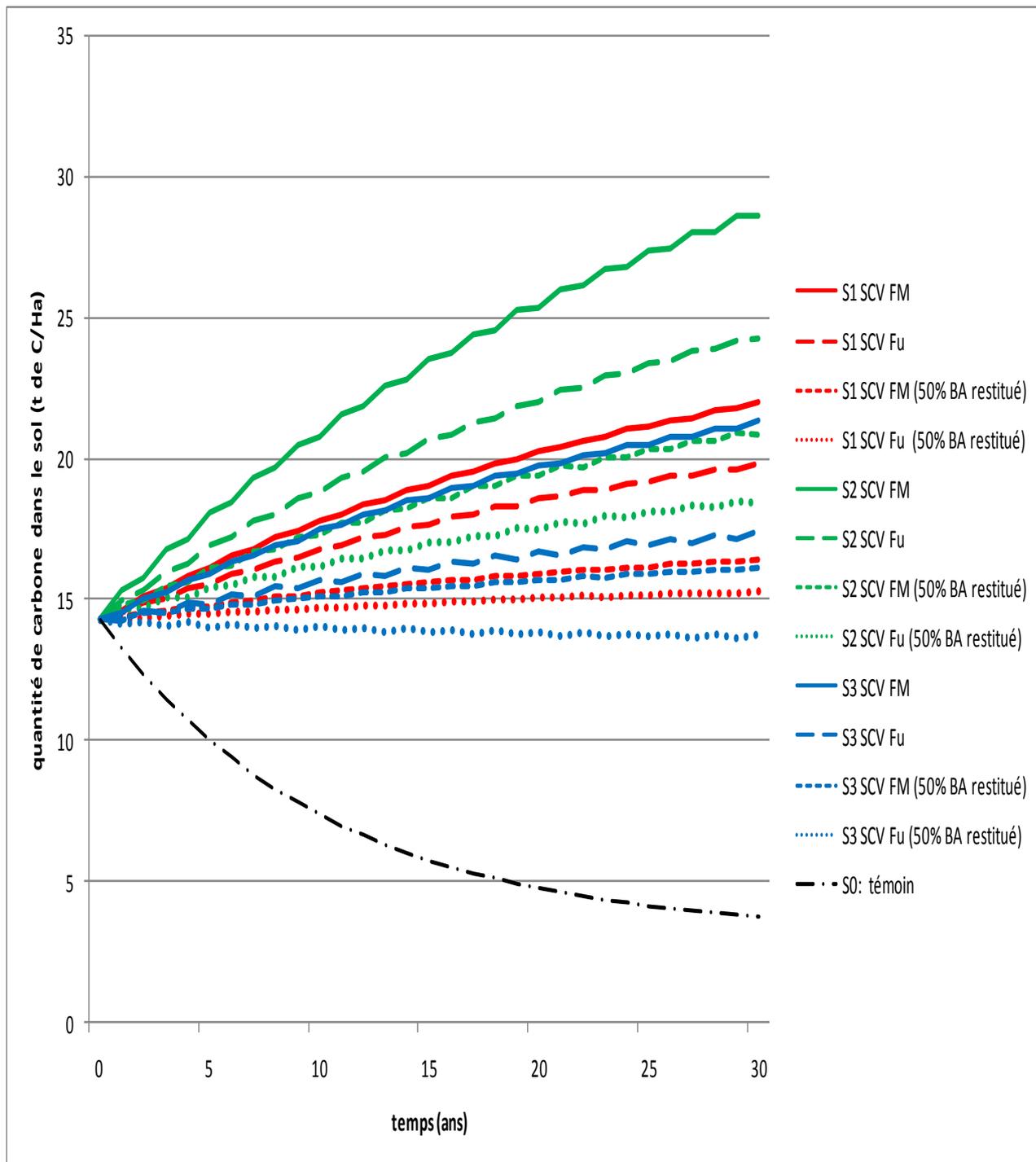


Figure 25: évolution du stock de carbone du sol selon différents gestions de sol

Le point de départ de la simulation est la teneur actuelle en carbone du sol (14,29 t de C.ha<sup>-1</sup>, Razafimbelo, 2005) (Cf. Annexe 15). La figure montre que le stockage du carbone est non linéaire. Il est plus ou moins rapide durant les 20 premières années, il ralentit ensuite. Cette figure met en évidence que le stock de carbone accumulé pendant de longues périodes (15 à 30 ans) en SCV est supérieur à celui des systèmes labourés.

Pour le système S0, le déstockage de carbone est rapide et important dès les 10 premières années de pratique. Par contre, pour les systèmes en SCV quelque soit la fertilisation apportée, on constate que le stockage de carbone tend à augmenter d'une année à une autre.

Pour le système S1 avec apport FM, on arrive à accumuler 20 t de C.ha<sup>-1</sup> en 20 ans et en 30ans pour le système S1 avec apport Fu. Pour le système S2, on peut accumuler plus de 20 t de C.ha<sup>-1</sup> en 10 ans avec apport FM et en 12ans avec apport Fu. En système S3 avec apport FM, l'accumulation de 20 t de C.ha<sup>-1</sup> s'obtient après 20 années de pratique avec apport FM par contre avec apport Fu, cette quantité s'obtiendra au-delà de 30 années de pratique.

Pour les systèmes en SCV, deux simulations ont été faites : une avec 100 % de restitution de la biomasse aérienne et l'autre avec seulement 50 %. L'accumulation en SCV avec 50% de restitution est inférieure à celle en SCV avec 100% de restitution.

L'accumulation de carbone en 30 ans est supérieure à 25 t de C.ha<sup>-1</sup> pour le système S2 en SCV quelque soit la fertilisation apportée. Elle ne dépasse pas cette valeur pour les autres systèmes en SCV.

## V DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

La partie discussion est réservée à la comparaison des résultats obtenus avec ceux des autres auteurs, l'explication de nos résultats, et la vérification des hypothèses de départ.

### V.1 Effet du mode de gestion sur la production de biomasses (aérienne et racinaires)

#### V.1.1 Biomasse aérienne

La biomasse aérienne obtenue pour le riz est de 3,8 t de MS.ha<sup>-1</sup>(en SCV Fu) ; 4,93 t de MS.ha<sup>-1</sup> (en SCV FM) ; 6,05 t de MS.ha<sup>-1</sup>(en labour Fu) et 6,81 t de MS.ha<sup>-1</sup>(en labour FM). Par rapport aux valeurs rapportées par Rakotoarisoa en 2006 à Andranomanelatra avec une quantité variant de 1,05 à 3,15 t.ha<sup>-1</sup>en labour et de 1,86 à 1,99 t.ha<sup>-1</sup>en SCV, nos résultats sont relativement élevés. Par contre nos résultats rejoignent ceux obtenus par Dusserre et al en 2009 avec une production en biomasse aérienne du riz (sans grains) variant de 2,9 à 6 t.ha<sup>-1</sup>.

En S1, la production en biomasse aérienne pour la crotalaire varie de 1,2 à 2 t de MS.ha<sup>-1</sup>. Celle du maïs varie de 1,6 à 3,8 t de MS.ha<sup>-1</sup>. Ces résultats permettent de dire que la crotalaire produit environ autant que le maïs. Cette hypothèse est vérifiée par une étude au Nord de Cameroun(Naudin, Balarabe, & Aboubakary, 2004). Même si la variété utilisée au Cameroun (*Crotalaire retusa*) et celle utilisée dans cette étude (*Crotalaire grahamiana*) sont différentes, ces résultats peuvent s'expliquer par la mise en place de la crotalaire et du maïs. Dans notre, la crotalaire est semée en double ligne et le maïs en une seule ligne.

La biomasse aérienne fournie par l'association maïs-crotalaire est estimée à 5,5 t de en labour avec FM ; 3,5 t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec Fu, 5 t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec FM et 3,6 t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec Fu. Nos valeurs sont similaires à celles trouvées au Nord de Cameroun avec une production de 4,9 t de MS.ha<sup>-1</sup> pour l'association en SCV (Naudin, 2012). Par contre, on constate une valeur plus élevée en labour FM par rapport à celle en SCV avec FM. Cette variation est confirmée par Naudin et al. en 2004 qui disent que la biomasse aérienne du maïs en SCV quand il est associé à la crotalaire est inférieure à celle obtenue en labour. Cela pourrait s'expliquer par une concurrence entre les plantes.

En S2, la quantité de biomasse aérienne obtenue par l'éléusine est de 4,3 t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec FM ; 1,9 t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec Fu ; 4,2 t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec FM et 2,28 t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec Fu. Par contre, des études menées à Madagascar présentent une production jusqu'à 8 t de MS.ha<sup>-1</sup> (Husson et al., 2012). Nos résultats sont largement inférieurs à cette valeur. Cette différence pourrait s'expliquer par l'association de l'éléusine avec d'autres plantes (crotalaire et cajanus) qui se traduit par une diminution du nombre de pieds d'éléusine et la possibilité de concurrence avec ces plantes.

Pour la crotalaire, la quantité de biomasse aérienne obtenue est de 3 t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec FM ; 1,6 t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec Fu ; 2,5 t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec FM et 1,6 t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec Fu. Une étude menée en Indonésie présente une production de l'ordre de 9 t de MS.ha<sup>-1</sup> (H & Noordwijk, n.d.) ce qui est largement supérieure à nos résultats. Par contre, en Inde la production moyenne en biomasse aérienne est de 600kg de (Chaudhury, Singh, & Hazra, n.d.). Les valeurs obtenues au cours de cette étude se situent alors dans la fourchette des valeurs susmentionnées mais s'approchent de celle trouvée en Inde. Cela traduit alors une faible production en biomasse aérienne de la crotalaire et pourrait s'expliquer par son association avec d'autres plantes (éleusine, cajanus). Cette hypothèse est vérifiée par Naudin et al en 2004 lors d'une étude sur le site expérimental de Zouana qui présente une production assez faible de la crotalaire surtout si elle est semée en une seule ligne. Cette variation pourrait aussi s'expliquer par la différence entre les variétés utilisées (*Crotalaria juncea* en Indonésie et en Inde et *Crotalaire grahamiana* pour notre étude).

L'association de ces trois plantes donne alors une production de 8,9 t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec FM ; 4,7 t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec Fu ; 8,1 t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec FM et 5,3 t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec Fu. Ces valeurs permettent de dire que la production ne varie pas selon le mode de gestion du sol ni selon la fertilisation apportée.

En système S3, nos résultats présentent une production en biomasse aérienne de maïs de 1,6 t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec FM ; 1,2 t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec Fu ; 2,9 t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec FM et 1,5 t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec Fu. On constate que ces valeurs varient en fonction du mode de gestion du sol. Mais la fertilisation a aussi un effet significatif sur ces valeurs. Ce qui fait dire que l'ajout d'un engrais minéral en fertilisation FM a été bénéfique pour le maïs. Comparées à la valeur dans la littérature qui présente une production jusqu'à 8,7 t de MS.ha<sup>-1</sup> (Bray, 1963), nos valeurs sont nettement faibles. Cela pourrait s'expliquer par son association avec d'autres plantes (haricot, radis fourrager).

La production en biomasse aérienne de l'association maïs-haricot-radis fourrager est de 2,2 t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec FM ; 2 t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec Fu ; 4,3 t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec FM et 1,8 t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec Fu. Ces résultats varient en fonction du mode de gestion du sol mais également en fonction de la fertilisation apportée. La production en biomasse aérienne est élevée en SCV mais seulement si on apporte la fertilisation FM (4,3 t de MS.ha<sup>-1</sup>). La production de cette association (1,8 à 4,3 t de MS.ha<sup>-1</sup>) est similaire à celle du maïs associé avec la crotalaire que nous avons également étudiée en haut (3,5 à 5,5 t de MS.ha<sup>-1</sup>). Cela pourrait s'expliquer par l'association du maïs avec des légumineuses (crotalaire, haricot) par l'existence de concurrence entre la culture principale et les plantes de couverture.

En ce qui concerne l'avoine, notre étude s'est centrée sur un essai en SCV seulement mais en tenant compte de deux fertilisations (FM et Fu). La production en biomasse aérienne est de l'ordre de 4 t de MS.ha<sup>-1</sup> avec apport FM et de l'ordre de 2 t de MS.ha<sup>-1</sup> avec Fu. Une étude menée par Bolinder et al en 1997 sur le site d'Ottawa présente une production moyenne de 5 t de MS.ha<sup>-1</sup> valeur à laquelle concorde celle trouvée dans cette étude avec apport FM.

Même avec des méthodes de prélèvement de la biomasse aérienne similaires, une différence se présente entre nos résultats et ceux des autres auteurs. Cette différence devrait être due aux conditions environnementales distinctes dans lesquelles nos essais respectifs ont été réalisés, les années, les périodes et zones de réalisation qui sont aussi différentes.

### **V.1.2 Distribution des racines dans le profil**

Pour tous les traitements étudiés, les racines sont abondantes dans l'horizon de surface (0-40cm) qu'en profondeur. La profondeur d'enracinement est de 80 à 100cm pour la crotalaire, 60cm pour le maïs, 50cm pour l'éleusine et 70cm pour le riz. La distribution générale des racines dans le profil cultural observée lors de notre étude est conforme à d'autres études sur le système racinaire (Rakotoarisoa, 2011 ; Scopel et al., 2001 ; Dusserre et al., 2009). La connaissance de la distribution des racines dans le profil cultural est nécessaire pour estimer la quantité de racines de chaque plante.

### **V.1.3 Biomasse racinaire**

Toutefois l'interprétation des ces résultats demeure délicate car tout d'abord les valeurs obtenues lors de cette étude sont plus ou moins sous évaluées parce qu'on n'a pas pris en compte la présence dans le sol de racines anciennes et de l'exsudat racinaire.

Approximativement, 10 à 40% du carbone incorporé au sol proviennent de l'exsudat racinaire (Silva, Resck, Corazza, & Vivaldi, 2004). Ensuite, la perte en racines pendant le traitement de séparation sol-racines par utilisation de tamis et par le lavage pourrait contribuer à une estimation inexacte de la biomasse racinaire produite par une telle plante. Cette perte est estimée de 20 à 40% selon Van Noordwijk et Floris en 1979 (Anderson, 1988). Suite à la délicatesse des méthodes de prélèvement de la biomasse racinaire, les données y sont aussi rares (F.Colin, F.Danjon, & L.Wehrle, 1995).

Pour les associations de culture, lors de la séparation du bloc sol-racines durant cette étude, il était difficile de distinguer les racines d'une telle plante des autres. Donc il a fallu estimer la quantité totale de racines de toutes les plantes entrant en association sur chaque parcelle étudiée. Dans cette discussion, la comparaison de la quantité de biomasse racinaire d'une telle plante étudiée avec celle dans la littérature semble difficile sauf pour les plantes cultivées en pur dont le riz et l'avoine. Donc il a fallu comparer la production d'une association étudiée avec la production d'une plante dans la littérature en supposant que la majeure partie de racines fournie par l'association proviennent de cette plante. Pour l'association maïs-

crotalaire, on considère que le maïs fournit plus en termes de racines que la crotalaire, pour l'association éleusine-crotalaire-cajanus c'est l'éleusine et pour l'association maïs-haricot-radis fourrager c'est le maïs.

La production en biomasse racinaire par l'association maïs-crotalaire est environ 2,7 t de MS.ha<sup>-1</sup> puisque le mode de gestion et la fertilisation n'affecte pas la production. Cette valeur, comparée à la biomasse racinaire du maïs dans la littérature de 4,5 t de MS.ha<sup>-1</sup> (Bray, 1963) est faible.

L'association éleusine-crotalaire-cajanus fournit 6,47 t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec apport FM et environ 3 t de MS.ha<sup>-1</sup> pour les autres cas. Cette différence pourrait s'expliquer par l'utilisation du Root/Shoot ratio lors du calcul de la quantité de racines fournie par le cajanus. Si on se réfère à la valeur dans la littérature, la production en biomasse racinaire de l'éleusine peut dépasser 5 t de MS.ha<sup>-1</sup> (Husson et al., 2012) avec laquelle concorde la notre en labour avec apport FM. Celle obtenue avec les autres cas est largement inférieure. L'association en labour produit autant qu'en SCV mais elle produit plus en labour si on apporte un engrais minéral par la fertilisation FM.

En SCV avec apport FM, l'association maïs-haricot-radis fournit 2,5 t de MS.ha<sup>-1</sup> ; environ 2 t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour quelque soit la fertilisation apportée et 1,5 t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec apport Fu. La variation de la production entre traitement SCV pourrait s'expliquer par l'apport d'engrais minéral à la fertilisation FM qui est bénéfique pour l'association. Ces résultats mènent à dire que la production de biomasse racinaire pour cette association est meilleure avec apport FM qu'avec Fu.

Le riz produit environ 1,5 t de MS.ha<sup>-1</sup> de biomasse racinaire quelque soit le mode de gestion du sol et la fertilisation apportée. Notre résultat est similaire à celui trouvé par T.Jaffré et al en 1983 avec une production de l'ordre de 1,25 t de MS.ha<sup>-1</sup>. Les résultats trouvés par d'autres auteurs le confirment aussi avec 0,5 à 1,1 t de MS.ha<sup>-1</sup> (Kondo et al., 2003).

La production en biomasse racinaire de l'avoine est environ 1 t de MS.ha<sup>-1</sup> quelque soit la fertilisation apportée. L'ajout d'un engrais minéral par la fertilisation FM n'augmente pas significativement la quantité de racines produite. La production moyenne en racines trouvée sur le site d'Ottawa en 1997 est de 3,3 t de MS.ha<sup>-1</sup> (Bolinder, Angers, & Dubuc, 1997). La production estimée lors de notre étude ne renferme même pas la moitié de celle présentée dans la littérature. Cette différence pourrait s'expliquer par les conditions de culture, la fertilisation, les variétés qui sont différentes.

***L'hypothèse 1 selon laquelle « Les pratiques SCV permettent une production en biomasse plus élevée par rapport aux pratiques conventionnelles » est partiellement vérifiée.***

#### V.1.4 Root/Shoot ratios

De nombreuses études ont été faites sur le Root/Shoot ratios mais la plupart d'entre elles s'est focalisée sur les prairies naturelles. Différentes valeurs de ratios sont proposées par plusieurs auteurs suivant le type de végétation et la biomasse aérienne (IPCC, 1996; Mokany *et al.*, 2006). La discussion sur le Root/Shoot ratio sera faite de la même manière que celle sur la biomasse racinaire en prenant toujours comme référence la plante qui fournit la majorité des racines pour une association étudiée. Les valeurs du Root/Shoot ratios du maïs trouvées par quelques auteurs sont regroupées dans le tableau 8:

**Tableau 8: Root/shoot ratios du maïs dans la littérature**

| Root/Shoot ratios | Auteurs                     |
|-------------------|-----------------------------|
| 0,07              | Ovington et al., 1963       |
| 0,09              | Foth, 1962                  |
| 0,14              | Santos et al., 2010         |
| 0,15              | Eghball et Maranville, 1993 |
| 0,18              | Bolinder et al., 1999       |
| 0,3               | Long, 1959                  |
| 0,3               | Anderson, 1988              |
| 0,51              | Bray et al., 1959           |
| 0,52              | Thorne et Pterson 1954      |
| 0,52              | Bray 1997                   |
| 0,54 à 0,85       | Zhu et Lynch, 2004          |
| 1,03              | Buyanovsky et Wagner, 1986  |

Pour l'association maïs-crotalaire, le Root/shoot ratio varie de 0,51 à 0,78. Notre évaluation sur ce rapport est généralement dans la gamme de valeur rapportée par Zhu et Lynch en 2004. Pour l'association maïs-haricot-radis fourrager, le ratio varie de 0,59 à 1. Ces valeurs sont similaires à celles rapportées par Zhu et Lynch en 2004 et par Buyanovsky et Wagner en 1986.

Pour le riz, les Root/Shoot ratios trouvés par quelques auteurs sont regroupés dans le tableau 9:

**Tableau 9:Root/Shoot ratios du riz**

| Root/Shoot ratios | Auteurs                   |
|-------------------|---------------------------|
| 0,2               | Matsuo & Mochizuki (2009) |
| 0,2               | Woo et al. (2007)         |
| 0,18 à 0,23       | Kondo et al.,2003         |
| 0,5               | Kerdchoechuen (2005)      |

Notre étude présente un Root/Shoot ratio variant de 0,28 à 0,36 pour le riz. Nos valeurs s'accordent avec celles rapportées par Kondo et al. en 2003 et Kerdchoechuen en 2005.

Pour l'avoine, les valeurs du Root/Shoot ratios de 0,29 et 0,35 rejoignent celles rapportées par Bolinder et al. en 1997 avec un rapport variant de 0,32 à 0,43.

Les comparaisons effectuées sur les Root/Shoot ratios de notre étude et ceux de la littérature nous permettent de dire que nos valeurs sont en général élevées, c'est-à-dire : une plus forte proportion des parties racinaires par rapport aux parties aériennes. La différence importante observée entre nos valeurs et celles de certains auteurs peut s'expliquer en partie par des différences au niveau des méthodes utilisées lors des prélèvements de racines et ses traitements, les positions et la profondeur des prélèvements et les pertes en biomasse racinaire pendant les traitements. Cependant, d'autres caractéristiques spécifiques au site d'étude (régimes d'humidité du sol, température, disponibilité de l'azote, texture) et la physiologie de la plante peuvent être encore plus importants.

## **V.2 Effet du mode de gestion du sol sur l'apport en carbone**

Dans cette partie, nous ne visons pas à une interprétation détaillée de toutes les simulations avec les différents systèmes mais nous chercherons à raisonner le choix d'un ou plusieurs systèmes de culture qui permettront d'accumuler le plus de carbone à long terme.

Pour l'association en S1 (maïs-crotalaire) avec apport FM, la biomasse racinaire apporte 0,87 t de C.ha<sup>-1</sup> tandis que la biomasse aérienne apporte 1,67 t de C.ha<sup>-1</sup>. Avec apport Fu, ces valeurs sont respectivement 1,03 t de C.ha<sup>-1</sup> et 1,21 t de C.ha<sup>-1</sup>. Pour l'association en S2 (éleusine-crotalaire-cajanus) avec apport FM, la part de la biomasse racinaire en carbone est de l'ordre de 1,40 t de C.ha<sup>-1</sup> et celle de la biomasse aérienne est de l'ordre de 2,84 t de C.ha<sup>-1</sup>. Avec apport Fu, ces apports sont respectivement 1,40 t de C.ha<sup>-1</sup> et 1,86 t de C.ha<sup>-1</sup>. Et pour l'association en S3 (éleusine-crotalaire-cajanus) avec apport FM, l'apport en carbone par la biomasse racinaire est de 1,19 t de C.ha<sup>-1</sup> et celui de la biomasse aérienne est de 1,20 t

de  $C \cdot ha^{-1}$ . Avec apport Fu, ces apports sont respectivement 0,72 t de  $C \cdot ha^{-1}$  et 0,61 t de  $C \cdot ha^{-1}$ . Ainsi, pour l'association en S1 avec apport FM, la part de la biomasse racinaire dans l'apport en carbone du sol est environ 35% et 45% avec apport Fu. Pour l'association en S2, sa part est de 30% et 40% respectivement avec apport FM et Fu. Et pour l'association en S3, avec FM sa part est de 49% et avec Fu, elle dépasse 50%. Ces proportions permettent d'en déduire que la biomasse racinaire constitue un apport supplémentaire de C stocké dans le sol, ce qui répond à notre questionnement du départ : « *Quelle est la part de la contribution des parties souterraines dans l'apport en carbone des cultures et plantes de couverture dans le sol ?* » Entre autre, il est reconnu que ces matières organiques temporaires issues des racines jouent un rôle dans la stabilisation des macro-agrégats supérieurs à  $250 \mu m$  (Annabi, 2005), par voie de conséquence elle participe à la stabilisation du stock de C dans le sol via protection de C dans le sol.

En ce qui concerne l'accroissement moyen annuel des stocks de carbone sous SCV, il est de l'ordre de 0,10 à 0,47 t  $C \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ . Ce stockage est inférieur aux valeurs publiées par Razafimbelo en 2005 avec des accroissements de l'ordre de 0,69 et 1,01 t  $C \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$  sur des parcelles voisines également en SCV. D'autres études menées dans la région Sud du Brésil en 2000, en conditions subtropicales ont conduit à 1,6 t  $C \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$  selon Amado T.J. et al., 0,71 t  $C \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$  selon Bayer et al et 0,99 t  $C \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$  selon Sá J.C.M. et al. Ces valeurs sont plus élevées par rapport à celles que nous avons obtenues dans notre étude.

Nous avons également réalisé des simulations où on ne restitue que la moitié de la biomasse aérienne des systèmes SCV (S1, S2 et S3), avec les deux fertilisations (FM et Fu). Les résultats montrent un stockage annuel de carbone bien sûr inférieur à celui des systèmes SCV avec 100% de restitution. L'accroissement est de l'ordre de 0,03 à 0,21 t  $C \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ . Mais un décroissement de l'ordre de 0,17 t  $C \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$  est constaté en S3 avec apport Fu.

Durant l'expérimentation, les restitutions de carbone ont été estimées à 0,84 t  $C \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$  pour S0 (restitutions racinaires uniquement) et à respectivement 2,79 ; 2,41 ; 3,63 ; 2,89 ; 2,81 et 1,95 t  $C \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$  pour S1 SCV FM, S1 SCV Fu, S2 SCV FM, S2 SCV Fu, S3 SCV FM et S3 SCV Fu (restitutions aérienne et racinaire). Ces valeurs permettent de dire que la biomasse restituée par les systèmes SCV est plus importante par rapport à celle restituée en systèmes labourés. Théoriquement, 15% du carbone restitué est stocké dans le sol selon Rasmussen et Collins en 1991. On obtiendrait un stockage théorique de 0,42 ; 0,36 ; 0,54 ; 0,43 ; 0,42 et 0,29 t  $C \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$  respectivement pour S1 SCV FM, S1 SCV Fu, S2 SCV FM, S2 SCV Fu, S3 SCV FM et S3 SCV Fu. Ces valeurs sont supérieures à celles estimées dans notre étude avec respectivement 0,25 ; 0,18 ; 0,47 ; 0,33 ; 0,23 et 0,10 t  $C \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$  pour S1 SCV FM, S1 SCV Fu, S2 SCV FM, S2 SCV Fu, S3 SCV FM et S3 SCV Fu.

Les différences entre les stocks de carbone pourraient donc s'expliquer d'une part par ce niveau de restitution. Et d'autre part par d'autres facteurs comme la qualité de restitution (le choix des plantes de couverture est de ce fait déterminant), les caractéristiques du sol (teneur en matière organique initiale, teneurs en argile et en calcaire), son activité biologique, la protection physique du carbone dans le sol et enfin et surtout du mode de gestion du sol (labour, SCV).

Nos résultats soutiennent l'hypothèse que la perte de carbone organique ou matière organique du sol (MOS) varie selon le mode de gestion du sol. Notre étude permet de dire que le labour traduit un déclin rapide de la matière organique du sol (Post & Kwon, 2000). Par contre en SCV, sa reconstitution est plus ou moins rapide.

Les stocks importants observés en SCV s'expliquent par un flux de carbone entrant plus important (restitutions aérienne et racinaire) grâce aux plantes de couverture, une plus grande entrée en carbone par la biomasse restituée, une décomposition plus lente de la matière organique du sol en l'absence de labour et d'aération du sol. Dans notre étude, l'apport de fertilisation organique (fumier) contribue également à l'accroissement des stocks de matières organiques. Ces restitutions s'ajoutent aux apports de carbone par les résidus de culture et les racines. L'évolution du stock de carbone du sol selon différents gestions de sol montre que lorsqu'on apporte de l'engrais minéral par la fertilisation FM, le stock de carbone est plus élevé et la perte annuelle de carbone est plus faible.

Comme cité en haut, la nature du couvert végétal pourrait aussi influencer la capacité d'un système à stocker du carbone. Pour notre étude, c'est le système SCV S2 :riz//éleusine-crotalaire-cajanus qui accumule le plus de carbone jusqu'à 30ans avec un stock annuel de l'ordre de  $0,47 \text{ t C.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$  avec apport FM et de  $0,33 \text{ t C.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$  avec apport Fu. Le choix d'une légumineuse comme plante de couverture permet une amélioration des propriétés physico-chimiques et des stocks organiques du sol par une autorégulation en azote (Lesaint, 1998).

***L'hypothèse 2 selon laquelle : « Les systèmes SCV permettent une amélioration du statut organique des sols contrairement au labour » est vérifiée.***

### **V.3 Apport et intérêts de l'étude**

L'estimation et la mesure de la biomasse racinaire sont difficiles et laborieuses. Les mesures de pool de carbone ont souvent été négligées en comparaison avec celle du pool de la partie aérienne, et ceci se reflète dans la rareté des données disponibles à ce sujet. Ainsi, notre étude a réservé une grande partie à l'estimation du stock de ce pool mais également les effets du mode de gestion du sol sur ce stock.

Au vu de la grande variabilité des données, quelques recommandations méthodologiques peuvent être proposées :

- L'utilisation de modèles plus mécanistes de prévision d'évolution de la matière organique du sol tels que les modèles bi-compartmentaux ou le modèle MORGANE,
- L'utilisation d'une foreuse à moteur pour prélever des carottes de terre afin de minimiser le travail et de pouvoir prélever plusieurs échantillons.
- La prise en compte du carbone extra-racinaire.

## VI CONCLUSION ET PERSPECTIVES D'AVENIR

Les effets du changement climatique ont conduit à la recherche de solutions et de mesures. La pratique des SCV fait partie de ces solutions grâce à un stockage de carbone plus élevé par rapport aux systèmes labourés. En effet le carbone peut être stocké, par rétention sous forme organique, ou déstocké sous forme de CO<sub>2</sub>, par libération dans l'atmosphère de carbone minéral. Le sol est donc tout à la fois un puits ou une source de carbone (Kyoto, 2009). Il est alors important d'estimer au préalable, la quantité de carbone que les cultures principales et plantes de couvertures renferment aussi bien dans leur biomasse (aérienne et racinaire), que dans le sol. Mais il importe également d'estimer les stocks de C selon le mode de gestion du sol. Il ressort de cette étude que pour la production en biomasse aérienne, l'effet du mode de gestion ne présente pas de différence significative sauf pour le système S3 avec une production de 4,3 t de MS.ha<sup>-1</sup> en SCV avec apport FM contre 2,2 t de MS.ha<sup>-1</sup> en labour avec apport FM. Une observation similaire est constatée pour la quantité de biomasse racinaire. La variation de nos valeurs avec celles des autres auteurs peut s'expliquer par des conditions environnementales distinctes dans lesquelles nos essais respectifs ont été réalisés, les années, les périodes et zones de réalisation qui sont aussi différentes. Les Root/Shoot ratios observés dans cette étude sont plus élevés par rapport à ceux rapportés dans la littérature. Un Root/Shoot ratio élevé se traduit par une forte production en biomasse racinaire et la variation des rapports s'explique par les mêmes facteurs avec lesquels varient la biomasse aérienne et la biomasse racinaire. La première hypothèse émise pour ce qui est de la supériorité de la production en biomasses des pratiques SCV est partiellement vérifiée.

Les biomasses aérienne et racinaire restituées sous SCV constituent un apport de C supplémentaire alimentant le pool de C stocké dans le sol en comparaison avec le système labouré. L'accroissement annuel en carbone pour les systèmes étudiés est de l'ordre de 0,10 à 0,47 t C.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. En système labouré, le décroissement annuel en carbone est de l'ordre de 0,35 t C.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. Les différences entre les stocks de carbone s'expliquent par le niveau de restitution, par d'autres facteurs (la qualité de restitution, les caractéristiques du sol, son activité biologique, la protection physique du carbone dans le sol) et enfin et surtout du mode de gestion du sol (labour, SCV). La deuxième hypothèse émise pour ce qui est de l'amélioration du statut organique des sols sous systèmes SCV contrairement au système labouré est vérifiée. L'intérêt de cette étude réside surtout dans sa considération de la biomasse racinaire par sa part de contribution dans l'apport en carbone du sol. La rareté de données sur ce stock de carbone qui s'est fait sentir tout au long des études bibliographiques devrait encourager à la publication des résultats de ce genre d'étude. Tout cela afin de contribuer à la constitution de bases de données qui vont servir de références et d'indications dans les études ultérieures parmi lesquelles l'étude de la variation de ces stocks dans le temps et dans l'espace, une recherche qui mérite encore d'être entreprise.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- Ancelin, O., Duranel, J., Duparque, A., Fleutry, L., & Dersigny, C. (2007). Sols et matières organiques.
- Anderson. (1988). Tillage and N fertilization effects on maize root growth and root: shoot ratio. *Shoot*, 251, 245–251.
- Andriamaniraka, H. et al. (2010). Influence de différents systèmes de culture sur la productivité de sols cultivés des Hautes Terres de Madagascar et conséquences pour le bilan de phosphore, 17, étude et Gestion des Sols, Volume 17, 2, 201, pages 119 à 130
- Andriamihaja, M. (2011). Evaluation des stocks de carbone de la litière, de la biomasse hypogée et du sol suivant les modes d'utilisation des terres et la position topographique dans la région d'Ambohitantely., mémoire de fin d'études, ESSA, 70p
- Autfray, P., Guillaume, P., Forest, F., Chabanne, A., Husson, O., Unité, C., & Scv, D. R. (2006). Indicateurs de séquestration du Carbone à l'échelle de l'exploitation agricole Adaptation du modèle Hénin-Dupuis à l'Agriculture de Conservation en Tunisie, 2006.
- Bayer C., Mielniczuk J., Amado T. J. C., Martin-Neto L. et Fernandes S. V., 2000 - Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 54, 101-109.
- Blanchart E., Albrecht A., Brown G., Decaens T., Duboisset A., Lavelle P., Mariani L. et Roose E., 2004 - Effects of tropical endogeic earthworms on soil erosion. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104, 303-315.
- Bohm. (1979). *Methods of studying root systems* (Vol. 33). Berlin: Ecological studies 33- Springer-Verlag.
- Bolinder, M. A., Angers, D. A., & Dubuc, J. P. (1997). Estimating shoot to root ratios and annual carbon inputs in soils for cereal crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 63, May 1997, Pages 61–66
- Bolinder, M.A. (2003). Contribution aux connaissances de la dynamique du C dans les systèmes Sol-Plante de l'Est du Canada. Thèse de doctorat. Université Laval.
- Chevallier T., Blanchart E., Albrecht A. et Feller C., (2004) - The physical protection of soil organic carbon in aggregates: a mechanism of carbon storage in a Vertisol under pasture and market gardening (Martinique, West Indies). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 103, 375-387.
- Dusserre, J., Ramahandry, F., Sester, M., Muller, B., & Rakotoarisoa, J. (2010). Identification of the main constraints for upland rice crop in direct-seeding mulch-based cropping systems under the high altitude conditions of the Madagascar highlands, *Innovation and Partnerships to Realize Africa's Rice Potential*, (March), 22–26.
- Feller C., Fritsch E., Poss R. et Valentin C., (1991c) - Effets de la texture sur le stockage et la dynamique des matières organiques dans quelques sols ferrugineux et ferrallitiques (Afrique de l'Ouest, en particulier). *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, 26, 25-36.

- F. Colin, F. Danjon, & L. Wehrle. (1995). Etudes racinaires au sein du programme "croissance de l'INRA ( *Quercus petraea* et *Pinus pinaster* ), 165–172. *Revue canadienne de recherche forestière*, 1999, 29(5): 600-608 FAO. (2001). Variabilité et changements climatiques: un défi pour la production agricole durable, 26–30.
- Groot, J. J. R., Traoré, M., & Koné, D. (1998). Description du système racinaire de trois espèces fourragères en zone soudano-sahélienne: *Andropogon gayanus*, *Vigna unguiculata* et *Stylosanthes hamata*, 2(2), *BASE - Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* (1998) 106–119.
- GSDM, CIRAD, MAEP, & BRL. (n.d.). Le semis direct sous couverture végétale permanente à Madagascar, 1–8.
- H, K., & Noordwijk, M. (n.d.). Root distribution of leguminous cover in the humid tropics and effects on a subsequent maize crop. *Australian Journal of Soil Research* 33(2) 221 - 239, 1995
- Husson, O., Charpentier, H., Michellon, R., Razafintsalama, H., Moussa, N., Enjalric, F., Naudin, K., et al. (2012). *Eleusine coracana*, III, Manuel pratique du semis direct à Madagascar. Volume III. Chapitre 3. § 2.2.
- IPCC. (1996). Land-Use Change and Forestry. Revised 1996 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas inventories: Reference manual- IPCC Switzerland, 1-5.
- IPCC, 2001 - Climate Change (2001): The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J. T., Ding V., Griggs D. J., Noguer M., van der Linden P., X. D. et Maskell K. (Eds). Cambridge University Press, Cambridge.
- Kondo, M., Pablico, P. P., Aragonés, D. V., Agbisit, R., Abe, J., Morita, S., & Courtois, B. (2003). Genotypic and environmental variations in root morphology in rice genotypes under upland field conditions. *Plant and Soil*, 189–200.
- Kummerow, J. (1982). The Relation Between Root and Shoot Systems in Chaparral Shrubs 1, 142–147. *Oecologia* November 1996, Volume 108, Issue 3, pp 389-411
- Kyoto, D. (2009). Le stockage de carbone par les prairies Agriculture et changement climatique: la prise en compte du stockage de carbone se généralise, 1–12.
- Lal, R. (2005). Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220, 242-258.
- Laudelout, H. (1945). Bilan de la matière organique du sol, 117–123. *Advances in Environmental Research*, Volume 7, Issue 4, June 2003, Pages 803–823
- Lesaint, S. (1998). Effet d'une légumineuse de couverture (*Mucuna pruriens* var. utilis) sur le stock organique d'un sol ferrallitique (Bénin) cultivé en maïs. Mém. DEA Sci. du Sol, Université de Nancy 1 Montpellier : ORSTOM, 1998, 27 p. multigr
- Mohamed Annabi (2005). Stabilisation de la structure d'un sol limoneux par des apports de composts d'origine urbaine: relation avec les caractéristiques de leur matière organique. Thèse en vue d'obtention du grade de Docteur de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon. 270p

- Naudin, K. (2012). *Cropping system design and trade-offs around biomass use for Conservation Agriculture in Cameroon and Madagascar*. Thèse de doctorat, 220 p
- Naudin, K., Balarabe, O., & Aboubakary. (2004). Systèmes de culture sur couverture végétale: Résultats campagne 2004.
- Penot, É., Rakotofiringa, A., & Tokarski, Y. (2007). Le riz pluvial: quelle opportunité pour les paysans d'une zone péri-urbaine des hauts plateaux de Madagascar, HAL : cirad-00772966, version 1
- Post, W. M., & Kwon, K. C. (2000). Soil Carbon Sequestration and Land-Use Change: Processes and Potential. *Global Change Biology*, Volume 6, Issue 3, pages 317–327, March 2000
- Rabeharisoa, L. (2004). Gestion de la fertilité et de la fertilisation phosphatée des sols ferrallitiques des Hautes Terre de Madagascar. *Cahiers Agricultures*. Volume 20, Numéro 4, 280-93, Juillet-Août 2011, Étude originale
- Raherinindrainy, E. (2007). Système de culture sous couverture végétale permanente: Profil racinaire des plantes de couverture et suivi de la dégradation des résidus des différents systèmes de culture sous couverture végétale selon le mode de gestion du sol, mémoire de fin d'études, ASJA, 98p
- Rasmussen P. E. et Collins H. P., 1991 - Long-term impacts of tillage fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. *Advances in Agronomy*, 45, 93-134.
- Razafimbelo. (2005). Stockage et protection du carbone dans un sol ferrallitique sous systèmes en semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres Malgaches. Thèse de doctorat, 156p
- Razafindramanana. (2006). Afforestation et stockage de carbone en lisière Ouest du corridor forestier de Fianarantsoa (Madagascar).DEA, 112p
- Razafindramanana. (2011). Contrôle des pertes en terre, en carbone et en nutriments par érosion hydrique sous systèmes en semis direct sur couverture végétale permanente des Hautes Terres Malgaches., Thèse de doctorat, 161p
- Raunet M., Seguy L. et Fovets Rabots C., (1998) - Semis direct sur couverture végétale permanente du sol : de la technique au concept. In: *Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture*. Rasolo F. et Raunet M. (Eds). Antsirabe, Madagascar.
- Seguy, L., Husson, O., Charpentier, H., Bouzinac, S., Michellon, R., Chabanne, A., Boulakia, S., et al. (2009). La gestion des écosystèmes cultivés en semis direct sur couverture végétale permanente Volume I. Chapitre 2, I.
- Silva, J. E., Resck, D. V. S., Corazza, E. J., & Vivaldi, L. (2004). Carbon storage in clayey Oxisol cultivated pastures in the " Cerrado " region , Brazil. *Environment*, 103, 357–363. doi:10.1016/j.agee.2003.12.007

Six J., Feller C., Deneff K., Ogle S. M., Sà J. C. d. M. et Albrecht A., 2002b - Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22, 755-775.

Séguy, L., Bouzinac, S., & Maronezzi, A. C. (2001). Systèmes de culture et dynamique de la matière organique. 202p

T.Jaffré, Fritsch, E., & Namur, C. de. (1983). Etude de la biomasse végétale et du stock de carbone dans la végétation, la litière et le sol au cours de la succession secondaire dans le Sud-ouest de la Côte d'Ivoire, Adiopodoumé : ORSTOM, 1983, 15 p. multigr

Wylleman R., Mary B., Machet JM., Guerif J., Degrendel M., (2001). Evolution des stocks de matière organique dans les sols de grande culture : analyse et modélisation, *Perspectives Agricoles*, n°270, pp. 8

# ANNEXES

---

|  |        |
|--|--------|
| Annexe 1: généralités sur les systèmes racinaires de quelques plantes.....                   | i      |
| Annexe 2: Données climatiques brutes de la zone d'étude de 2002 à 2013.....                  | ii     |
| Annexe 3: Récapitulation des systèmes de cultures étudiés.....                               | iii    |
| Annexe 4: plan de prélèvements des racines.....  | iv     |
| Annexe 5: plan d'extrapolation des racines.....  | vii    |
| Annexe 6: schéma de prélèvement en fosse de la biomasse racinaire.....                       | vii    |
| Annexe 7: calcul pour avoir la matière sèche (MS).....                                       | viii   |
| Annexe 8: Extrapolation à l'hectare de la quantité des racines.....                          | ix     |
| Annexe 9: calcul de la densité des racines dans le profil cultural (carottage en fosse)..... | xviii  |
| Annexe 10: : carbone apporté par le fumier.....  | xxiii  |
| Annexe 11: ANOVA des biomasses aériennes.....  | xxiv   |
| Annexe 12: ANOVA des biomasses racinaires.....   | xxviii |
| Annexe 13: Biomasses aérienne et racinaire des plantes et systèmes étudiés.....              | xxxi   |
| Annexe 14: Récapitulation des apports en carbone des systèmes étudiés.....                   | xxxiii |
| Annexe 15: stock de carbone de départ (simulation).....                                      | xxxiv  |

### **Annexe 1: généralités sur les systèmes racinaires de quelques plantes**

- Riz : Le système racinaire du riz est fasciculé. En culture pluviale, il est moins ramifié, de plus grand diamètre et plus profond.
- Maïs : les racines sont de type fasciculé et sont superficielles, car elles ne dépassent pas 60cm de profondeur.
- Haricot : le système racinaire est pivotant et peut s'enfoncer jusqu'à plus 100cm de profondeur.
-

Annexe 2: Données climatiques brutes de la zone d'étude de 2002 à 2013.

|                                  |      | juil         | aout         | sept         | oct          | nov           | déc           | janv         | fév           | mars          | avril        | mai          | juin         |
|----------------------------------|------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| pluviométrie (mm)                | 2002 | -            | -            | -            | -            | 177           | 374,5         | -            | -             | -             | -            | -            | -            |
|                                  | 2003 | 4            | 7            | 14,5         | 66           | 154           | 382,5         | 660          | 87            | 258,5         | 80           | 25,5         | 9,5          |
|                                  | 2004 | 10           | 33           | 33,5         | 222,5        | 143,5         | 430           | 202          | 195,5         | 111,5         | 39           | 37,5         | 4            |
|                                  | 2005 | 13           | 1,5          | 4            | 53           | 108           | 462           | 219          | 287,5         | 202,5         | 50           | 56,5         | 5            |
|                                  | 2006 | 48           | 5            | 3            | 40           | 154,5         | 305,5         | 117,5        | 106,5         | 208,5         | 68           | 10           | 17           |
|                                  | 2007 | 5,5          | 1,5          | 1            | 92           | 189           | 277,5         | 699          | 205,5         | 83            | 52,5         | 33           | 4            |
|                                  | 2008 | 9,5          | 2,5          | 4,5          | 130,5        | 227,5         | 248           | 237,5        | 185           | 102,5         | 44           | 24           | 6,5          |
|                                  | 2009 | 50,5         | 67,5         | 5            | 87,5         | 64,8          | 162,3         | 336          | 226,5         | 224           | 116,5        | 6,5          | 19,5         |
|                                  | 2010 | 7            | 3            | 2            | 42           | 134,5         | 255,5         | 310          | 123           | 203,5         | 10           | 63,5         | 11,5         |
|                                  | 2011 | 4            | 8            | 12           | 113          | 106           | 148           | 227,5        | 229           | 208,5         | 114          | 41           | 7,5          |
| <b>moyenne pluviométrie (mm)</b> |      | <b>16,83</b> | <b>14,33</b> | <b>8,83</b>  | <b>94,05</b> | <b>145,88</b> | <b>304,58</b> | <b>315</b>   | <b>182,83</b> | <b>178,05</b> | <b>63,77</b> | <b>33,05</b> | <b>9,38</b>  |
| température (°C)                 |      | juil         | aout         | sept         | oct          | nov           | déc           | janv         | fév           | mars          | avril        | mai          | juin         |
|                                  | 2002 | 12,3         | 13,6         | -            | -            | 19,4          | 19,2          | 19,5         | 19,3          | 19,5          | 17,4         | 16,9         | 13,2         |
|                                  | 2003 | 13,3         | 14,5         | 15,2         | 18,2         | 18,8          | 19,6          | 20,0         | 19,1          | 18,8          | 17,4         | 14,6         | 12,7         |
|                                  | 2004 | 12,0         | 13,4         | 16,5         | 18,5         | 18,1          | 19,6          | 19,6         | 19,9          | 19,3          | 17,7         | 16,0         | 13,9         |
|                                  | 2005 | 13,4         | 13,7         | 15,1         | 17,3         | 18,5          | 19,8          | 19,5         | 19,6          | 19,7          | 18,2         | 15,9         | 14,5         |
|                                  | 2006 | 13,6         | 14           | 15,6         | 17,9         | 19,2          | 19,5          | 19,3         | 20            | 18,9          | 18,1         | 16,7         | 12,8         |
|                                  | 2007 | 12,5         | 14,2         | 16,4         | 17,8         | 19,2          | 19,5          | 19,4         | 18,9          | 18,5          | 17,5         | 14,7         | 12,8         |
|                                  | 2008 | 12,8         | 14,2         | 16,5         | 18,1         | 19,6          | 19,9          | 20,2         | 19,2          | 19,8          | 17,5         | 15,5         | 14           |
|                                  | 2009 | 12,6         | 13,9         | 16,4         | 18,2         | 18,9          | 19,7          | 19,9         | 19,8          | 20,1          | 18,8         | 17,1         | 14,5         |
|                                  | 2010 | 13,1         | 14,8         | 15,7         | 19,1         | 19,3          | 20,1          | 19,7         | 19,3          | 19,4          | 18,8         | 16,5         | 14,5         |
|                                  | 2011 | -            | -            | 15,9         | 18,4         | 19,7          | 19,5          | 18,8         | -             | -             | -            | -            | -            |
| <b>moyenne température (°C)</b>  |      | <b>12,84</b> | <b>14,03</b> | <b>15,92</b> | <b>18,16</b> | <b>19,06</b>  | <b>19,63</b>  | <b>19,59</b> | <b>19,45</b>  | <b>19,33</b>  | <b>17,92</b> | <b>15,98</b> | <b>13,64</b> |

### Annexe 3: Récapitulation des systèmes de cultures étudiés

| systemes       | plantes                             | gestion du sol | fertilisation | nb de carottage en surface | nb de carottage en fosse |
|----------------|-------------------------------------|----------------|---------------|----------------------------|--------------------------|
| association S1 | maïs,<br>crotalaire                 | LAB            | FM            | 48                         | 21                       |
|                |                                     | LAB            | Fu            |                            |                          |
|                |                                     | SCV            | FM            |                            |                          |
|                |                                     | SCV            | Fu            |                            |                          |
| association S2 | éleusine,<br>crotalaire,<br>cajanus | LAB            | FM            | 40                         | 24                       |
|                |                                     | LAB            | Fu            |                            |                          |
|                |                                     | SCV            | FM            |                            |                          |
|                |                                     | SCV            | Fu            |                            |                          |
| association S3 | maïs, haricot,<br>radis             | LAB            | FM            | 40                         | 21                       |
|                |                                     | LAB            | Fu            |                            |                          |
|                |                                     | SCV            | FM            |                            |                          |
|                |                                     | SCV            | Fu            |                            |                          |
| Riz en S3      | Riz                                 | LAB            | FM            | 24                         | 12                       |
|                |                                     | LAB            | Fu            |                            |                          |
|                |                                     | SCV            | FM            |                            |                          |
|                |                                     | SCV            | Fu            |                            |                          |
| test           | avoine                              | SCV            | FM            | 12                         | 12                       |
|                |                                     | SCV            | Fu            |                            |                          |
| <b>TOTAL</b>   |                                     |                |               | <b>164</b>                 | <b>90</b>                |

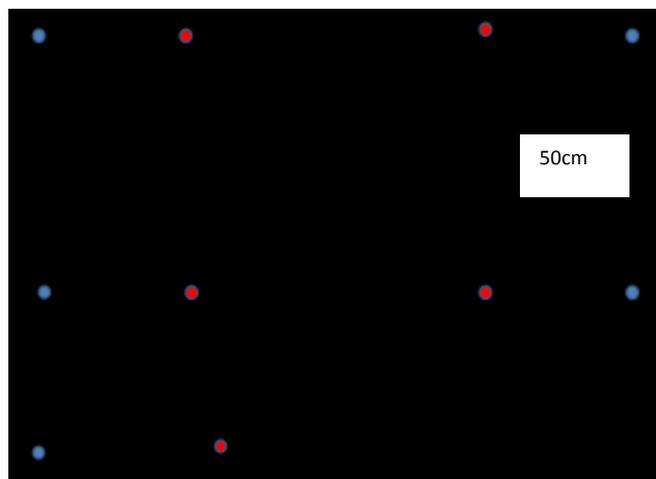
Fu: 5 t/ha de fumier de ferme

FM: 5 t/ha de fumier+150 kg de NPK+50 kg d'urée



#### Annexe 4: plan de prélèvements des racines

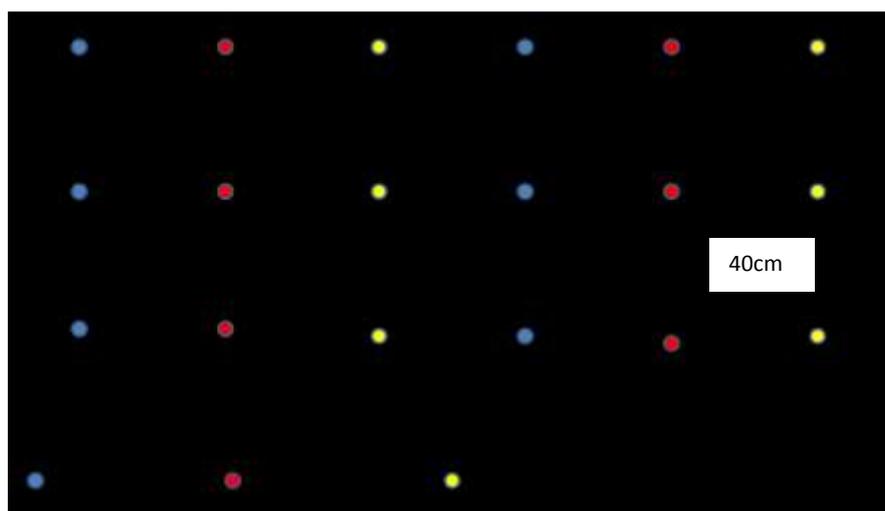
- **Pour l'association en S1 (maïs+crotalaire)** : sur chaque parcelle, six prélèvements ont été effectués. Au total, on a fait 48 prélèvements (6 prélèvements x 2 modes de gestions de sol x 4 répétitions).



#### Visualisation spatiale des points de prélèvements d'échantillons de biomasses racinaires sur les parcelles en S1

Les 6 positions sont marquées de lettres : a,b,c,d,e et f.

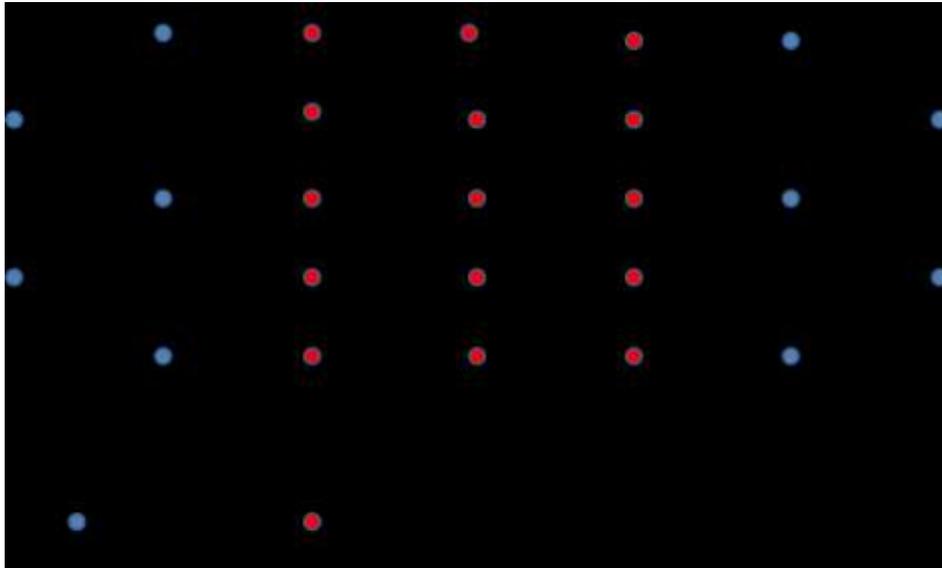
- **Pour l'association en S2 (éleusine+crotalaire+cajanus)** : sur chaque parcelle, 5prélèvements ont été effectués. Au total, on a fait 40 prélèvements (5 prélèvements x 2 modes de gestions de sol x 4 répétitions).



#### Visualisation spatiale des points de prélèvements d'échantillons de biomasses racinaires sur les parcelles en S2.

Les 5 positions sont marquées par les lettres **g,h,i, j et k.**

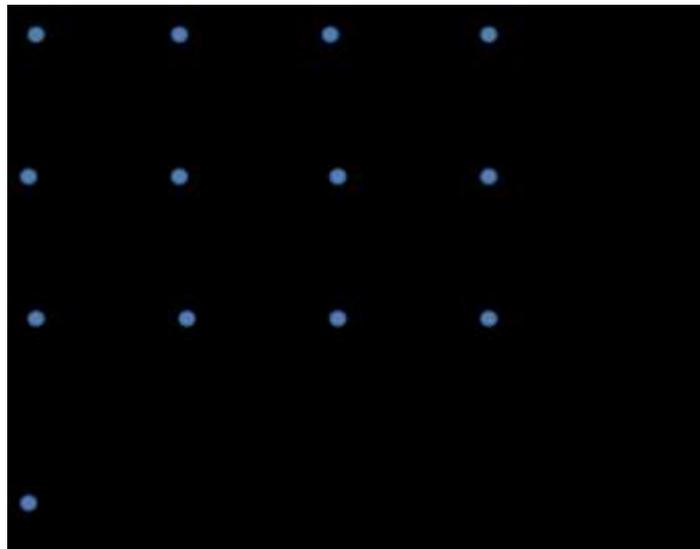
- **Pour l'association en S3** (maïs+haricot): 5 prélèvements ont été effectués sur chaque parcelle. Au total, on a fait 40 prélèvements (5 prélèvements x 2 modes de gestion de sol x 4 répétitions).



**Visualisation spatiale des points de prélèvements d'échantillons de biomasses racinaires sur les parcelles en S3.**

Les 5 positions sont marquées par les lettres **m,n,o,p et q**.

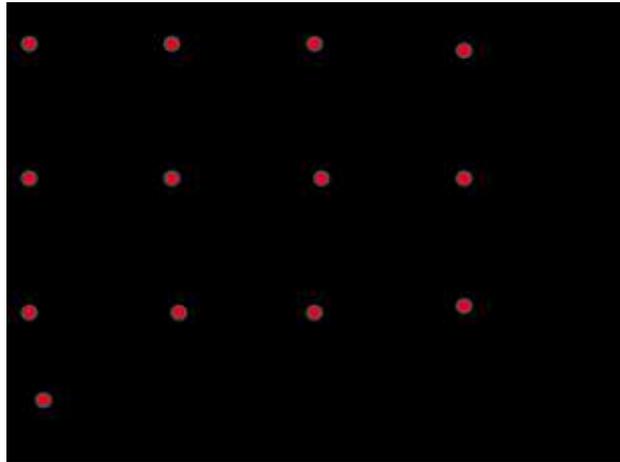
- **Pour le Riz (précédé de culture S3)**, sur chaque parcelle, 3 prélèvements ont été effectués, soit au total 24 prélèvements (3 prélèvements x 2 mode des gestions de sol x 4 répétitions).



**Visualisation spatiale des points de prélèvements d'échantillons de biomasses racinaires sur les parcelles de Riz.**

Les 3 positions sont marquées par les lettres **r,s et t**.

- **Pour l'Avoine** : sur chaque parcelle, 3 prélèvements ont été effectués soit au total 12 prélèvements (3prélèvements\*4répétitions).

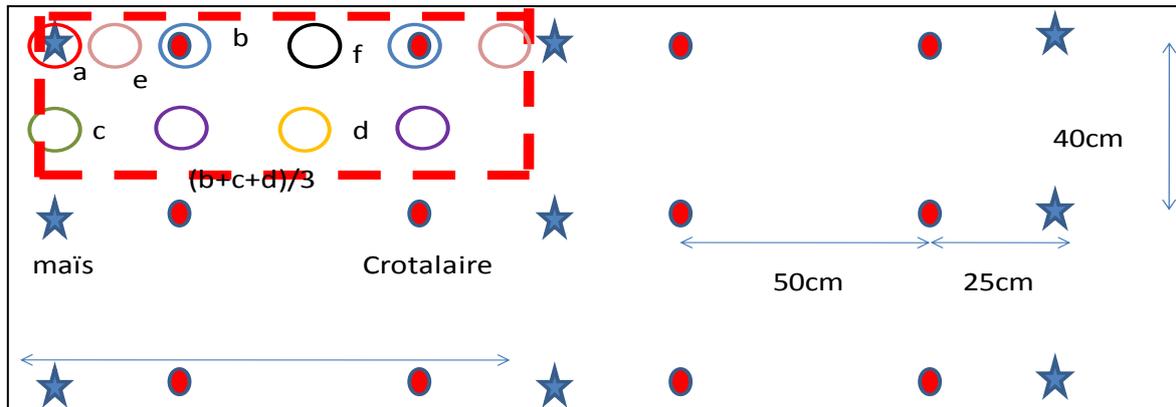


**Visualisation spatiale des points de prélèvements d'échantillons de biomasses racinaires sur les parcelles d'avoine.**

Les 3 positions sont marquées par les lettres u, v, w.

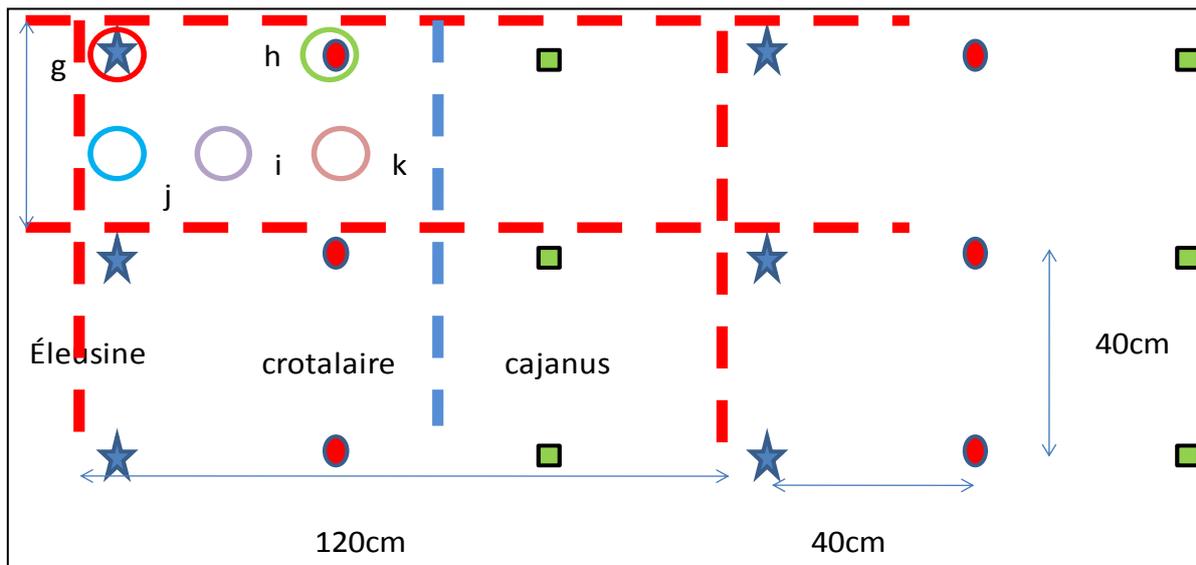
## Annexe 5: plan d'extrapolation des racines

- Association en S1 : maïs-crotalaire



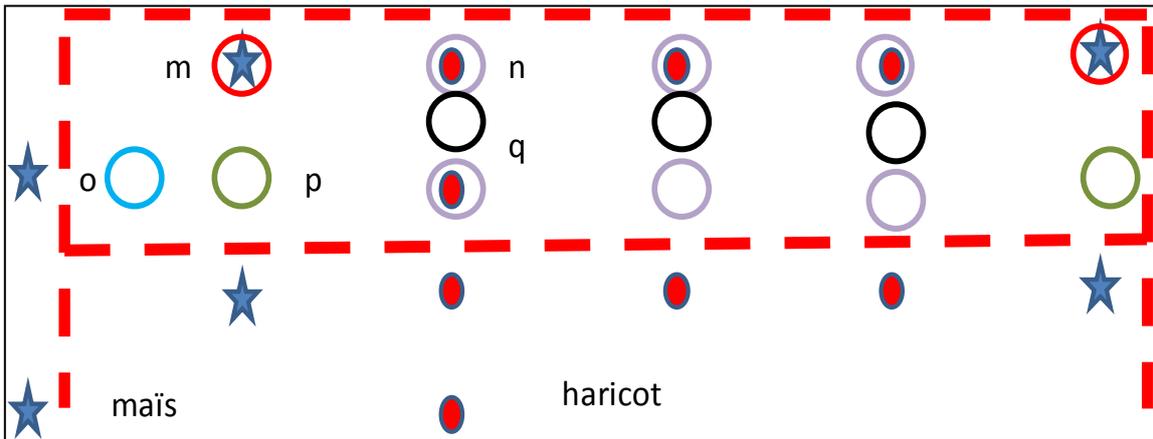
$$\text{Quantité de racine (kg)} = \frac{1a+2b+1c+1d+2e+1f+\left[\frac{2}{3}(b+c+d)\right]}{10} = \frac{3a+8b+5c+5d+6e+3f}{30}$$

- Association en S2 : éleusine-crotalaire-cajanus



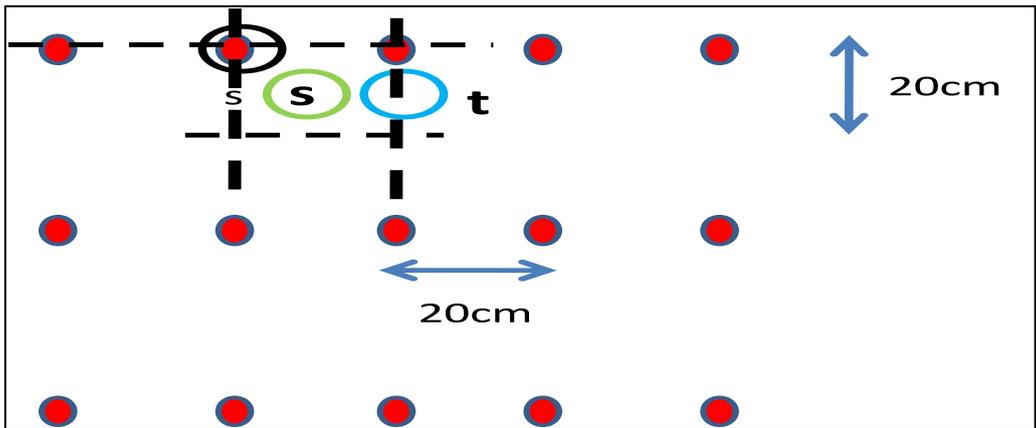
$$\text{Quantité de racine (kg)} = \frac{1g+1h+1i+1j+1k}{5}$$

- Association en S3 : maïs-haricot-radis fourrager



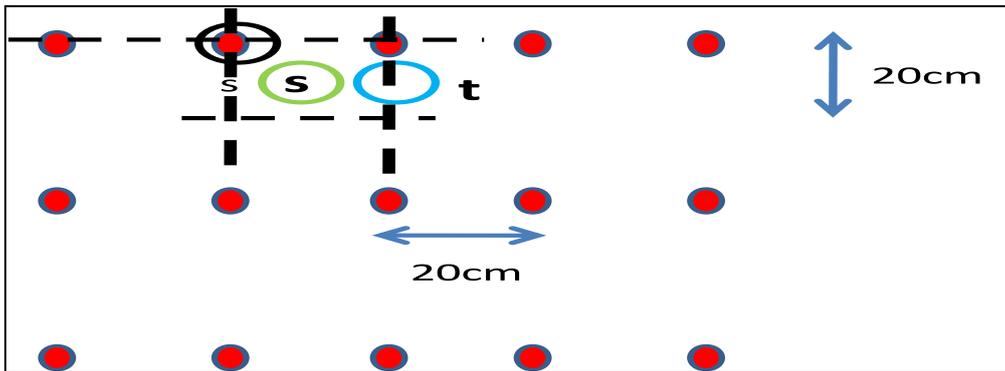
$$\text{Quantité de racine (kg)} = (2m+6n+1o+2p+3q)/14$$

- Riz



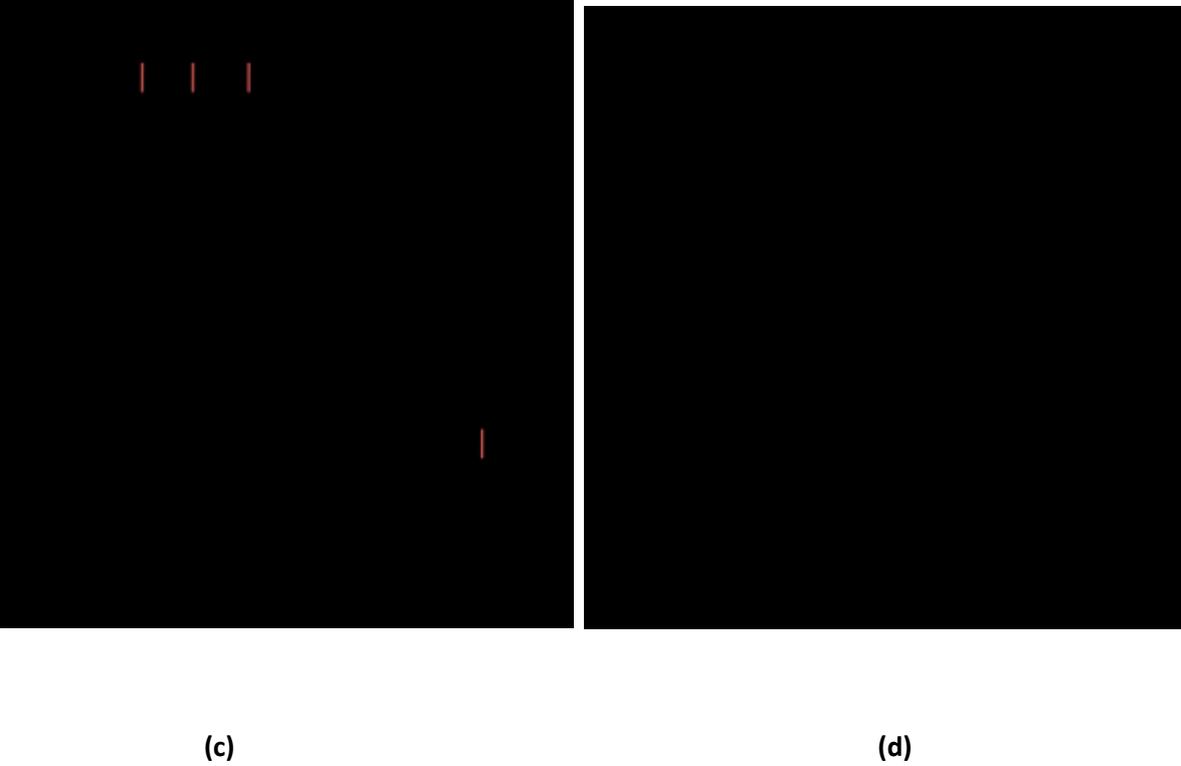
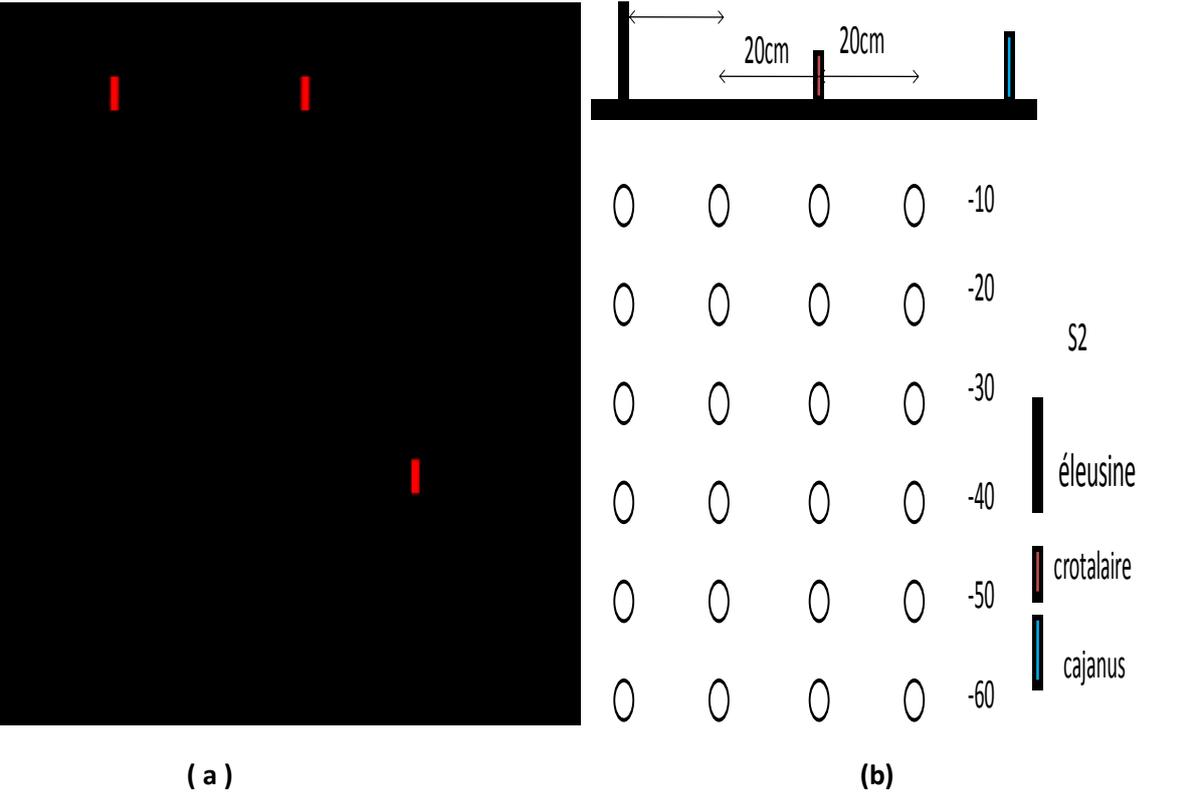
$$\text{Quantité de racine (kg)} = (1r+1s+2t)/4$$

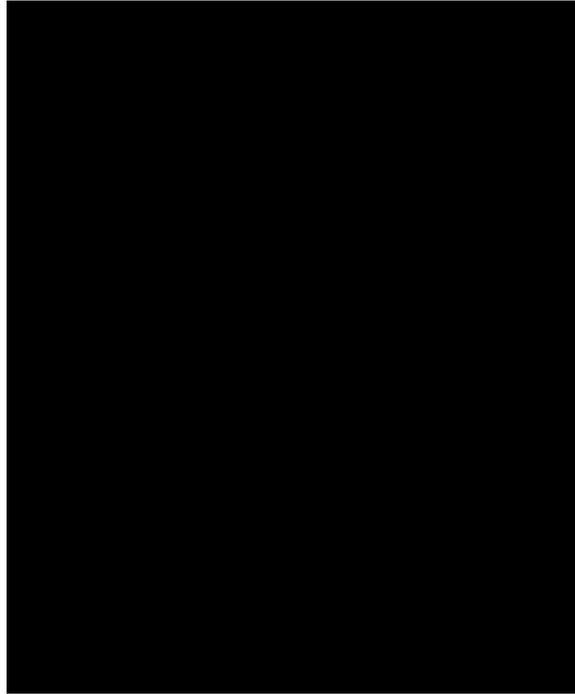
- Avoine cultivé en pur



$$\text{Quantité de racine (kg)} = (1u+1v+2w)/4$$

**Annexe 6: schéma de prélèvement en fosse de la biomasse racinaire**





(e)

**Annexe 7: calcul pour avoir la matière sèche (MS)**

---

Avec MS : matière sèche (g)

MF : matière fraîche (g)

## Annexe 8: Extrapolation à l'hectare de la quantité des racines

### - association en S1(maïs-crotalaire) en labour

| fertilisation | horizon | Étiquettes | Pond. | I     | II   | III  | IV   | Moyenne (g) | Racine après pond. |                                   |                |                 |
|---------------|---------|------------|-------|-------|------|------|------|-------------|--------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|
| FM            | 0-20    | a          | 3     | 7,54  | 5,75 | 5,64 | 5,91 | 6,21        | 18,64              |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | b          | 8     | 0,91  | 0,68 | 3,15 | 3,91 | 2,16        | 17,34              |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | c          | 5     | 0,35  | 0,25 | 0,26 | 0,34 | 0,3         | 1,52               |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | d          | 5     | 0,03  | 0,19 | 0,09 | 0,36 | 0,17        | 0,86               |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | e          | 6     | 0,14  | 0,35 | 0,08 | 0,11 | 0,17        | 1,04               |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | f          | 3     | 0,24  | 0,05 | 0,09 | 0,27 | 0,16        | 0,5                |                                   |                |                 |
| somme         |         |            | 30    |       |      |      |      |             | <b>39,92</b>       | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
|               |         |            |       |       |      |      |      |             |                    | 1,33                              | 166,12         | <b>1661,27</b>  |
| Fu            | 0-20    | a          | 3     | 3,53  | 3,22 | 6,85 | 7,27 | 5,21        | 15,65              |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | b          | 8     | 2,67  | 2,31 | 4    | 0,83 | 2,45        | 19,66              |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | c          | 5     | 0,24  | 0,17 | 0,32 | 0,13 | 0,21        | 1,08               |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | d          | 5     | 0,01  | 0,08 | 0,26 | 0,03 | 0,09        | 0,49               |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | e          | 6     | 0,04  | 0,05 | 0,12 | 0,16 | 0,09        | 0,58               |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | f          | 3     | 0,08  | 0,18 | 0,23 | 0,01 | 0,13        | 0,39               |                                   |                |                 |
| somme         |         |            | 30    |       |      |      |      |             | <b>37,87</b>       | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
|               |         |            |       |       |      |      |      |             |                    | 1,26                              | 157,57         | <b>1575,79</b>  |
| FM            | 20-40   | a          | 3     | 0,09  | 0,29 | 0,09 | 0,05 | 0,13        | 0,4                |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | b          | 8     | 0,04  | 0,07 | 0,07 | 0,1  | 0,07        | 0,61               |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | c          | 5     | 0,05  | 0,09 | 0,19 | 0,07 | 0,1         | 0,53               |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | d          | 5     | 0,03  | 0,04 | 0,06 | 0,05 | 0,05        | 0,26               |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | e          | 6     | 0,05  | 0,05 | 0,02 | 0,04 | 0,04        | 0,26               |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | f          | 3     | 0,08  | 0,03 | 0,09 | 0,02 | 0,06        | 0,18               |                                   |                |                 |
| somme         |         |            | 30    |       |      |      |      |             | <b>2,26</b>        | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
|               |         |            |       |       |      |      |      |             |                    | 0,07                              | 9,43           | <b>94,38</b>    |
| Fu            | 20-40   | a          | 3     | 0,008 | 0,07 | 0,1  | 0,03 | 0,05        | 0,16               |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | b          | 8     | 0,21  | 0,04 | 0,07 | 0,03 | 0,09        | 0,72               |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | c          | 5     | 0,06  | 0,07 | 0,1  | 0,01 | 0,06        | 0,33               |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | d          | 5     | 0,013 | 0,07 | 0,06 | 0,01 | 0,04        | 0,2                |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | e          | 6     | 0,02  | 0,21 | 0,03 | 0,05 | 0,08        | 0,49               |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | f          | 3     | 0,06  | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,04        | 0,12               |                                   |                |                 |
| somme         |         |            | 30    |       |      |      |      |             | <b>2,04</b>        | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
|               |         |            |       |       |      |      |      |             |                    | 0,06                              | 8,52           | <b>85,21</b>    |

- association en S1(maïs-crotalaire) en SCV

| fertilisation | horizon | Étiquettes | Pond. | I    | II   | III  | IV    | Moyenne (g) | Racine après pond. |             |             |                                   |                |                 |
|---------------|---------|------------|-------|------|------|------|-------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|
| FM            | 0-20    | a          | 3     | 4,78 | 6,65 | 6,9  | 3,99  | 5,6         | 16,81              |             |             |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | b          | 8     | 1,16 | 0,75 | 1,5  | 2,21  | 1,4         | 11,26              |             |             |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | c          | 5     | 0,32 | 0,3  | 0,26 | 0,16  | 0,26        | 1,32               |             |             |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | d          | 5     | 0,19 | 0,17 | 0,09 | 0,21  | 0,16        | 0,84               |             |             |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | e          | 6     | 0,05 | 0,03 | 0,05 | 0,94  | 0,27        | 1,62               |             |             |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | f          | 3     | 0,17 | 0,03 | 0,05 | 0,14  | 0,1         | 0,3                |             |             |                                   |                |                 |
| somme         |         |            | 30    |      |      |      |       |             |                    | 32,18       |             | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
|               |         |            |       |      |      |      |       |             |                    | 1,07        | 133,91      | <b>1339,16</b>                    |                |                 |
| Fu            | 0-20    | a          | 3     | 5,01 | 2,33 | 6,37 | 4,1   | 4,45        | 13,37              |             |             |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | b          | 8     | 2,31 | 5,16 | 1,9  | 2,55  | 2,98        | 23,86              |             |             |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | c          | 5     | 0,12 | 0,22 | 0,17 | 0,11  | 0,15        | 0,78               |             |             |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | d          | 5     | 0,01 | 0,05 | 0,06 | 0,09  | 0,05        | 0,28               |             |             |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | e          | 6     | 0,2  | 0,11 | 0,16 | 0,1   | 0,14        | 0,89               |             |             |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | f          | 3     | 0,04 | 0,11 | 0,16 | 0,01  | 0,08        | 0,25               |             |             |                                   |                |                 |
| somme         |         |            | 30    |      |      |      |       |             |                    | 39,45       |             | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
|               |         |            |       |      |      |      |       |             |                    | 1,31        | 164,14      | <b>1641,47</b>                    |                |                 |
| FM            | 20-40   | a          | 3     | 0,05 | 0,36 | 0,2  | 0,11  | 0,18        | 0,55               |             |             |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | b          | 8     | 0,04 | 0,03 | 0,09 | 0,018 | 0,04        | 0,39               |             |             |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | c          | 5     | 0,13 | 0,06 | 0,1  | 0,09  | 0,09        | 0,49               |             |             |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | d          | 5     | 0,06 | 0,07 | 0,03 | 0,17  | 0,08        | 0,43               |             |             |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | e          | 6     | 0,01 | 0,05 | 0,13 | 0,19  | 0,09        | 0,58               |             |             |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | f          | 3     | 0,06 | 0,02 | 0,01 | 0,02  | 0,03        | 0,09               |             |             |                                   |                |                 |
| somme         |         |            | 30    |      |      |      |       |             |                    | 2,56        |             | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
|               |         |            |       |      |      |      |       |             |                    | 0,08        | 10,66       | <b>106,62</b>                     |                |                 |
| Fu            | 20-40   | a          | 3     | 0,01 | 0,05 | 0,01 | 0,02  | 0,02        | 0,08               |             |             |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | b          | 8     | 0,03 | 0,13 | 0,06 | 0,01  | 0,06        | 0,5                |             |             |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | c          | 5     | 0,02 | 0,08 | 0,02 | 0,02  | 0,04        | 0,2                |             |             |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | d          | 5     | 0,01 | 0,02 | 0,06 | 0,03  | 0,03        | 0,17               |             |             |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | e          | 6     | 0,01 | 0,14 | 0,03 | 0,01  | 0,05        | 0,31               |             |             |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | f          | 3     | 0,01 | 0,02 | 0,06 | 0,03  | 0,03        | 0,1                |             |             |                                   |                |                 |
| somme         |         |            | 30    |      |      |      |       |             |                    | 1,38        |             | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
|               |         |            |       |      |      |      |       |             |                    | 0,046250885 | 5,772812074 | <b>57,72812074</b>                |                |                 |

- association S2(éleusine-crotalaire-cajanus) en labour

| fertilisation | horizon | Étiquettes | Pond. | I     | II    | III   | IV    | Moyenne (g) | Racine après pond. |  |                                   |                |                 |
|---------------|---------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|--------------------|--|-----------------------------------|----------------|-----------------|
| FM            | 0-20    | g          | 1     | 2,65  | 7,26  | 2,82  | 3,39  | 4,03        | 4,03               |  |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | h          | 1     | 18,39 | 12,88 | 10,41 | 12,77 | 13,61       | 13,61              |  |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | i          | 1     | 0,098 | 0,02  | 0,034 | 0,14  | 0,07        | 0,07               |  |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | j          | 1     | 0,18  | 0,51  | 0,1   | 0,34  | 0,28        | 0,28               |  |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | k          | 1     | 0,02  | 0,32  | 1,23  | 0,13  | 0,43        | 0,43               |  |                                   |                |                 |
| somme         |         |            | 5     |       |       |       |       |             | 18,45              |  | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
|               |         |            |       |       |       |       |       |             | 3,69               |  |                                   | 460,6          | <b>4606,08</b>  |
| Fu            | 0-20    | g          | 1     | 2,16  | 2,72  | 2,06  | 2,79  | 2,43        | 2,43               |  |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | h          | 1     | 2,74  | 1,6   | 2,79  | 2,15  | 2,32        | 2,32               |  |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | i          | 1     | 0,02  | 0,15  | 0,09  | 0,04  | 0,07        | 0,078              |  |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | j          | 1     | 0,11  | 0,2   | 0,7   | 0,11  | 0,28        | 0,28               |  |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | k          | 1     | 0,02  | 0,1   | 0,045 | 0,016 | 0,04        | 0,04               |  |                                   |                |                 |
| somme         |         |            | 5     |       |       |       |       |             | 5,17               |  | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
|               |         |            |       |       |       |       |       |             | 1,03               |  |                                   | 129,14         | <b>1291,4</b>   |
| FM            | 20-40   | g          | 1     | 0,03  | 0,02  | 1,13  | 0,034 | 0,3         | 0,3                |  |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | h          | 1     | 0,01  | 0,02  | 1,13  | 0,07  | 0,31        | 0,31               |  |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | i          | 1     | 0,03  | 0,03  | 0,05  | 0,06  | 0,04        | 0,04               |  |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | j          | 1     | 0,03  | 0,009 | 0,03  | 0,04  | 0,029       | 0,029              |  |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | k          | 1     | 0,007 | 0,01  | 0,41  | 0,03  | 0,11        | 0,11               |  |                                   |                |                 |
| somme         |         |            | 5     |       |       |       |       |             | 0,81               |  | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
|               |         |            |       |       |       |       |       |             | 0,16               |  |                                   | 20,32          | <b>203,22</b>   |
| Fu            | 20-40   | g          | 1     | 0,02  | 0,1   | 0,04  | 0,05  | 0,05        | 0,05               |  |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | h          | 1     | 0,024 | 0,008 | 0,03  | 0,03  | 0,02        | 0,02               |  |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | i          | 1     | 0,011 | 0,047 | 0,03  | 0,02  | 0,02        | 0,02               |  |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | j          | 1     | 0,053 | 0,07  | 0,04  | 0,03  | 0,05        | 0,05               |  |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | k          | 1     | 0,009 | 0,012 | 0,02  | 0,12  | 0,04        | 0,04               |  |                                   |                |                 |
| somme         |         |            | 5     |       |       |       |       |             | 0,2                |  | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
|               |         |            |       |       |       |       |       |             | 0,04               |  |                                   | 5,1            | <b>51,06</b>    |

- association S2(éleusine-crotalaire-cajanus) en SCV

| fertilisation | horizon | Étiquettes | Pond. | I    | II   | III   | IV   | Moyenne (g) | Racine après pond. |       |                                   |                |                 |
|---------------|---------|------------|-------|------|------|-------|------|-------------|--------------------|-------|-----------------------------------|----------------|-----------------|
| FM            | 0-20    | g          | 1     | 1,83 | 0,54 | 6,5   | 8,62 | 4,37        | 4,37               |       |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | h          | 1     | 7,56 | 0,6  | 4,78  | 2,65 | 3,9         | 3,9                |       |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | i          | 1     | 0,33 | 0,07 | 0,21  | 0,09 | 0,17        | 0,17               |       |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | j          | 1     | 0,48 | 0,28 | 0,54  | 0,03 | 0,33        | 0,33               |       |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | k          | 1     | 0,3  | 0,21 | 0,07  | 0,06 | 0,16        | 0,16               |       |                                   |                |                 |
| somme         |         |            | 5     |      |      |       |      |             | 8,95               |       | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
|               |         |            |       |      |      |       |      |             |                    | 1,79  | 223,57                            | <b>2235,79</b> |                 |
| Fu            | 0-20    | g          | 1     | 4,2  | 1,34 | 6,53  | 4,02 | 4,02        | 4,02               |       |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | h          | 1     | 3,09 | 0,96 | 3,58  | 5,71 | 3,34        | 3,34               |       |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | i          | 1     | 0,2  | 0,18 | 0,16  | 0,07 | 0,16        | 0,16               |       |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | j          | 1     | 0,55 | 0,14 | 0,52  | 0,28 | 0,37        | 0,37               |       |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | k          | 1     | 0,01 | 0,04 | 0,17  | 0,03 | 0,06        | 0,06               |       |                                   |                |                 |
| somme         |         |            | 5     |      |      |       |      |             | 7,97               |       | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
|               |         |            |       |      |      |       |      |             |                    | 1,59  | 198,98                            | <b>1989,81</b> |                 |
| FM            | 20-40   | g          | 1     | 0,05 | 0,02 | 0,05  | 0,06 | 0,05        | 0,05               |       |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | h          | 1     | 0,04 | 0,05 | 0,084 | 0,02 | 0,05        | 0,05               |       |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | i          | 1     | 0,08 | 0,03 | 0,04  | 0,07 | 0,05        | 0,05               |       |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | j          | 1     | 0,06 | 0,06 | 0,06  | 0,06 | 0,069       | 0,06               |       |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | k          | 1     | 0,08 | 0,01 | 0,06  | 0,04 | 0,05        | 0,05               |       |                                   |                |                 |
| somme         |         |            | 5     |      |      |       |      |             | 0,28               |       | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
|               |         |            |       |      |      |       |      |             |                    | 0,05  | 7,06                              | <b>70,69</b>   |                 |
| Fu            | 20-40   | g          | 1     | 0,2  | 0,09 | 0,21  | 0,11 | 0,15        | 0,15               |       |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | h          | 1     | 0,03 | 0,05 | 0,07  | 0,05 | 0,05        | 0,05               |       |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | i          | 1     | 0,06 | 0,04 | 0,05  | 0,05 | 0,05        | 0,05               |       |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | j          | 1     | 0,07 | 0,02 | 0,12  | 0,09 | 0,08        | 0,08               |       |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | k          | 1     | 0,04 | 0,01 | 0,02  | 0,03 | 0,03        | 0,03               |       |                                   |                |                 |
| somme         |         |            | 5     |      |      |       |      |             | 0,37               |       | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
|               |         |            |       |      |      |       |      |             |                    | 0,075 | 9,46                              | <b>94,69</b>   |                 |

- association S3 (maïs-haricot-radis fourrager) en labour

| fertilisation | horizon | Étiquettes | Pond. | I     | II    | III   | IV   | Moyenne (g) | Racine après pond. |                                   |                |                    |
|---------------|---------|------------|-------|-------|-------|-------|------|-------------|--------------------|-----------------------------------|----------------|--------------------|
| FM            | 0-20    | m          | 2     | 4,65  | 3,91  | 5,01  | 3,53 | 4,28        | 8,56               |                                   |                |                    |
| FM            | 0-20    | n          | 6     | 0,3   | 0,44  | 0,2   | 0,26 | 0,3         | 1,81               |                                   |                |                    |
| FM            | 0-20    | o          | 1     | 0,23  | 0,28  | 0,34  | 0,37 | 0,3         | 0,3                |                                   |                |                    |
| FM            | 0-20    | p          | 2     | 0,39  | 0,4   | 0,31  | 0,26 | 0,34        | 0,68               |                                   |                |                    |
| FM            | 0-20    | q          | 3     | 0,17  | 0,1   | 0,15  | 0,27 | 0,17        | 0,53               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha)    |
| somme         |         |            | 14    |       |       |       |      |             | 11,91              | 0,85                              | 106,19         | <b>1061,94</b>     |
| Fu            | 0-20    | m          | 2     | 2,3   | 2,99  | 3,72  | 1,45 | 2,62        | 5,24               |                                   |                |                    |
| Fu            | 0-20    | n          | 6     | 0,21  | 0,29  | 0,33  | 0,25 | 0,27        | 1,668435575        |                                   |                |                    |
| Fu            | 0-20    | o          | 1     | 0,47  | 0,38  | 0,42  | 0,24 | 0,38        | 0,38               |                                   |                |                    |
| Fu            | 0-20    | p          | 2     | 0,41  | 0,2   | 0,71  | 0,32 | 0,41        | 0,83               |                                   |                |                    |
| Fu            | 0-20    | q          | 3     | 0,18  | 0,07  | 0,053 | 0,07 | 0,09        | 0,29               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha)    |
| somme         |         |            | 14    |       |       |       |      |             | 8,41               | 0,6                               | 75,06          | <b>750,64</b>      |
| FM            | 20-40   | m          | 2     | 0,05  | 0,15  | 0,05  | 0,11 | 0,09        | 0,18               |                                   |                |                    |
| FM            | 20-40   | n          | 6     | 0,03  | 0,06  | 0,17  | 0,09 | 0,09        | 0,54               |                                   |                |                    |
| FM            | 20-40   | o          | 1     | 0,02  | 0,019 | 0,09  | 0,15 | 0,07        | 0,074              |                                   |                |                    |
| FM            | 20-40   | p          | 2     | 0,42  | 0,06  | 0,02  | 0,13 | 0,16        | 0,32               |                                   |                |                    |
| FM            | 20-40   | q          | 3     | 0,05  | 0,02  | 0,08  | 0,08 | 0,06        | 0,18               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha)    |
| somme         |         |            | 14    |       |       |       |      |             | 1,31               | 0,09                              | 11,76          | <b>117,62</b>      |
| Fu            | 20-40   | m          | 2     | 0,33  | 0,02  | 0,05  | 0,03 | 0,11        | 0,22               |                                   |                |                    |
| Fu            | 20-40   | n          | 6     | 0,02  | 0,05  | 0,03  | 0,07 | 0,04        | 0,27               |                                   |                |                    |
| Fu            | 20-40   | o          | 1     | 0,01  | 0,02  | 0,04  | 0,06 | 0,03        | 0,03               |                                   |                |                    |
| Fu            | 20-40   | p          | 2     | 0,03  | 0,016 | 0,06  | 0,02 | 0,03        | 0,06               |                                   |                |                    |
| Fu            | 20-40   | q          | 3     | 0,007 | 0,03  | 0,02  | 0,04 | 0,029       | 0,08               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha)    |
| somme         |         |            | 14    |       |       |       |      |             | 0,69               | 0,049898207                       | 6,228053205    | <b>62,28053205</b> |

- association S3 (maïs-haricot-radis fourrager) en SCV

| fertilisation | horizon | Étiquettes | Pond. | I     | II   | III   | IV    | Moyenne (g) | Racine après pond. |                                   |                |                 |
|---------------|---------|------------|-------|-------|------|-------|-------|-------------|--------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|
| FM            | 0-20    | m          | 2     | 3,009 | 3,3  | 6,05  | 7,4   | 4,94        | 9,88               |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | n          | 6     | 0,09  | 0,37 | 0,36  | 0,15  | 0,24        | 1,47               |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | o          | 1     | 0,23  | 0,27 | 0,18  | 0,44  | 0,28        | 0,28               |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | p          | 2     | 0,24  | 0,24 | 0,23  | 0,41  | 0,28        | 0,57               |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | q          | 3     | 0,09  | 0,11 | 0,07  | 0,17  | 0,11        | 0,35               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
| somme         |         |            | 14    |       |      |       |       |             | 12,57              | 0,89                              | 112,1          | <b>1121,09</b>  |
| Fu            | 0-20    | m          | 2     | 1,69  | 2,47 | 3,69  | 3,434 | 2,82        | 5,65               |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | n          | 6     | 0,14  | 0,12 | 0,16  | 0,08  | 0,12        | 0,77               |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | o          | 1     | 0,28  | 0,46 | 0,34  | 0,21  | 0,32        | 0,32               |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | p          | 2     | 0,34  | 0,59 | 0,55  | 0,31  | 0,45        | 0,9                |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | q          | 3     | 0,29  | 0,16 | 0,27  | 0,13  | 0,21        | 0,65               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
| somme         |         |            | 14    |       |      |       |       |             | 8,32               | 0,59                              | 74,23          | <b>742,33</b>   |
| FM            | 20-40   | m          | 2     | 0,1   | 0,01 | 0,006 | 0,08  | 0,05        | 0,104              |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | n          | 6     | 0,01  | 0,01 | 0,05  | 0,1   | 0,04        | 0,26               |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | o          | 1     | 0,1   | 0,07 | 0,14  | 0,18  | 0,127       | 0,12               |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | p          | 2     | 0,07  | 0,15 | 0,13  | 0,11  | 0,11        | 0,23               |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | q          | 3     | 0,08  | 0,02 | 0,08  | 0,08  | 0,06        | 0,2                | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
| somme         |         |            | 14    |       |      |       |       |             | 0,93               | 0,06                              | 8,37           | <b>83,73</b>    |
| Fu            | 20-40   | m          | 2     | 0,06  | 0,13 | 0,17  | 0,12  | 0,12        | 0,24               |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | n          | 6     | 0,09  | 0,05 | 0,05  | 0,05  | 0,06        | 0,4                |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | o          | 1     | 0,03  | 0,06 | 0,06  | 0,11  | 0,06        | 0,06               |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | p          | 2     | 0,12  | 0,06 | 0,17  | 0,05  | 0,1         | 0,21               |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | q          | 3     | 0,07  | 0,02 | 0,04  | 0,04  | 0,048       | 0,14               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
| somme         |         |            | 14    |       |      |       |       |             | 1,07               | 0,07                              | 9,62           | <b>96,28</b>    |

- riz en labour

| fertilisation | horizon | Étiquettes | Pond. | I    | II   | III  | IV   | Moyenne (g) | Racine après pond. |                                   |                |                 |
|---------------|---------|------------|-------|------|------|------|------|-------------|--------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|
| FM            | 0-20    | r          | 1     | 0,85 | 1,81 | 1,55 | 2,38 | 1,65        | 1,65               |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | s          | 1     | 0,33 | 0,52 | 0,53 | 0,78 | 0,54        | 0,54               |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | t          | 2     | 0,34 | 0,58 | 0,66 | 0,46 | 0,516       | 1,03               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
| somme         |         |            | 4     |      |      |      |      |             | 3,22               | 0,8                               | 100,75         | <b>1007,56</b>  |
| Fu            | 0-20    | r          | 1     | 1,37 | 1,81 | 1,39 | 2,18 | 1,69        | 1,692              |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | s          | 1     | 0,22 | 0,5  | 0,2  | 0,31 | 0,31        | 0,31               |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | t          | 2     | 0,15 | 0,29 | 0,66 | 0,66 | 0,44        | 0,89               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
| somme         |         |            | 4     |      |      |      |      |             | 2,89               | 0,72                              | 90,3           | <b>903,08</b>   |
| FM            | 20-40   | r          | 1     | 0,01 | 0,06 | 0,05 | 0,06 | 0,05        | 0,05               |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | s          | 1     | 0,02 | 0,07 | 0,06 | 0,1  | 0,06        | 0,06               |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | t          | 2     | 0,01 | 0,15 | 0,07 | 0,04 | 0,07        | 0,14               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
| somme         |         |            | 4     |      |      |      |      |             | 0,26               | 0,06                              | 8,17           | <b>81,793</b>   |
| Fu            | 20-40   | r          | 1     | 0,02 | 0,04 | 0,03 | 0,06 | 0,04        | 0,04               |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | s          | 1     | 0,04 | 0,06 | 0,04 | 0,06 | 0,05        | 0,05               |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | t          | 2     | 0,04 | 0,1  | 0,03 | 0,11 | 0,07        | 0,15               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
| somme         |         |            | 4     |      |      |      |      |             | 0,24               | 0,06                              | 7,77           | <b>77,78</b>    |

- riz en SCV

| fertilisation | horizon | Étiquettes | Pond. | I    | II   | III  | IV   | Moyenne (g) | Racine après pond. |                                   |                |                 |
|---------------|---------|------------|-------|------|------|------|------|-------------|--------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|
| FM            | 0-20    | r          | 1     | 1,7  | 1,05 | 3,01 | 3,76 | 2,38        | 2,38               |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | s          | 1     | 0,23 | 0,34 | 0,11 | 0,34 | 0,25        | 0,25               |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | t          | 2     | 0,39 | 0,26 | 0,33 | 0,48 | 0,36        | 0,73               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
| somme         |         |            | 4     |      |      |      |      |             | 3,38               | 0,84                              | 105,58         | <b>1055,83</b>  |
| Fu            | 0-20    | r          | 1     | 1,4  | 1,4  | 1,52 | 1,49 | 1,45        | 1,45               |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | s          | 1     | 0,29 | 0,47 | 0,13 | 0,09 | 0,24        | 0,24               |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | t          | 2     | 0,24 | 0,64 | 0,08 | 0,5  | 0,37        | 0,74               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
| somme         |         |            | 4     |      |      |      |      |             | 2,44               | 0,61                              | 76,42          | <b>764,28</b>   |
| FM            | 20-40   | r          | 1     | 0,03 | 0,04 | 0,11 | 0,04 | 0,05        | 0,05               |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | s          | 1     | 0,07 | 0,02 | 0,06 | 0,12 | 0,07        | 0,07               |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | t          | 2     | 0,04 | 0,02 | 0,05 | 0,15 | 0,07        | 0,14               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
| somme         |         |            | 4     |      |      |      |      |             | 0,27               | 0,06                              | 8,51           | <b>85,14</b>    |
| Fu            | 20-40   | r          | 1     | 0,03 | 0,11 | 0,07 | 0,15 | 0,09        | 0,09               |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | s          | 1     | 0,03 | 0,28 | 0,07 | 0,06 | 0,11        | 0,11               |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | t          | 2     | 0,03 | 0,25 | 0,04 | 0,03 | 0,09        | 0,18               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
| somme         |         |            | 4     |      |      |      |      |             | 0,39               | 0,09                              | 12,41          | <b>124,14</b>   |

- avoine pur en SCV

| fertilisation | horizon | Étiquettes | Pond. | I    | II   | III  | IV   | Moyenne (g) | Racine après pond. |                                   |                |                 |
|---------------|---------|------------|-------|------|------|------|------|-------------|--------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|
| FM            | 0-20    | u          | 1     | 2,79 | 2,17 | 1,67 | 2,68 | 2,33        | 2,33               |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | v          | 1     | 0,25 | 0,26 | 0,1  | 0,12 | 0,18        | 0,18               |                                   |                |                 |
| FM            | 0-20    | w          | 2     | 0,27 | 0,19 | 0,1  | 0,55 | 0,28        | 0,56               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
| somme         |         |            | 4     |      |      |      |      |             | 3,08               | 0,77                              | 96,19          | <b>961,95</b>   |
| Fu            | 0-20    | u          | 1     | 0,66 | 0,62 | 1,68 | 1,94 | 1,23        | 1,23               |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | v          | 1     | 0,16 | 0,16 | 0,25 | 0,21 | 0,2         | 0,2                |                                   |                |                 |
| Fu            | 0-20    | w          | 2     | 0,22 | 0,13 | 0,13 | 0,33 | 0,2         | 0,41               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
| somme         |         |            | 4     |      |      |      |      |             | 1,84               | 0,46                              | 57,58          | <b>575,84</b>   |
| FM            | 20-40   | u          | 1     | 0,07 | 0,08 | 0,06 | 0,03 | 0,06        | 0,06               |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | v          | 1     | 0,12 | 0,05 | 0,1  | 0,04 | 0,08        | 0,08               |                                   |                |                 |
| FM            | 20-40   | w          | 2     | 0,06 | 0,02 | 0,02 | 0,08 | 0,05        | 0,1                | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
| somme         |         |            | 4     |      |      |      |      |             | 0,24               | 0,06                              | 7,76           | <b>77,62</b>    |
| Fu            | 20-40   | u          | 1     | 0,07 | 0,04 | 0,05 | 0,09 | 0,06        | 0,06               |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | v          | 1     | 0,06 | 0,03 | 0,09 | 0,06 | 0,06        | 0,06               |                                   |                |                 |
| Fu            | 20-40   | w          | 2     | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,06 | 0,03        | 0,07               | g de racines/surface de 1cylindre | racines (g/m2) | racines (kg/ha) |
| somme         |         |            | 4     |      |      |      |      |             | 0,2                | 0,05                              | 6,54           | <b>65,45</b>    |

## Annexe 9: calcul de la densité des racines dans le profil cultural (carottage en fosse)

### Système S1 : riz//maïs+crotalaire

- **Prélèvements entre lignes de crotalaire**

L'équation est de type  $X = A e^{-BY}$  avec des coefficients A et B respectivement A= 0,082 et B= 0,062.

$$\int X dY = \int A e^{-BY} dY = \left[ -\frac{A}{B} e^{-BY} \right]$$

Dans l'horizon 0-40cm

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ -\frac{A}{B} e^{-BY} \right]_{-40}^0 = \left[ -\frac{A}{B} \right] - \left[ -\frac{A}{B} e^{-0,062 \times 40} \right] = -\left[ \frac{A}{B} (1 - e^{-0,062 \times 40}) \right]$$

$$\text{Quantité (0-40)} = \frac{A}{B} (1 - e^{-0,062 \times 40}) = 1,21 \text{ g}$$

Donc il y a 1,21g de racines dans l'horizon 0-40cm.

Dans l'horizon 40cm et plus

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \left[ -\frac{A}{B} e^{-BY} \right]_{-\infty}^{-40} = \left[ -\frac{A}{B} e^{-0,062 \times 40} \right] - \left[ -\frac{A}{B} \right] = \left[ \frac{A}{B} (1 - e^{-0,062 \times 40}) \right]$$

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \frac{A}{B} (1 - e^{-0,062 \times 40}) = 0,10 \text{ g}$$

- **Prélèvements Sous pied crotalaire**

L'équation est de type  $X = A e^{-BY}$  avec des coefficients A et B respectivement A= 0,34 et B= 0,022.

$$\int X dY = \int A e^{-BY} dY = \left[ -\frac{A}{B} e^{-BY} \right]$$

Dans l'horizon 0-40cm

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ -\frac{A}{B} e^{-BY} \right]_{-40}^0 = \left[ -\frac{A}{B} \right] - \left[ -\frac{A}{B} e^{-0,022 \times 40} \right] = -\left[ \frac{A}{B} (1 - e^{-0,022 \times 40}) \right]$$

$$\text{Quantité (0-40)} = \frac{A}{B} (1 - e^{-0,022 \times 40}) = 9,14 \text{ g}$$

Dans l'horizon plus de 40cm

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \left[ -\frac{A}{B} e^{-BY} \right]_{-\infty}^{-40} = \left[ -\frac{A}{B} e^{-0,022 \times 40} \right] - \left[ -\frac{A}{B} \right] = \left[ \frac{A}{B} (1 - e^{-0,022 \times 40}) \right]$$

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \frac{A}{B} (1 - e^{-0,022 \times 40}) = 6,26 \text{ g}$$

- **Prélèvements Sous pied maïs**

L'équation est de type  $X = A e^{-BY}$  avec des coefficients A et B respectivement A= 0,87 et B= 0,11.

$$\int X dY = \int A e^{BY} dY = \left[ - \right]$$

Dans l'horizon 0-40cm

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ - \right]_{-40}^0 = \left[ - \right] - \left[ - \right] = - \left[ \right]$$

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ \right] = 7,87\text{g}$$

Dans l'horizon plus de 40cm

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \left[ - \right]_{-\infty}^{-40} = \left[ - \right] - \left[ - \right] = \left[ - \right]$$

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \left[ \right] = 0,09\text{g}$$

### Système S2 : riz//éleusine+crotalaire+cajanus

- **Prélèvements sous pied d'éleusine**

L'équation est de type  $X = A$  avec des coefficients A et B respectivement A= 2,35 et B= 0,10.

$$\int X dY = \int A e^{BY} dY = \left[ - \right]$$

Dans l'horizon 0-40cm

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ - \right]_{-40}^0 = \left[ - \right] - \left[ - \right] = - \left[ \right]$$

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ \right] = 21,32\text{g}$$

Il y a 21,32g de racine dans l'horizon 0-40cm sous pied d'éleusine.

Dans l'horizon plus de 40cm

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \left[ - \right]_{-\infty}^{-40} = \left[ - \right] - \left[ - \right] = \left[ - \right]$$

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \left[ \right] = 0,27\text{g}$$

- **Prélèvements sous pieds crotalaire**

L'équation est de type  $X = A$  avec des coefficients A et B respectivement A= 0,92 et B= 0,040

$$\int X dY = \int A e^{BY} dY = \left[ - \right]$$

Dans l'horizon 0-40cm

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ - \right]_{-40}^0 = \left[ - \right] - \left[ - \right] = - \left[ \right]$$

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ \right] = 18,39\text{g}$$

Dans l'horizon plus de 40cm

$$\text{Quantité } (-40 \text{ à } -\infty) = [- \quad ]^{-40}_{-\infty} = [- \quad ] - [- \quad ] = [- \quad ]$$

$$\text{Quantité } (-40 \text{ à } -\infty) = \text{---}[- \quad ] = 4,54\text{g}$$

• **Prélèvements entre un pied d'éleusine et un pied de crotalaire**

L'équation est de type  $X = A$  avec des coefficients A et B respectivement A= 0,43et B= 0,058

$$\int X dY = \int A e^{BY} dY = [- \quad ]$$

Dans l'horizon 0-40cm

$$\text{Quantité } (0-40) = [- \quad ]^0_{-40} = [- \quad ] - [- \quad ] = -[- \quad ]$$

$$\text{Quantité } (0-40) = \text{---}[- \quad ] = 6,67\text{g}$$

Dans l'horizon plus de 40cm

$$\text{Quantité } (-40 \text{ à } -\infty) = [- \quad ]^{-40}_{-\infty} = [- \quad ] - [- \quad ] = [- \quad ]$$

$$\text{Quantité } (-40 \text{ à } -\infty) = \text{---}[- \quad ] = 0,71\text{g}$$

• **Prélèvements entre un pied de crotalaire et un pied de cajanus**

L'équation est de type  $X = A$  avec des coefficients A et B respectivement A= 0,71et B= 0,099

$$\int X dY = \int A e^{BY} dY = [- \quad ]$$

Dans l'horizon 0-40cm

$$\text{Quantité } (0-40) = [- \quad ]^0_{-40} = [- \quad ] - [- \quad ] = -[- \quad ]$$

$$\text{Quantité } (0-40) = \text{---}[- \quad ] = 7,02\text{g}$$

Dans l'horizon plus de 40cm.

$$\text{Quantité } (-40 \text{ à } -\infty) = [- \quad ]^{-40}_{-\infty} = [- \quad ] - [- \quad ] = [- \quad ]$$

$$\text{Quantité } (-40 \text{ à } -\infty) = \text{---}[- \quad ] = 0,13\text{g}$$

**Système S3 : riz//haricot+maïs**

• **Prélèvements sous pieds de maïs**

L'équation est de type  $X = A$  avec des coefficients A et B respectivement A= 0,50et B= 0,054

$$\int X dY = \int A e^{BY} dY = \left[ - \right]$$

Dans l'horizon 0-40cm

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ - \right]_{-40}^0 = \left[ - \right] - \left[ - \right] = - \left[ \right]$$

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ \right] = 8,16\text{g}$$

Dans l'horizon plus de 40cm

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \left[ - \right]_{-\infty}^{-40} = \left[ - \right] - \left[ - \right] = \left[ - \right]$$

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \left[ \right] = 1,03\text{g}$$

- **Prélèvements entre 2 pieds de maïs**

L'équation est de type  $X = A$  avec des coefficients A et B respectivement A= 0,36 et B= 0,029

$$\int X dY = \int A e^{BY} dY = \left[ - \right]$$

Dans l'horizon 0-40cm

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ - \right]_{-40}^0 = \left[ - \right] - \left[ - \right] = - \left[ \right]$$

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ \right] = 8,41\text{g}$$

Dans l'horizon plus de 40cm

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \left[ - \right]_{-\infty}^{-40} = \left[ - \right] - \left[ - \right] = \left[ - \right]$$

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \left[ \right] = 3,66\text{g}$$

- **Prélèvements sous pieds d'haricot**

L'équation est de type  $X = A$  avec des coefficients A et B respectivement A= 0,024 et B= 0,016

$$\int X dY = \int A e^{BY} dY = \left[ - \right]$$

Dans l'horizon 0-40cm

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ - \right]_{-40}^0 = \left[ - \right] - \left[ - \right] = - \left[ \right]$$

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ \right] = 1,73\text{g}$$

Dans l'horizon plus de 40cm

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \left[ - \right]_{-\infty}^{-40} = \left[ - \right] - \left[ - \right] = \left[ - \right]$$

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \left[ \right] = 0,81\text{g}$$

## Riz

- **Prélèvements entre deux pieds de riz**

L'équation est de type  $X = A e^{-BY}$  avec des coefficients A et B respectivement A= 0,93 et B= 0,095

$$\int X dY = \int A e^{-BY} dY = \left[ -\frac{A}{B} e^{-BY} \right]$$

Dans l'horizon 0-40cm

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ -\frac{A}{B} e^{-BY} \right]_{-40}^0 = \left[ -\frac{A}{B} \right] - \left[ -\frac{A}{B} e^{-40B} \right] = -\left[ \frac{A}{B} (1 - e^{-40B}) \right]$$

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ \frac{A}{B} (1 - e^{-40B}) \right] = 9,59\text{g}$$

Dans l'horizon plus de 40cm

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \left[ -\frac{A}{B} e^{-BY} \right]_{-\infty}^{-40} = \left[ -\frac{A}{B} e^{-40B} \right] - \left[ -\frac{A}{B} \right] = \left[ \frac{A}{B} (1 - e^{-40B}) \right]$$

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \left[ \frac{A}{B} (1 - e^{-40B}) \right] = 0,21\text{g}$$

- **Prélèvements sous pieds de riz**

L'équation est de type  $X = A e^{-BY}$  avec des coefficients A et B respectivement A= 0,16 et B= 0,0095

$$\int X dY = \int A e^{-BY} dY = \left[ -\frac{A}{B} e^{-BY} \right]$$

Dans l'horizon 0-40cm

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ -\frac{A}{B} e^{-BY} \right]_{-40}^0 = \left[ -\frac{A}{B} \right] - \left[ -\frac{A}{B} e^{-40B} \right] = -\left[ \frac{A}{B} (1 - e^{-40B}) \right]$$

$$\text{Quantité (0-40)} = \left[ \frac{A}{B} (1 - e^{-40B}) \right] = 5,63\text{g}$$

Dans l'horizon plus de 40cm

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \left[ -\frac{A}{B} e^{-BY} \right]_{-\infty}^{-40} = \left[ -\frac{A}{B} e^{-40B} \right] - \left[ -\frac{A}{B} \right] = \left[ \frac{A}{B} (1 - e^{-40B}) \right]$$

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \left[ \frac{A}{B} (1 - e^{-40B}) \right] = 0,95\text{g}$$

## Avoine cultivé en pur

- **Prélèvements sous pieds d'avoine**

L'équation est de type  $X = A e^{-BY}$  avec des coefficients A et B respectivement A= 0,46 et B= 0,046

$$\int X dY = \int A e^{-BY} dY = \left[ -\frac{A}{B} e^{-BY} \right]$$

Dans l'horizon 0-40cm

$$\text{Quantité (0-40)} = [- \quad ]^0_{-40} = [- \quad ] - [- \quad ] = -[ \quad ]$$

$$\text{Quantité (0-40)} = \text{---} [ \quad ] = 8,45\text{g}$$

Dans l'horizon plus de 40cm

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = [- \quad ]^{-40}_{-\infty} = [- \quad ] - [- \quad ] = [- \quad ]$$

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \text{---} [ \quad ] = 1,52\text{g}$$

• **Prélèvements entre lignes d'avoine**

L'équation est de type  $X = A e^{BY}$  avec des coefficients A et B respectivement  $A = 0,68$  et  $B = 0,084$

$$\int X dY = \int A e^{BY} dY = [- \quad ]$$

Dans l'horizon 0-40cm

$$\text{Quantité (0-40)} = [- \quad ]^0_{-40} = [- \quad ] - [- \quad ] = -[ \quad ]$$

$$\text{Quantité (0-40)} = \text{---} [ \quad ] = 7,83\text{g}$$

Dans l'horizon plus de 40cm

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = [- \quad ]^{-40}_{-\infty} = [- \quad ] - [- \quad ] = [- \quad ]$$

$$\text{Quantité (-40 à } -\infty) = \text{---} [ \quad ] = 0,27\text{g}$$

**Annexe 10: : carbone apporté par le fumier**

|                   |                   |
|-------------------|-------------------|
| qté (t/ha)        | 5                 |
| teneur en MS (%)  | 41,3333333        |
| MS                | 2,06666667        |
| teneur en C (%MS) | 12,7546124        |
| C fumier          | <b>0,26359532</b> |

## Annexe 11: ANOVA des biomasses aériennes

### 1- association en S1 maïs-crotalaire

#### - pour le maïs

Analyse Type I Sum of Squares (Variable BA) :

| Source                   | DDL | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Pr > F |
|--------------------------|-----|------------------|--------------------|-------|--------|
| traitement               | 1   | 18955,995        | 18955,995          | 0,009 | 0,924  |
| fertilisation            | 1   | 16772985,069     | 16772985,069       | 8,392 | 0,013  |
| traitement*fertilisation | 1   | 64496,770        | 64496,770          | 0,032 | 0,860  |

traitement\*fertilisation / Fisher (LSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

| Modalité                        | Moyenne estimée | Groupes |
|---------------------------------|-----------------|---------|
| traitement-SCV*fertilisation-Fu | 1626,250        | A       |
| traitement-LAB*fertilisation-Fu | 1822,071        | A       |
| traitement-LAB*fertilisation-FM | 3742,832        | A       |
| traitement-SCV*fertilisation-FM | 3800,972        | A       |

#### - pour la crotalaire

Analyse Type I Sum of Squares (Variable BA) :

| Source                   | DDL | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Pr > F |
|--------------------------|-----|------------------|--------------------|-------|--------|
| traitement               | 1   | 100053,208       | 100053,208         | 0,206 | 0,658  |
| fertilisation            | 1   | 512913,719       | 512913,719         | 1,058 | 0,324  |
| traitement*fertilisation | 1   | 705807,449       | 705807,449         | 1,456 | 0,251  |

traitement / Fisher (LSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

| Modalité                        | Moyenne estimée | Groupes |
|---------------------------------|-----------------|---------|
| traitement-SCV*fertilisation-FM | 1255,568        | A       |
| traitement-LAB*fertilisation-Fu | 1771,814        | A       |
| traitement-LAB*fertilisation-FM | 1833,786        | A       |
| traitement-SCV*fertilisation-Fu | 2033,720        | A       |

**2- association en S2 : éléusine-crotalaire-cajanus**  
 - **pour l'éléusine**

Analyse Type I Sum of Squares (Variable BA) :

| Source                   | DDL | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Pr > F |
|--------------------------|-----|------------------|--------------------|-------|--------|
| traitement               | 1   | 69873,638        | 69873,638          | 0,009 | 0,925  |
| fertilisation            | 1   | 18703485,517     | 18703485,517       | 2,482 | 0,141  |
| traitement*fertilisation | 1   | 169630,304       | 169630,304         | 0,023 | 0,883  |

fertilisation / Fisher (LSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

| Modalité                        | Moyenne estimée | Groupes |
|---------------------------------|-----------------|---------|
| traitement-LAB*fertilisation-Fu | 1944,516        | A       |
| traitement-SCV*fertilisation-Fu | 2282,616        | A       |
| traitement-SCV*fertilisation-FM | 4239,061        | A       |
| traitement-LAB*fertilisation-FM | 4312,824        | A       |

- **pour la crotalaire**

Analyse Type I Sum of Squares (Variable BA) :

| Source                   | DDL | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Pr > F |
|--------------------------|-----|------------------|--------------------|-------|--------|
| traitement               | 1   | 376623,167       | 376623,167         | 0,135 | 0,720  |
| fertilisation            | 1   | 6013146,993      | 6013146,993        | 2,153 | 0,168  |
| traitement*fertilisation | 1   | 350872,071       | 350872,071         | 0,126 | 0,729  |

traitement\*fertilisation / Fisher (LSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

| Modalité                        | Moyenne estimée | Groupes |
|---------------------------------|-----------------|---------|
| traitement-SCV*fertilisation-Fu | 1619,231        | A       |
| traitement-LAB*fertilisation-Fu | 1629,907        | A       |
| traitement-SCV*fertilisation-FM | 2549,144        | A       |
| traitement-LAB*fertilisation-FM | 3152,165        | A       |

### 3- association en S3 : maïs-haricot-radis fourrager

#### - pour le maïs :

Analyse Type I Sum of Squares (Variable BA) :

| Source                   | DDL | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Pr > F |
|--------------------------|-----|------------------|--------------------|-------|--------|
| traitement               | 1   | 2570363,285      | 2570363,285        | 5,760 | 0,034  |
| fertilisation            | 1   | 3455836,329      | 3455836,329        | 7,744 | 0,017  |
| traitement*fertilisation | 1   | 899617,329       | 899617,329         | 2,016 | 0,181  |

traitement\*fertilisation / Fisher (LSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

| Modalité                        | Moyenne estimée | Groupes |
|---------------------------------|-----------------|---------|
| traitement-LAB*fertilisation-Fu | 1213,176        | A       |
| traitement-SCV*fertilisation-Fu | 1540,553        | A       |
| traitement-LAB*fertilisation-FM | 1668,429        | A       |
| traitement-SCV*fertilisation-FM | 2944,288        | B       |

#### - pour le haricot

Analyse Type I Sum of Squares (Variable BA)

:

| Source                   | DDL | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Pr > F |
|--------------------------|-----|------------------|--------------------|-------|--------|
| traitement               | 1   | 52287,870        | 52287,870          | 1,455 | 0,25   |
| fertilisation            | 1   | 752029,549       | 752029,549         | 20,92 | 1      |
| traitement*fertilisation | 1   | 18619,156        | 18619,156          | 0,518 | 0,00   |
|                          |     |                  |                    |       | 1      |
|                          |     |                  |                    |       | 0,48   |
|                          |     |                  |                    |       | 5      |

#### 4- riz

Analyse Type I Sum of Squares (Variable BA) :

| Source                   | DDL | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Pr > F |
|--------------------------|-----|------------------|--------------------|-------|--------|
| traitement               | 1   | 12905949,396     | 12905949,396       | 2,054 | 0,177  |
| fertilisation            | 1   | 1835578,212      | 1835578,212        | 0,292 | 0,599  |
| traitement*fertilisation | 1   | 27811,192        | 27811,192          | 0,004 | 0,948  |

traitement\*fertilisation / Fisher (LSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

| Modalité                        | Moyenne estimée | Groupes |
|---------------------------------|-----------------|---------|
| traitement-SCV*fertilisation-Fu | 4337,980        | A       |
| traitement-SCV*fertilisation-FM | 4932,014        | A       |
| traitement-LAB*fertilisation-Fu | 6050,839        | A       |
| traitement-LAB*fertilisation-FM | 6811,640        | A       |

#### 5- avoine pur

Analyse Type I Sum of Squares (Variable BA) :

| Source        | DDL | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Pr > F |
|---------------|-----|------------------|--------------------|-------|--------|
| fertilisation | 1   | 6859894,131      | 6859894,131        | 5,073 | 0,065  |

fertilisation / Fisher (LSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

| Contraste | Différence | Différence standardisée | Valeur critique | Pr > Diff | Significatif |
|-----------|------------|-------------------------|-----------------|-----------|--------------|
| Fu vs FM  | -1852,012  | -2,252                  | 2,448           | 0,065     | Non          |

| Modalité | Moyenne estimée | Groupes |
|----------|-----------------|---------|
| Fu       | 2187,676        | A       |
| FM       | 4039,688        | A       |

## Annexe 12: ANOVA des biomasses racinaires

### 1- Association en S1 : maïs-crotalaire

Analyse Type I Sum of Squares (Variable BR) :

| Source                   | DDL | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Pr > F |
|--------------------------|-----|------------------|--------------------|-------|--------|
| traitement               | 1   | 206962,814       | 206962,814         | 0,415 | 0,532  |
| fertilisation            | 1   | 70673,874        | 70673,874          | 0,142 | 0,713  |
| traitement*fertilisation | 1   | 339708,549       | 339708,549         | 0,680 | 0,426  |

traitement\*fertilisation / Fisher (LSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

| Modalité                        | Moyenne estimée | Groupes |
|---------------------------------|-----------------|---------|
| traitement-SCV*fertilisation-FM | 2421,016        | A       |
| traitement-LAB*fertilisation-Fu | 2781,404        | A       |
| traitement-SCV*fertilisation-Fu | 2845,361        | A       |
| traitement-LAB*fertilisation-FM | 2939,904        | A       |

### 2- Association en S2 : éléusine-crotalaire-cajanus

Analyse Type I Sum of Squares (Variable BR)

:

| Source                   | DDL | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Pr > F |
|--------------------------|-----|------------------|--------------------|-------|--------|
| traitement               | 1   | 3425514,636      | 3425514,636        | 3,951 | 0,07   |
| fertilisation            | 1   | 17762341,496     | 17762341,496       | 5     | 0,00   |
| traitement*fertilisation | 1   | 15101723,316     | 15101723,316       | 17,41 | 0,00   |
|                          |     |                  |                    | 6     | 1      |

fertilisation / Fisher (LSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

| Modalité                        | Moyenne estimée | Groupes |
|---------------------------------|-----------------|---------|
| traitement-LAB*fertilisation-Fu | 2423,539        | A       |
| traitement-SCV*fertilisation-Fu | 3441,178        | A       |
| traitement-SCV*fertilisation-FM | 3605,401        | A       |
| traitement-LAB*fertilisation-FM | 6473,855        | B       |

### 3- Association en S3 : maïs-haricot-radis fourrager

Analyse Type I Sum of Squares (Variable BR) :

| Source                   | DDL | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Pr > F |
|--------------------------|-----|------------------|--------------------|-------|--------|
| traitement               | 1   | 18543,711        | 18543,711          | 0,096 | 0,762  |
| fertilisation            | 1   | 1360350,411      | 1360350,411        | 7,051 | 0,021  |
| traitement*fertilisation | 1   | 737942,147       | 737942,147         | 3,825 | 0,074  |

traitement\*fertilisation / Fisher (LSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

| Modalité                        | Moyenne estimée | Groupes |
|---------------------------------|-----------------|---------|
| traitement-SCV*fertilisation-Fu | 1568,015        | A       |
| traitement-LAB*fertilisation-Fu | 1929,445        | A B     |
| traitement-LAB*fertilisation-FM | 2083,098        | A B     |
| traitement-SCV*fertilisation-FM | 2580,703        | B       |

### 4- Riz

Analyse Type I Sum of Squares (Variable BR) :

| Source                   | DDL | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Pr > F |
|--------------------------|-----|------------------|--------------------|-------|--------|
| traitement               | 1   | 4015,856         | 4015,856           | 0,014 | 0,908  |
| fertilisation            | 1   | 314122,978       | 314122,978         | 1,082 | 0,319  |
| traitement*fertilisation | 1   | 50020,723        | 50020,723          | 0,172 | 0,685  |

traitement\*fertilisation / Fisher (LSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

| Modalité                        | Moyenne estimée | Groupes |
|---------------------------------|-----------------|---------|
| traitement-SCV*fertilisation-Fu | 1379,185        | A       |
| traitement-LAB*fertilisation-Fu | 1522,697        | A       |
| traitement-LAB*fertilisation-FM | 1691,104        | A       |
| traitement-SCV*fertilisation-FM | 1771,245        | A       |

### 5- Avoine pur

Analyse Type I Sum of Squares (Variable BR) :

| Source        | DDL | Somme des carrés | Moyenne des carrés | F     | Pr > F |
|---------------|-----|------------------|--------------------|-------|--------|
| fertilisation | 1   | 363784,981       | 363784,981         | 4,148 | 0,088  |

fertilisation / Fisher (LSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

| Contraste | Différence      | Différence standardisée | Valeur critique | Pr > Diff | Significatif |
|-----------|-----------------|-------------------------|-----------------|-----------|--------------|
| FM vs Fu  | 0,000           | 0,000                   | 2,448           | 1,000     | Non          |
|           | Moyenne estimée | Groupes                 |                 |           |              |
| Modalité  |                 |                         |                 |           |              |
| FM        | 2,500           | A                       |                 |           |              |
| Fu        | 2,500           | A                       |                 |           |              |

### Annexe 13: Biomasses aérienne et racinaire des plantes et systèmes étudiés

- Données mesurées

| systèmes | gestion du sol | fertilisation | plantes    | biomasse aérienne | biomasse racinaire |
|----------|----------------|---------------|------------|-------------------|--------------------|
|          |                |               |            | moyenne (t/ha)    | moyenne (t/ha)     |
| S1       | LAB            | FM            | riz        | 6,81 ± 3,53       | 1,69 ± 0,51        |
|          |                |               | maïs       | -                 | 2,93 ± 0,82        |
|          |                |               | crotalaire | 1,83 ± 0,93       |                    |
|          |                | Fu            | riz        | 6,05 ± 2,73       | 1,52 ± 0,42        |
|          |                |               | maïs       | -                 | 2,78 ± 0,89        |
|          |                |               | crotalaire | 1,77 ± 0,59       |                    |
|          | SCV            | FM            | riz        | 4,93 ± 1,56       | 1,77 ± 0,73        |
|          |                |               | maïs       | -                 | 2,42 ± 0,39        |
|          |                |               | crotalaire | 1,25 ± 0,66       |                    |
|          |                | Fu            | riz        | 4,33 ± 0,74       | 1,37 ± 0,42        |
|          |                |               | maïs       | -                 | 2,84 ± 0,59        |
|          |                |               | crotalaire | 2,03 ± 0,51       |                    |
| S2       | LAB            | FM            | riz        | 6,81 ± 3,53       | 1,69 ± 0,51        |
|          |                |               | crotalaire | 3,15 ± 1,95       | 5,36 ± 0,65        |
|          |                |               | éleusine   | 4,31 ± 3,97       |                    |
|          |                | Fu            | riz        | 6,05 ± 2,73       | 1,52 ± 0,42        |
|          |                |               | crotalaire | 1,62 ± 1,49       | 1,49 ± 0,1         |
|          |                |               | éleusine   | 1,94 ± 0,51       |                    |
|          | SCV            | FM            | riz        | 4,93 ± 1,56       | 1,77 ± 0,73        |
|          |                |               | crotalaire | 2,54 ± 2,1        | 2,57 ± 1,37        |
|          |                |               | éleusine   | 4,23 ± 3,54       |                    |
|          |                | Fu            | riz        | 4,33 ± 0,74       | 1,37 ± 0,42        |
|          |                |               | crotalaire | 1,61 ± 0,83       | 2,32 ± 1,06        |
|          |                |               | éleusine   | 2,28 ± 1,22       |                    |
| S3       | LAB            | FM            | riz        | 6,81 ± 3,53       | 1,69 ± 0,51        |
|          |                |               | haricot    | 0,45 ± 0,06       | 1,98 ± 0,16        |
|          |                |               | maïs       | -                 |                    |
|          |                | Fu            | riz        | 6,05 ± 2,73       | 1,52 ± 0,42        |
|          |                |               | haricot    | 0,09 ± 0,02       | 1,36 ± 0,35        |
|          |                |               | maïs       | -                 |                    |
|          | SCV            | FM            | riz        | 4,93 ± 1,56       | 1,77 ± 0,73        |
|          |                |               | haricot    | 0,63 ± 0,35       | 2,02 ± 0,73        |
|          |                |               | maïs       | -                 |                    |
|          |                | Fu            | riz        | 4,33 ± 0,74       | 1,37 ± 0,42        |
|          |                |               | haricot    | 0,13 ± 0,11       | 1,4 ± 0,28         |
|          |                |               | maïs       | -                 |                    |
| Avoine   | SCV            | FM            | Avoine     | 4,03 ± 0,9        | 1,11 ± 0,3         |
|          |                | Fu            | Avoine     | 2,18 ± 1,37       | 0,68 ± 0,29        |

- **Données Andranomanelatra (2012)**

| plantes            | gestion du sol | fertilisation | BA (t/ha) |
|--------------------|----------------|---------------|-----------|
| cajanus            | LAB            | FM            | 1,46      |
|                    | LAB            | Fu            | 1,22      |
|                    | SCV            | FM            | 1,36      |
|                    | SCV            | Fu            | 1,47      |
| radis<br>fourrager | LAB            | FM            | 0,14      |
|                    | LAB            | Fu            | 0,78      |
|                    | SCV            | FM            | 0,77      |
|                    | SCV            | Fu            | 0,22      |

### Annexe 14: Récapitulation des apports en carbone des systèmes étudiés

| systèmes                     |                             | plantes                     | C de BR (t de C/ha) | C de BA (t de C/ha)    | C BA+BR (t de C/ha) | qtté de C moyenne annuelle (t de C/ha/an) |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|---|
| SCV avec 100% de restitution | S1 FM                       | riz                         | 0,79                | 2,21                   | 3,01                | 2,79                                      |
|                              |                             | maïs-crotalaire             | 0,87                | 1,26<br>0,41           | 2,56                |   |
|                              | S1 Fu                       | riz                         | 0,62                | 1,95                   | 2,57                | 2,41                                      |
|                              |                             | maïs-crotalaire             | 1,03                | 0,54<br>0,67           | 2,25                |   |
|                              | S2 FM                       | riz                         | 0,79                | 2,21                   | 3,01                | 3,63                                      |
|                              |                             | éleusine-crotalaire-cajanus | 1,4                 | 1,48<br>0,89<br>0,47   | 4,25                |   |
|                              |                             | riz                         | 0,62                | 1,95                   | 2,57                |   |
|                              | S2 Fu                       | éleusine-crotalaire-cajanus | 1,34                | 0,79<br>0,56<br>0,51   | 3,22                | 2,895                                     |
|                              |                             | riz                         | 0,79                | 2,21                   | 3,01                |   |
|                              |                             | maïs-haricot-radis          | 1,19                | 0,95<br>0,2<br>0,25    | 2,61                |   |
|                              | S3 FM                       | riz                         | 0,62                | 1,95                   | 2,57                | 1,955                                     |
|                              |                             | maïs-haricot-radis          | 0,72                | 0,5<br>0,04<br>0,07    | 1,34                |   |
|                              |                             | riz                         | 0,79                | 1,105                  | 1,895               |   |
|                              | SCV avec 50% de restitution | S1 FM                       | riz                 | 0,79                   | 1,105               | 1,895                                     |
| maïs-crotalaire              |                             |                             | 0,87                | 0,63<br>0,205          | 1,705               |   |
| S1 Fu                        |                             | riz                         | 0,62                | 0,975                  | 1,595               | 1,615                                     |
|                              |                             | maïs-crotalaire             | 1,03                | 0,27<br>0,335          | 1,635               |   |
| S2 FM                        |                             | riz                         | 0,79                | 1,105                  | 1,895               | 2,3575                                    |
|                              |                             | éleusine-crotalaire-cajanus | 1,4                 | 0,74<br>0,445<br>0,235 | 2,82                |   |
|                              |                             | riz                         | 0,62                | 0,975                  | 1,595               |   |
| S2 Fu                        |                             | éleusine-crotalaire-cajanus | 1,34                | 0,395<br>0,28<br>0,255 | 2,27                | 1,9325                                    |
|                              |                             | riz                         | 0,79                | 1,105                  | 1,895               |   |
|                              |                             | maïs-haricot-radis          | 1,19                | 0,475<br>0,1<br>0,125  | 1,89                |   |
| S3 FM                        |                             | riz                         | 0,62                | 0,975                  | 1,595               | 1,31                                      |
|                              |                             | maïs-haricot-radis          | 0,72                | 0,25<br>0,02<br>0,035  | 1,025               |   |
|                              |                             | riz                         | 0,79                | 1,105                  | 1,895               |   |

**Annexe 15: stock de carbone de départ (simulation)**

|       | Densité apparente (Da) | Teneur en C (%)     | épaisseur (m) | volume de sol (m3) | masse de sol | stock C initial   | C total |
|-------|------------------------|---------------------|---------------|--------------------|--------------|-------------------|---------|
|       | (Razafimbelo, 2005)    | (Razafimbelo, 2005) |               |                    | da x vol sol | masse de sol x %C |         |
| 0-20  | 0,87                   | 3,67                | 0,2           | 2000               | 1740         | 6385,8            | 14291,3 |
| 20-40 | 0,95                   | 4,135               | 0,2           | 2000               | 1900         | 7856,5            |         |