



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

-----  
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES  
AGRONOMIQUES  
-----

Mention : AT2D

Parcours : Biofonctionnement des Sols et Environnement

Mémoire de Fin d'étude en vue de l'obtention d'un Diplôme de Master 2



EFFETS DU DEGRE DE MECANISATION DU TRAVAIL DU  
SOL SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES DU SOL ET LE  
DEVELOPPEMENT RACINAIRE DU MAÏS

Réalisé par DAYOU Ephrème Dossavi

Promotion : ANDRISA

Soutenu le 19 Janvier 2017 devant le jury composé de :

Président	: Dr ANDRIAMANIRAKA Harilala J.
Examineur	: Dr RAZAFIMAHATRATRA Hery M.
Examineur	: Dr RAKOTONDRAVELO Jean Chrysostome
Maître de stage	: Mme HOELATIANA Maminantenaina
Encadreur pédagogique	: M. RAKOTO Benjamin





AGRICULTURE TROPICALE &  
DÉVELOPPEMENT DURABLE

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

-----  
ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES  
AGRONOMIQUES  
-----

Mention : AT2D

Parcours : Biofonctionnement des Sols et Environnement

Mémoire de Fin d'étude en vue de l'obtention d'un Diplôme de Master 2



EFFETS DU DEGRE DE MECANISATION DU TRAVAIL DU  
SOL SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES DU SOL ET LE  
DEVELOPPEMENT RACINAIRE DU MAÏS

Réalisé par DAYOU Ephrème Dossavi

Promotion : ANDRISA

Soutenu le 19 Janvier 2017 devant le jury composé de :

Président	: Dr ANDRIAMANIRAKA Harilala J.
Examineur	: Dr RAZAFIMAHATRATRA Hery M.
Examineur	: Dr RAKOTONDRAVELO Jean Chrysostome
Maître de stage	: Mme HOELATIANA Maminantenaina
Encadreur pédagogique	: M. RAKOTO Benjamin





## DEDICACE

*A*

*Dieu le Suprême, Auteur et Maître de Toute Chose!*

*Pensez que vous pouvez ou pas,  
dans les deux cas vous avez  
raison !*

**Henry Ford**

## REMERCIEMENTS

Cette étude n'a pu aboutir que grâce à la contribution de nombreuses personnes à qui nous exprimons ici notre profonde reconnaissance. Ainsi, nos vifs remerciements s'adressent particulièrement à :

- ✓ Monsieur **ANDRIAMANIRAKA Harilala**, Docteur en Agronomie, Maître de Conférences, Chef de Mention AT2D de l'École Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), pour avoir accepté de présider ce jury malgré ses lourdes responsabilités ;
- ✓ Monsieur **RAKOTO Benjamin**, Enseignant-chercheur à l'ESSA, notre Tuteur, qui a accepté de suivre ce travail et qui l'a fait jusqu'au bout. Nous lui exprimons notre profonde gratitude ;
- ✓ Monsieur **RAZAFIMAHATRATRA Hery**, Docteur en Agronomie, Chef du Parcours « Biofonctionnement des Sols et Environnement », Responsable du Laboratoire du Sol de l'ESSA, pour avoir accepté d'examiner ce document et pour sa contribution à travers la gratuité des analyses de certains de nos échantillons de sol dans son Laboratoire ;
- ✓ Monsieur **RAKOTONDRAVELO Jean Chrysostome**, Docteur en Agro-économie, qui a accepté d'examiner ce mémoire malgré ses multiples occupations ;
- ✓ Madame **HOELATIANA Maminantenaina**, Ingénieur agronome, Chef de Service Exploitation au Centre de Formation et d'Application du Machinisme Agricole (CFAMA), notre Maître de stage, pour sa disponibilité et son accompagnement durant cette étude ;
- ✓ Monsieur **RAKOTOSON David**, Directeur du CFAMA, pour avoir accepté que la présente expérimentation soit faite au sein de son Centre ;
- ✓ Monsieur **ZOKPODO Barnabé**, Enseignant-chercheur à la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi au Bénin, pour ses recommandations ;
- ✓ A ma mère, **Akouavi BALLO** et mon père, **Philippe DAYOU**, que ce travail soit pour vous la récompense de vos multiples peines.
- ✓ **La Commission Européenne**, pour le financement effectif de cette bourse de mobilité ;
- ✓ Toute l'équipe de **la Coopération PAFROID** de l'Université d'Antananarivo ;
- ✓ Au service de Coopération Interuniversitaire de l'Université d'Abomey-Calavi, en occurrence Madame **Lydia SOGNON**, pour leur appui ;
- ✓ Tout le personnel enseignant, administratif et technique de l'ESSA ;
- ✓ Tous les étudiants de la promotion **ANDRISA**, pour leur franche collaboration ;
- ✓ Tous les boursiers **PAFROID** et particulièrement **MBOUP Mamadou et KENSOP SUAYO Darelle** pour cette vie fraternelle menée durant notre séjour ;
- ✓ Aux frères compatriotes Bénéinois **Eliphaz ESSAH** et **Rodrigue ADECHINA** ;
- ✓ A toute ma Famille et spécialement à **Marthe MONTCHO** et **Olivier DAYOU** ;
- ✓ Tous ceux qui ont, d'une manière ou d'une autre, contribué à la réalisation de ce travail.

## SOMMAIRE

Dédicace.....	i
Remerciements.....	ii
Sommaire.....	iii
Liste des illustrations.....	iv
Liste des tableaux.....	iv
Liste des figures.....	iv
Liste des cartes.....	iv
Liste des photos.....	iv
Liste des sigles et abréviations.....	v
Résumé.....	vi
Abstract.....	vi
Introduction.....	2
1. Matériel et méthodes.....	5
1.1 Matériel.....	5
1.2 Méthodes.....	12
2. Résultats.....	20
2.1 Effets du degré de mécanisation sur les paramètres physiques du sol.....	20
2.2 Effets du degré de mécanisation sur le développement racinaire du maïs.....	25
2.3 Synthèse des effets du degré de mécanisation du travail du sol sur les propriétés physiques du sol et l'enracinement du maïs.....	28
3. Discussions et perspectives.....	30
3.1 Par rapport aux paramètres physiques du sol sous différents degrés de mecanisation....	30
3.2 Par rapport au développement racinaire du maïs.....	32
3.3 Suggestions et perspectives.....	34
Conclusion.....	37
Références bibliographiques.....	38
Liste des annexes.....	I
Table des matières.....	VIII

## LISTE DES ILLUSTRATIONS

### Liste des tableaux

Tableau 1 : Opérations culturales et précédents culturaux .....	13
Tableau 2 : Texture du sol .....	20
Tableau 3 : Etat structural et indice de battance du sol .....	21
Tableau 4 : Comparaison des moyennes des temps d'infiltration, profondeurs humectées et diamètres des taches d'humectation.....	23
Tableau 5 : Capacité d'infiltration moyenne et finale corrigée, coefficient de correction et la forme de la tache d'humectation.....	24
Tableau 6 : Comparaison de la profondeur maximale et la largeur d'enracinement, l'horizon difficile à traverser par les racines et la direction des grosses racines.....	25
Tableau 7 : Comparaison de la surface de concentration des racines, la profondeur d'apparition et la forme d'enracinement.....	25
Tableau 8 : Evolution du nombre de racines en fonction des profondeurs et des traitements ...	27
Tableau 9 : Synthèse des effets du degré de mécanisation sur le sol et l'enracinement du maïs...	28

### Liste des figures

Figure 1. Courbe ombrothermique «Gaussen-Bagnouls» pour Antsirabe I de 2001 à 2015.....	7
Figure 2. Dispositif expérimental .....	13
Figure 3. Densité apparente du sol.....	21
Figure 4. Porosité totale du sol.....	21
Figure 5. Temps d'infiltration du sol à sec.....	22
Figure 6. Temps d'infiltration du sol après humectation.....	22
Figure 7. Résistance à la pénétration du sol suivant différents degrés de mécanisation.....	24
Figure 8. Distribution du nombre de racines par traitement suivant la profondeur .....	26
Figure 9. Relation entre la densité du sol et le nombre de racines du maïs.....	27

### Liste des cartes

Carte 1. Situation géographique du site et répartition administrative de la zone d'étude .....	6
Carte 2. Types de sol et réseau hydrographique d'Antsirabe I.....	9

### Liste des photos

Photo 1. Dispositif de mesure d'infiltration du sol.....	16
Photo 2. Pénétrömètre de poche .....	16
Photo 3. Evaluation de la densité racinaire.....	17

## **LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS**

AT2D : Agriculture Tropicale et Développement Durable

CFAMA : Centre de Formation et d'Application du Machinisme Agricole

ESSA : Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques

FAO : Food and Agriculture Organization

FSA : Faculté des Sciences Agronomiques

FTM : Foiben-Taosarintanin'i Madagasikara (Institut Géographique et Hydrographique de Madagascar)

INSTAT : Institut National de la Statistique

LRI : Laboratoire des RadioIsotopes

MPAE : Ministère auprès de la Présidence chargé de l'Agriculture et de l'Elevage

PAFROID : Partenariat interuniversitaire entre l'AFRIQUE et l'Océan Indien pour le Développement

UAC : Université d'Abomey-Calavi



## RESUME

Le travail mécanique du sol induit des impacts sur le sol et le développement des plantes. Afin d'analyser les effets du labour des sols argilo-limoneux sur l'enracinement du maïs, quatre degrés de mécanisation du travail du sol ont été testés. Il s'agit du labour manuel avec angady, le labour avec la traction animale, le labour avec le motoculteur et le labour avec le tracteur ; avec le non labour comme traitement témoin. L'objectif est d'évaluer l'effet de la variation du degré de mécanisation du labour sur les propriétés physiques du sol et l'enracinement du maïs. Les paramètres mesurés sont la teneur en matériaux, la stabilité structurale, la densité, la porosité, l'infiltration, la pénétrométrie, la densité racinaire, les enracinements vertical et latéral. Il a été montré que le labour manuel avec angady modifie le moins la proportion des matériaux et la structure du sol et réduit sous peu la porosité et l'infiltration sans pratiquement influencer le développement racinaire du maïs. Le labour avec la traction animale tout comme le labour avec le motoculteur remanient le sol, augmentent la densité du sol et réduisent la porosité et la résistance du sol à l'enfoncement. L'enracinement du maïs est positivement affecté. Le labour et le pulvérisage avec le tracteur a induit une amélioration de la teneur en matériaux et une densification du sol accompagnées d'une réduction de sa porosité, de sa vitesse d'infiltration et sa résistance. Ce qui a favorisé la profondeur d'enracinement et la distribution des racines sans cependant influencer le nombre de racines.

**Mots clés :** labour, sol argilo-limoneux, enracinement, maïs.

## ABSTRACT

The mechanical ploughing induces impacts on the soil and the development of plants. To analyze the effects of tillage of clay-loam soil on maize root development, four levels of tillage mechanization were tested. It is the manual ploughing with angady, the ploughing with the animal traction, the ploughing with the cultivator and the ploughing with the tractor ; with no tillage as a check treatment. The objective is to assess the effect of the degree variation of tillage on the physical properties of the soil and the root development of maize. The measured parameters are material contents, structural stability, density, porosity, infiltration, soil resistance, root density, vertical and lateral roots developments. It was shown that the manual ploughing with angady modifies less the material contents and the structure of the soil and reduces porosity and the infiltration without practically influencing the root development of maize. The ploughing with the animal traction as well as the ploughing with the cultivator improve the soil, increase soil density and reduce porosity and resistance of soil. Root development of maize is positively affected. The ploughing and the use of disc harrow with the tractor induced an improvement of material contents and densification of the soil with reduced porosity, infiltration rate and resistance. That supported the roots depth and distribution without however influencing the number of roots.

**Keywords :** ploughing, clay-loam soil, root development, maize.



**INTRODUCTION**

## INTRODUCTION

En Afrique, une grande partie de l'énergie agricole est encore manuelle (Lhoste *et al.*, 2010). Or, dans les pays où la terre ne fait pas défaut, une mécanisation basée uniquement sur l'énergie humaine, constitue un sérieux handicap à l'extension des terres cultivées. De ce fait, le recours à d'autres types d'énergies telles que la traction animale ou l'énergie mécanique, quand c'est possible, présente le plus souvent l'une des solutions envisagées (Houmy, 2008). Ainsi, il existe une grande marge de progrès pour l'utilisation de l'énergie animale ou motorisée. Cela place aussi la recherche et le développement face à des enjeux forts et renouvelés, compte tenu du contexte économique mondial en mutation. En réalité, le faible niveau de mécanisation dans l'agriculture africaine continue d'entraver largement les progrès de la production surtout de céréales, ce qui entraîne les coûts de production unitaire de ces cultures à la hausse (Macauley et Ramadjita, 2015). Cette faible production serait aussi due aux caractéristiques agroclimatiques de certaines régions du continent. Ainsi, du fait que les conditions pédoclimatiques surtout des zones arides et semi-arides rendent très difficiles la croissance des plantes annuelles (Nicou *et al.*, 1993), il est nécessaire de passer à des outils agricoles qui travaillent le mieux le sol. En effet, la profondeur d'enracinement et le volume de sol prospecté par une culture peuvent différer fortement en fonction des caractères permanents du milieu (Nicoulaud *et al.*, 1994). L'une des méthodes pour parvenir à améliorer ces propriétés physiques des terres est de recourir au travail du sol sous toutes ses formes.

Cependant, plusieurs recherches sur le travail du sol ont montré des opinions très divergentes en ce qui concerne ses effets sur les propriétés physiques du sol. Pour certains, le travail du sol et spécialement le labour, est une pratique ancestrale dont l'un des buts premiers est de créer un environnement favorable à la germination des graines et au développement des racines (Köller, 2003). A l'opposé, d'autres considèrent que ces effets ne sont pas assez importants et réguliers pour garantir les charges que cette technique entraîne chez les paysans. Pour eux, ce sont plutôt les sols labourés qui sont les plus exposés à l'érosion hydrique du fait de leur faible teneur en matière organique qui augmente la sensibilité des agrégats vis-à-vis de l'action des agents érosifs (Masciandaro *et al.*, 1998 ; Gomez *et al.*, 1999), et à l'accélération de la combustion de la matière organique. A cet effet, le non travail ou le travail minimum du sol devient une alternative (Abdellaoui *et al.*, 2011).

Ainsi, de nombreuses références techniques et scientifiques sur la question de l'impact du labour et du mode de travail du sol sur la qualité du sol sont disponibles. Toutefois, très peu d'auteurs ont abordé la question de variabilités de ces impacts suivant l'intensité de mécanisation du travail du sol. Pour cela, vu aussi le contexte actuel où les pratiques culturales durables gagnent en popularité, il s'avère nécessaire d'évaluer les impacts des différents degrés de travail du sol, du manuel au motorisé, sur les propriétés du sol afin de spécifier la contribution de chaque degré de mécanisation sur l'amélioration ou la destruction du sol. Dans

ce sens, une question se pose : ‘‘la variation du degré de mécanisation du travail du sol engendre-t-elle différents effets sur les propriétés physiques du sol et l’enracinement des cultures, entre autres le maïs?’’

L’objectif général de cette étude est d’évaluer les modifications qu’apporte chaque degré de mécanisation du travail du sol sur les paramètres physiques du sol et le développement racinaire du maïs.

De façon spécifique, il s’agit de :

- ☞ apprécier l’influence du degré de mécanisation sur la texture, la stabilité structurale et le comportement hydrique du sol ;
- ☞ analyser le développement racinaire du maïs en fonction du degré de mécanisation.

Deux hypothèses ont été formulées :

H1 : la modification de la texture, de la stabilité structurale et du comportement hydrique du sol varie d’un degré de mécanisation à un autre ;

H2 : les degrés de mécanisation affectent différemment le développement racinaire du maïs.

Le mémoire s’articule autour de trois chapitres :

- le premier chapitre présente le matériel et détaille les méthodes utilisées pour atteindre les résultats ;
- le deuxième chapitre ressort les principaux résultats obtenus ;
- le troisième chapitre analyse et discute les résultats, et propose des perspectives.



**CHAPITRE 1 :**  
**MATERIEL ET METHODES**

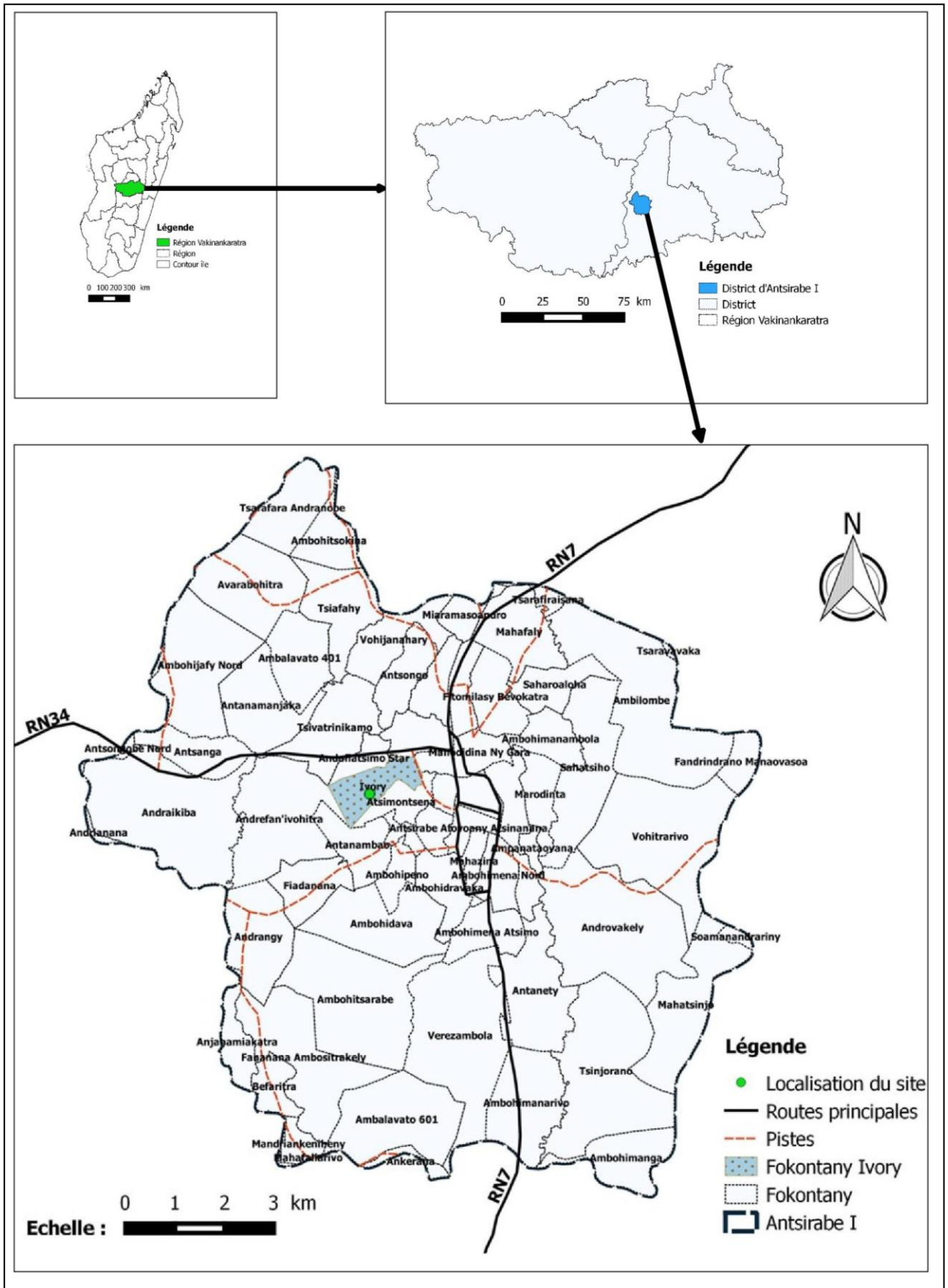
## 1. MATERIEL ET METHODES

### 1.1 Matériel

#### 1.1.1 Milieu d'étude

##### 1.1.1.1 Situation géographique

L'expérimentation a été effectuée dans le District d'Antsirabe I, Chef-lieu de la Région de Vakinankaratra. D'une superficie de 120,545 km<sup>2</sup>, le District d'Antsirabe I est limité de part et d'autre par le District d'Antsirabe II. Ce District compte 71 Quartiers (Fokontany) dont le Quartier d'Ivory dans lequel se situe le Centre de Formation et d'Application du Machinisme Agricole (CFAMA), notre structure d'accueil et lieu d'installation du dispositif expérimental (Annexe 1). Antsirabe a été choisi pour accueillir cette expérimentation car elle fait partie des grandes zones productrices de maïs sur l'Île, et le CFAMA du fait de son expérience en mécanisation et la disponibilité des machines et équipements agricoles pour la réalisation des travaux. Le dispositif expérimental est localisé entre 47°01'2,072'' et 47°01'3,627'' de longitude est, et entre 19°52'14,27'' et 19°52'15,614'' de latitude sud avec une altitude moyenne de 1499 m. La carte 1 présente la localisation géographique du dispositif et la répartition administrative de la zone d'étude.

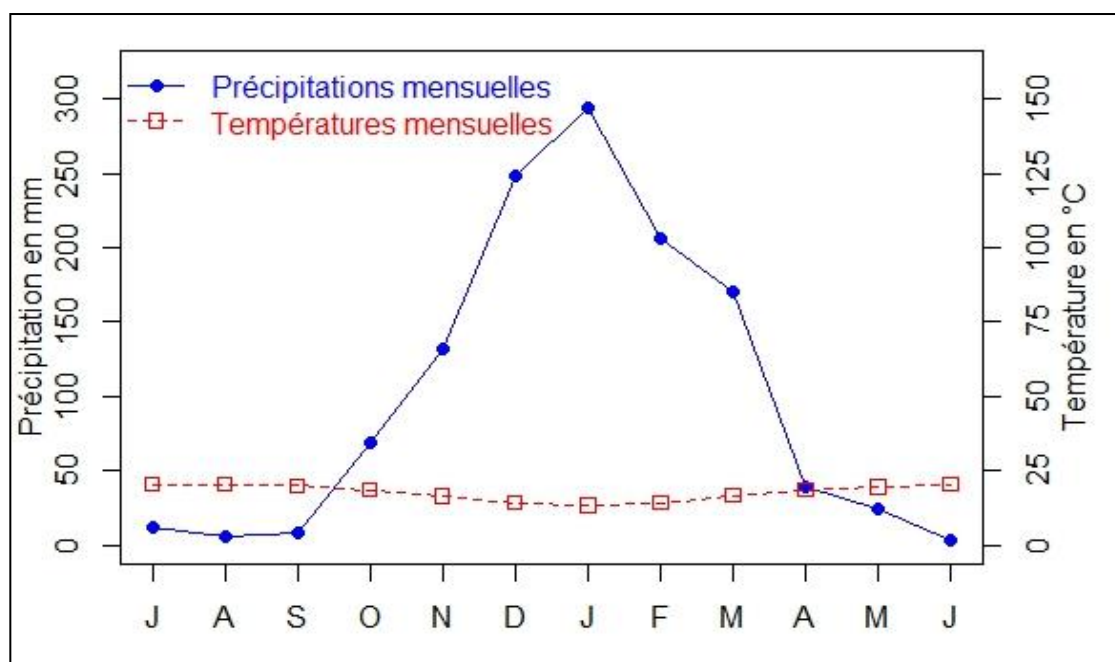


Source : Données de l'Institut Géographique et Hydrographique de Madagascar (BD 200 FTM)

Carte 1. Situation géographique du site et répartition administrative de la zone d'étude

### 1.1.1.2 Conditions climatiques

Contrairement à la majeure partie de la Région de Vakinankaratra caractérisée par un climat tropical d'altitude, le District d'Antsirabe I bénéficie d'un climat tropical tempéré (PADR, 2007). Ce climat se caractérise par l'alternance de deux saisons : une saison pluvieuse moyennement chaude de novembre à avril et une saison sèche relativement froide de mai à octobre. La pluviosité annuelle varie de 1200 à 2000 mm. Les précipitations avec des grêles sont fréquentes pendant l'été, en particulier autour du massif de l'Ankaratra. La région est rarement touchée par des cyclones, mais, l'abondance des pluies pendant leur passage peut provoquer des inondations dans les parties basses et de l'érosion sur les parties plus hautes des bassins versants (MAEP, 2003). La température moyenne annuelle est inférieure ou égale à 20° C et diminue de 0,6°C tous les 100 m sous l'effet de l'altitude (Raboin *et al.*, 2013). La figure 1 représente la courbe ombrothermique de la zone.



Source : Données de la Direction Générale de la Météorologie Madagascar (2016)

**Figure 1. Courbe ombrothermique «Gausse-Bagnouls» pour Antsirabe I de 2001 à 2015**

### 1.1.1.3 Morphopédologie et réseau hydrographique

Antsirabe I est une zone de moyenne altitude : 1200 à 1600 m (Sourisseau *et al.*, 2016). Il se situe sur le versant oriental de la chaîne de montagnes de l'Ankaratra. La quasi-totalité de la Région est marquée par la présence de deux types de sol :

- les sols ferralitiques couvrant une grande partie de sa superficie. Ils sont d'évolutions très diverses, pouvant porter du maïs, du manioc, et peuvent se prêter à la culture de pommes de terre et à l'arboriculture. D'après Raunet (2009), ces sols possèdent encore leur partie argileuse colorée, contrairement à la plupart des reliefs similaires. Cette partie argileuse est constituée de kaolinite, minéral argileux des régions tropicales humides et équatoriales à faible

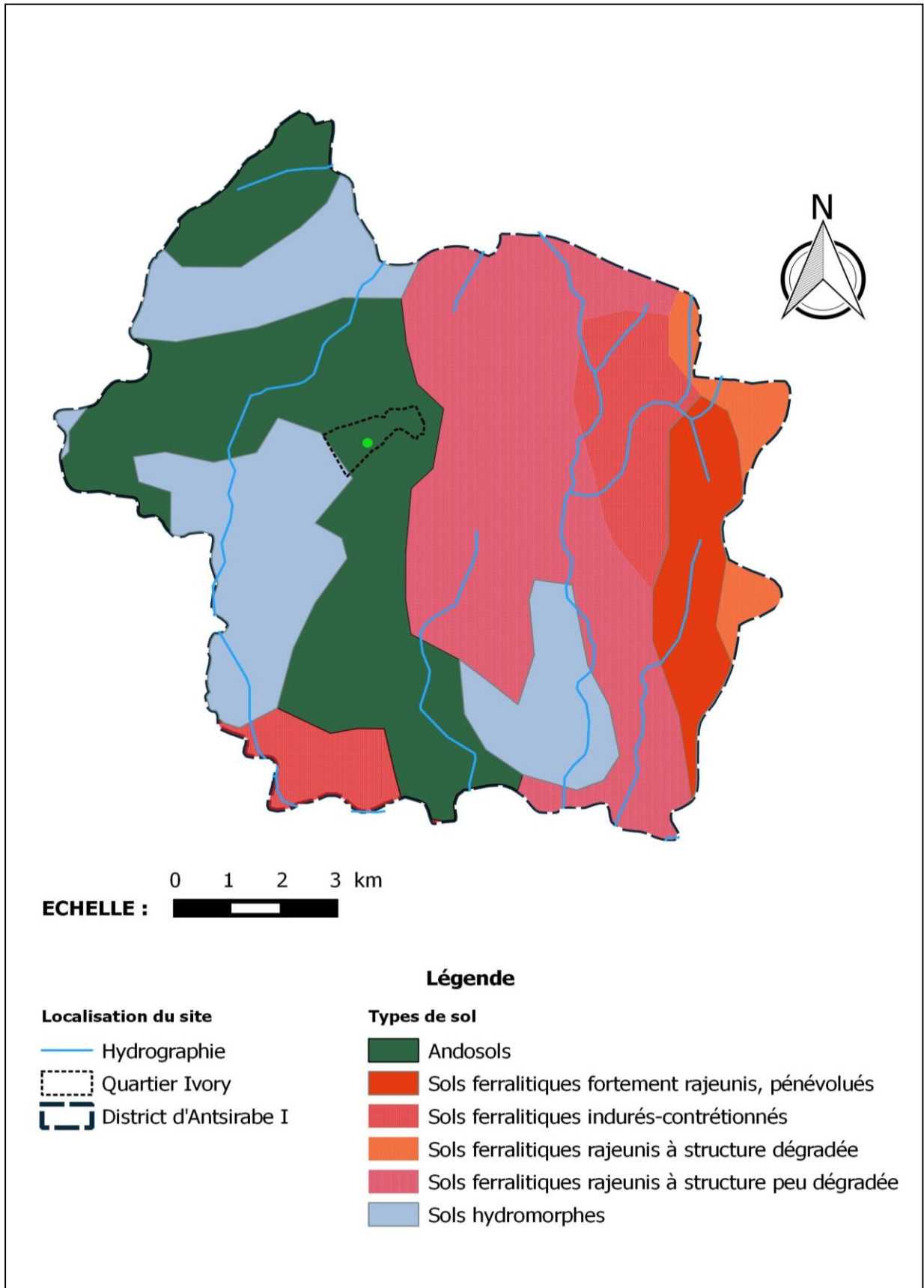


CEC (capacité d'échange cationique). Elle confère au sol des propriétés physiques, et souvent organiques en surface, meilleures que celles des sols tronqués de cette partie argileuse.

- les sols alluvionnaires, constituant les bas-fonds portent en plus du riz, des cultures de contre saison.

La carte 2 présente les types de sol et le réseau hydrographique rencontrés dans le District d'Antsirabe I. D'après cette carte, le dispositif expérimental est installé sur un andosol suivant la Base de référence mondiale pour les ressources en sols (FAO *et al.*, 1999). Ce qui correspond à la classe des andosols de la classification française (CPCS, 1967) et au sous-ordre des andepts de l'ordre des inceptisols suivant la classification pédologique américaine (Wambeke *et al.*, 1986 ; FAO et Unesco, 1975).

De nombreux cours d'eau baignent la zone et constituent les principales sources d'approvisionnement en eau pour l'irrigation des cultures surtout en contre-saison.



Source : Unité géomorphologique de Madagascar, Delenne et al, ORSTOM, 1981

**Carte 2. Types de sol et réseau hydrographique d'Antsirabe I**

#### 1.1.1.4 Aspects humain et économique

D'une densité variant de 301 à 2000 habitants/km<sup>2</sup>, Antsirabe I passe de 11 à 13% de la population totale de la Région entre 1993 et 2013 (Sourisseau *et al.*, 2016). Globalement en 2010, le taux d'activité était de 70,9% dans le Vakinankaratra contre 63,7 % au niveau national (INSTAT, 2011). Avec l'agriculture comme activité dominante, la Région de Vakinankaratra possède une population plus instruite par rapport au niveau national mais qui s'arrête surtout à l'école primaire. A Antsirabe, les ménages suivis par le Réseau des Observatoires Ruraux ont, en moyenne, un niveau d'autosuffisance alimentaire relativement faible et achètent les aliments de base pendant 5 à 7 mois dans l'année. Le riz reste la culture dominante comme dans beaucoup d'autres régions.

#### 1.1.2 Matériel utilisé

##### 1.1.2.1 Matériel végétal

La culture de maïs a été choisie pour l'expérimentation parce qu'elle occupe une place importante dans l'alimentation des populations du Sud de Madagascar, dans l'alimentation animale et dans l'industrie (brasserie,...). La variété de maïs cultivée est la variété locale appelée Tombontsoa en langue malgache. Elle est précoce avec un cycle végétatif de moins de 90 jours et donne un bon rendement fourrager. En plus de sa tolérance au stress hydrique et aux viroses, cette variété est résistante à la verse et apparaît comme la variété la plus performante comparée aux variétés Irat 200 et Cirad 412 (CPSA, 2016).

##### 1.1.2.2 Matériel de labour

- ☞ Le labour manuel a été réalisé avec une bêche (angady\*) fabriquée localement.
- ☞ Une paire de bœufs a servi pour le labour à la traction animale. L'outil utilisé est une charrue à soc de 12 pouces, fabriquée au CFAMA.
- ☞ Un motoculteur de 11,5 chevaux-vapeurs (CV), de marque YANMAR, muni d'une charrue réversible de 12 pouces a permis d'accomplir le labour en petite motorisation.
- ☞ Le labour avec le tracteur a été réalisé grâce à un tracteur de 80 CV à 4 roues motrices, de marque JX80 CASE-HI, auquel est attelée une charrue à soc réversible à deux corps par rangée avec un coutre de 20 pouces chacune.
- ☞ Le pulvérisage a été exécuté avec un pulvérisateur tandem à 4 trains dont 2 trains constitués de disques crénelés en avant et 2 autres de disques lisses en arrière ; chaque train comportant 5 disques de 18 pouces de diamètre externe.

##### 1.1.2.3 Autres matériels

- ✓ Sur le terrain, les cylindres de 10 cm de diamètre et 10 cm de hauteur ont servi au prélèvement des échantillons de sol à l'aide de marteau et de couteau.

---

\*Angady : outil de travail manuel du sol, semblable à une bêche mais dont l'effort physique est exercé avec les bras.

- ✓ Un mètre et un décimètre ont été utilisés pour mesurer les différentes distances et profondeurs.
- ✓ Au laboratoire, la résistance du sol à la pénétration a été réalisée par le biais d'un pénétromètre de poche.
- ✓ Une balance de précision a permis les mesures de masse et une étuve a servi au séchage des sols.
- ✓ La granulométrie a été obtenue grâce à des tamis calibrés.
- ✓ Une grille a servi au positionnement des impacts racinaires.
- ✓ Les diamètres des racines de maïs ont été mesurés à l'aide d'un pied à coulisse.

### 1.1.3 Notion de degré de mécanisation, travail du sol et importance du système racinaire

#### 1.1.3.1 Différents degrés de mécanisation

La mécanisation agricole est un terme plus large qui englobe tout le matériel agricole utilisant les différentes formes d'énergie. En se basant sur les formes d'énergie, on distingue : la mécanisation manuelle, la mécanisation animale et la mécanisation motorisée.

➤ Mécanisation manuelle : elle concerne les outils manuels utilisés pour le travail du sol et leur mode opératoire. Elle correspond à l'utilisation de la force musculaire de l'homme moyennant des outils très simples (Houmy, 2008). A ces types d'outils manuels dits rudimentaires s'ajoute la source d'énergie (effort humain) qui ne permet pas d'emblaver de grandes étendues de terre (Tapsoba *et al.*, 2013). Ce degré de mécanisation implique différents types d'outils tels que la houe, la daba\*, l'angady, fabriqués par les artisans locaux.

➤ Traction animale : elle se rapporte à la sollicitation de l'énergie animale pour exécuter les travaux agricoles. Il peut s'agir de l'utilisation d'un seul animal (monotraction) ou d'une paire d'animaux, et même plus (jusqu'à trois paires d'animaux). On considère classiquement, d'après la FAO, que plus de 400 millions d'animaux (bovinés, équidés, camélidés, etc.) participent à cette fourniture d'énergie dans l'agriculture, à travers le travail du sol et les transports (Lhoste *et al.*, 2010). Le travail effectué par la traction animale peut être de 5 à 20 fois plus élevé qu'avec l'outillage manuel, surtout pour le labour.

➤ Traction motorisée : elle représente le niveau de mécanisation le plus élevé. Il s'agit de machines dont les principales sources d'énergie sont des moteurs à combustion thermique, électrique et parfois d'autres sources d'énergie telles que les énergies renouvelables (Gifford, 1993). Avec le développement technologique qu'ont connu les autres secteurs, la mécanisation a pris de nouvelles formes encore plus sophistiquées telles que la robotisation, l'agriculture de précision (Tapsoba *et al.*, 2013 ; Houmy, 2008).

---

\*Daba : outil de travail manuel (billonnage, décompactage) du sol, de forme variable suivant les régions d'Afrique.

### 1.1.3.2 Travail du sol

Le labour est un travail du sol qui consiste à découper une bande de terre, la retourner et enfouir en profondeur la partie superficielle du sol. A travers l'amélioration de la structure du sol et la disparition des fentes de retrait, le labour a un impact direct sur l'hydrologie du sol (Jenhaoui et Raclot, 2011). Ainsi, dans les sols dont les caractéristiques physiques naturelles sont plutôt défavorables, et par rapport aux pratiques traditionnelles des paysans, un travail du sol permet principalement d'accroître la porosité du sol, de réduire sa résistance à la pénétration et d'enfouir les mauvaises herbes, et donc limiter la concurrence de celles-ci pour l'eau. Cependant, le labour, malgré ces avantages, crée l'affinement excessif de la terre puis la compaction (Roisin, 2006). De plus, le labour influe négativement sur la biologie du sol en diminuant par exemple le nombre de vers de terre (Soltner, 2002 cité par Andriamanantena, 2006).

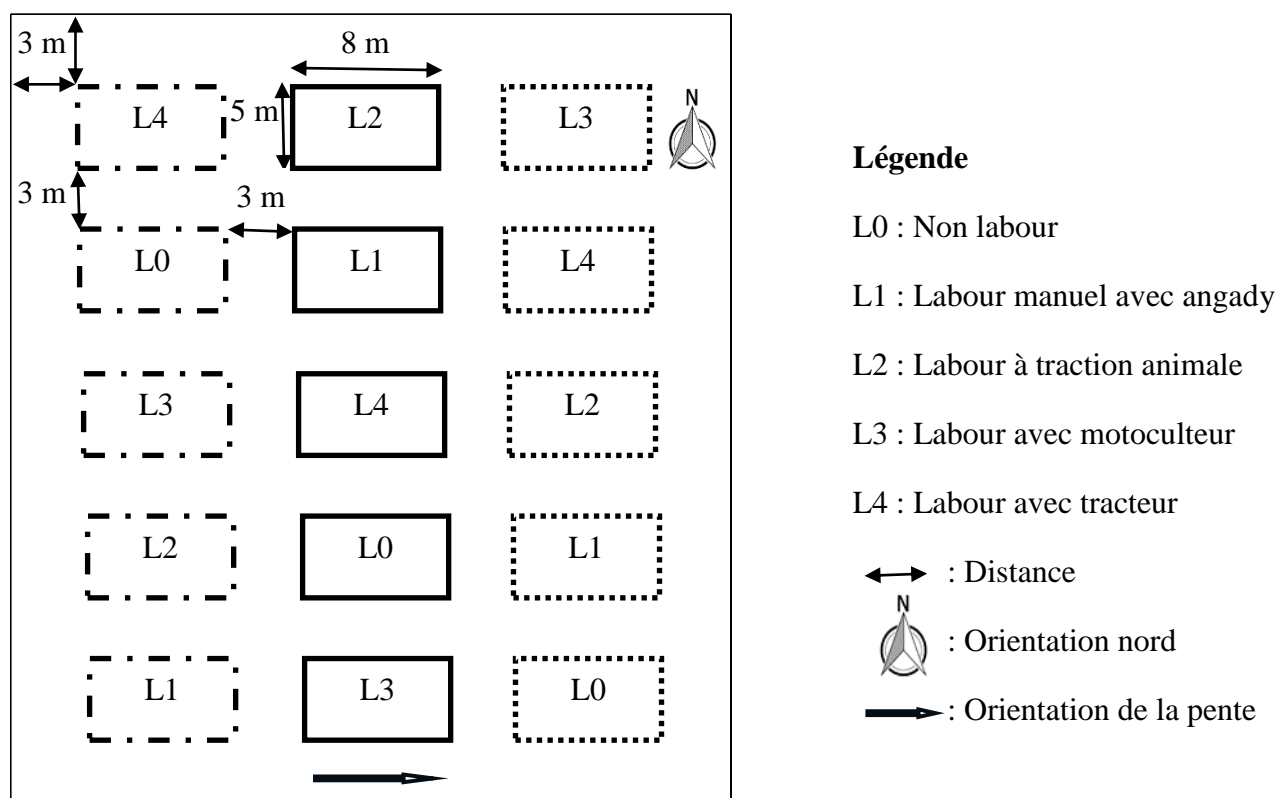
### 1.1.3.3 Intérêts de la connaissance du système racinaire

Deux rôles sont généralement reconnus aux racines d'un végétal : d'une part, vis-à-vis de l'ensemble de la plante, elles ont la fonction d'ancrage, celles d'absorption et de transport de l'eau et des éléments minéraux vers les parties aériennes, enfin celle d'organes de réserve éventuellement. D'autre part, leur développement intervient dans l'évolution des propriétés du sol et plus particulièrement de sa structure et de sa teneur en matière organique (Deffontaine, 1964). Il s'avère nécessaire d'étudier le comportement racinaire des plantes afin de compléter les informations relatives à la partie aérienne de ces végétaux pour mieux cerner leur fonctionnement. L'évaluation du système racinaire est donc un élément clé de diagnostic cultural à la fois pour évaluer la qualité agronomique d'un état du sol. Ce qui permet d'expliquer ou de pronostiquer le comportement d'une plante face aux différentes interventions de labour (Chopart, 1999), vu qu'il existe parfois la corrélation positive entre le développement racinaire d'une culture et son rendement (Zoelinirina, 2007).

## 1.2 Méthodes

### 1.2.1 Présentation du dispositif expérimental

Il s'agit d'un dispositif en bloc aléatoire complet. Le facteur étudié est le degré de mécanisation du travail du sol avec 4 traitements, en plus du non labour comme traitement témoin. Ces traitements ont été réalisés chacun avec 3 répétitions. Le terrain d'une superficie de 1548 m<sup>2</sup> a été divisé en 3 blocs perpendiculairement à la pente moyenne (2,75 % de l'ouest à l'est). Chaque bloc a été fractionné en 5 parcelles. La dimension de la parcelle élémentaire est de 5 m de largeur et 8 m de longueur. Un couloir de 3 m entoure chacune des parcelles élémentaires. Au total, 15 parcelles élémentaires de 40 m<sup>2</sup> chacune (figure 2).



**Figure 2. Dispositif expérimental**

Le tableau 1 englobe les différentes opérations culturales reçues par les parcelles lors de l'expérimentation et les précédents culturaux du terrain.

**Tableau 1 : Opérations culturales et précédents culturaux**

	Labour	Emottage	Semis, fertilisation, arrosage et désherbage	Précédents culturaux	
				Labour	Culture
<b>L0</b>	Non	Non	Manuel	Mécanique	Haricot et soja
<b>L1</b>	Oui	Oui	Manuel	Mécanique	Haricot et soja
<b>L2</b>	Oui	Non	Manuel	Mécanique	Haricot et soja
<b>L3</b>	Oui	Non	Manuel	Mécanique	Haricot et soja
<b>L4</b>	Oui	Oui	Manuel	Mécanique	Haricot et soja

Le labour avec la traction animale et le motoculteur a conduit à de mottes de tailles moyennes, favorables au semis. De grosses mottes ont été obtenues après le labour avec le tracteur, ce qui a obligé à faire recours au pulvérisateur pour affiner les parcelles concernées.

La seule variété de maïs local a été semée avec un écartement de 80 cm x 50 cm. Deux graines ont été semées par poquet avec un apport de 5 t/ha du fumier de bovin et de 50 kg/ha d'engrais NPK (11-22-16) au semis comme fumure de fond. Le démariage des plantules a été effectué 10 jours après la germination afin d'avoir une seule plantule par poquet. Toutes les parcelles ont été labourées le même jour (16/09/2016) puis semées 15 jours plus tard (30/09/2016). Deux (02) désherbages ont été réalisés et deux fertilisations avec l'urée ont été faites 17 jours et 37

jours après la levée à la dose totale de 100 kg/ha. Les cultures sont irriguées à une dose de 50 mm/jour avec de l'arrosoir manuel. La dose d'irrigation est fractionnée en deux parties à raison de 25 mm le matin et 25 mm le soir pendant 5 jours sur 7 dans la semaine, ceci durant 25 jours avant l'arrivée des pluies. Cette dose s'apparente au besoin en eau du maïs en période sèche et est largement suffisante. (Fiche technique à l'annexe 2).

## 1.2.2 Mesure des paramètres physiques du sol

### 1.2.2.1 Texture

La texture d'un sol est la répartition des particules minérales de la terre fine en fonction de leur taille. Il s'agit des proportions relatives (%) des particules sableuses, limoneuses et argileuses suivant l'horizon du sol ; de même que les particules grossières : graviers, cailloux, ... En plus d'une appréciation sur le terrain, la teneur en matériaux sur différentes profondeurs a été déduite à partir d'une analyse granulométrique effectuée au Laboratoire du sol de l'ESSA et au Laboratoire des RadioIsotopes (LRI) de l'Université d'Antananarivo.

### 1.2.2.2 Structure

La structure d'un sol désigne le mode d'assemblage de ses constituants, ainsi que la nature et l'intensité des liaisons qui existent entre eux. Elle varie au fil du temps, du fait de conditions climatiques changeantes (alternance de périodes sèches et de précipitations), de l'activité biologique, de la végétation grâce à l'activité du système racinaire, de l'apport de matière organique, mais aussi du travail du sol réalisé par l'agriculteur, de la circulation par celui-ci sur la parcelle ou du piétinement du sol par le bétail. Dans cette étude, elle a été évaluée par la méthode de profil cultural (Gautronneau et Manichon, 1987).

### 1.2.2.3 Stabilité structurale

C'est un indicateur de la cohésion des agrégats d'un sol. Ce paramètre exprime la capacité des agrégats d'un sol à résister à une dégradation. Elle est évaluée grâce à l'indice de battance ( $I_b$ ) suivant la formule de Rémy et Marin-Laflèche en 1974.

$$I_b = \frac{\left(1,5 \times \% \text{ limons fins} \right) + \left(0,75 \times \% \text{ limons grossiers} \right)}{\% \text{ argile} + \left(10 \times \% \text{ matière organique} \right)} - \left(0,2 \times (pH - 7)\right) ; \text{ si } pH > 7$$

$$I_b = \frac{\left(1,5 \times \% \text{ limons fins} \right) + \left(0,75 \times \% \text{ limons grossiers} \right)}{\% \text{ argile} + \left(10 \times \% \text{ matière organique} \right)} ; \text{ si } pH < 7$$

#### 1.2.2.4 Densité

Les paramètres relatifs à la densité du sol ont été mesurés au Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment (LNTPB) d'Antananarivo.

- Densité apparente

Elle s'obtient à partir d'un échantillon non remanié de sol prélevé à l'aide d'un cylindre de volume connu. Le poids de l'échantillon séché à 105°C pendant 48h à l'étuve, rapporté au volume de l'échantillon de départ donne sa densité apparente.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} ; \text{ avec :}$$

$\gamma_d$  : densité apparente ;  $W_s$  : poids des particules solides et  $V$  : volume total (apparent) du sol.

- Densité réelle

La densité réelle représente la masse volumique de la matière solide du sol, pores exclus. Sa détermination est faite à l'aide d'un pycnomètre. Une masse de sol sec est introduite dans le pycnomètre contenant de l'eau distillée. Après avoir éliminé toutes les bulles d'air, on mesure le volume d'eau déplacé par les grains solides.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \text{ avec :}$$

$\gamma_s$  : densité réelle et  $V_s$  : volume des particules solides du sol.

#### 1.2.2.5 Porosité

La porosité indique la capacité de l'eau à pénétrer le sol et renseigne sur la structure du sol. La porosité totale se calcule de manière suivante :

$$P [\%] = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s} \times 100 \text{ avec } P : \text{porosité totale}$$

#### 1.2.2.6 Vitesse et profondeur d'infiltration de l'eau

Le test du monocylindre de Roose *et al.* (1993) a été utilisé pour mesurer la capacité d'infiltration des différentes parcelles. La méthode de mesure complète est décrite à l'annexe 3.

$$\text{Coefficient de correction} = \frac{[\text{Rayon de la tache}]^2}{[\text{Rayon du cylindre}]^2}$$

$$\text{Infiltration finale corrigée} = \text{Infiltration moyenne finale} \times \text{Coefficient de correction}$$

La photo 1 montre le dispositif adopté avec un cylindre en polypropylène de 9,4 cm de diamètre et de 12 cm de hauteur.





**Photo 1. Dispositif de mesure d'infiltration du sol**

#### 1.2.2.7 Pénétrométrie

La pénétrométrie est la mesure de la résistance qu'oppose le sol à l'enfoncement d'un outil normalisé. Cette résistance du sol à la pénétration a été évaluée à partir d'un pénétromètre de poche. La tige du pénétromètre est enfoncée dans le sol sur différentes profondeurs en exerçant une pression constante, suivie de la lecture de la valeur indiquée sur la graduation.



**Photo 2. Pénétromètre de poche**

#### 1.2.3 Evaluation sur les cultures

##### 1.2.3.1 Méthodes d'étude des racines

Généralement, trois grandes méthodes sont utilisées pour l'étude des systèmes racinaires des plantes cultivées en pleine terre. Il s'agit du profil cultural, du profil racinaire et de la méthode des sondages. Si le profil cultural permettant de voir le développement des racines en fonction de la nature du sol, la méthode du profil racinaire donne une image de ce développement sur laquelle il est possible de faire des observations et des mesures précises. La méthode des sondages quant à elle permet de définir des gradients de développement. Ces trois méthodes

---

sont complémentaires. Toutefois, la précision souhaitée dans les informations peut varier suivant le but à atteindre.

Dans le cadre de cette étude, c'est la méthode du profil cultural qui a été utilisée. Le but est de mettre en évidence les caractéristiques des diverses couches constituant le terrain, d'examiner la façon dont elles sont exploitées par les racines et d'évaluer dans la mesure du possible les causes de leur différenciation (Chopart, 1999). Pour ce dernier, cette méthode permet un diagnostic rapide de l'état du sol et des effets d'une intervention culturale mais ne produit pas de données quantitatives pour comparer des situations dans l'espace et dans le temps. Cependant, Deffontaine (1964) avait déjà indiqué que quelques données chiffrées peuvent être obtenues par cette méthode : profondeur de la première racine rencontrée, de la dernière racine d'un diamètre donné rencontrée, nombre d'intersections de racines avec des segments virtuels horizontaux à certaines profondeurs. Dans notre cas, cette méthode a été choisie parce qu'elle permet une bonne observation du volume de terre exploité par les racines et du mode d'exploitation de ce volume en fonction notamment des techniques culturales. De plus, elle est facile à utiliser avec peu de moyens.

#### 1.2.3.2 Méthode de profil cultural

Une fosse de 150 cm x 60 cm a été creusée perpendiculairement au sens du labour et aux lignes de semis pour chaque traitement, avec une paroi verticale située à 10 cm des pieds des maïs. Ce qui permet d'explorer les racines de 2 pieds de maïs de chaque côté, soit au total 4 pieds de maïs par fosse. Une grille de 100 cm x 50 cm quadrillée tous les 2 cm a été placée sur le profil. Ensuite, les impacts racinaires ont été positionnés et comptés, de même que les diamètres des racines furent mesurés dans chaque carré de la grille.



**Photo 3. Evaluation de la densité racinaire**

#### 1.2.4 Analyses statistiques des données

Sur les données recueillies, il a été procédé à une analyse de variances (ANOVA). Le test de Newman et Keuls a été utilisé pour la comparaison multiple des moyennes. Ces analyses

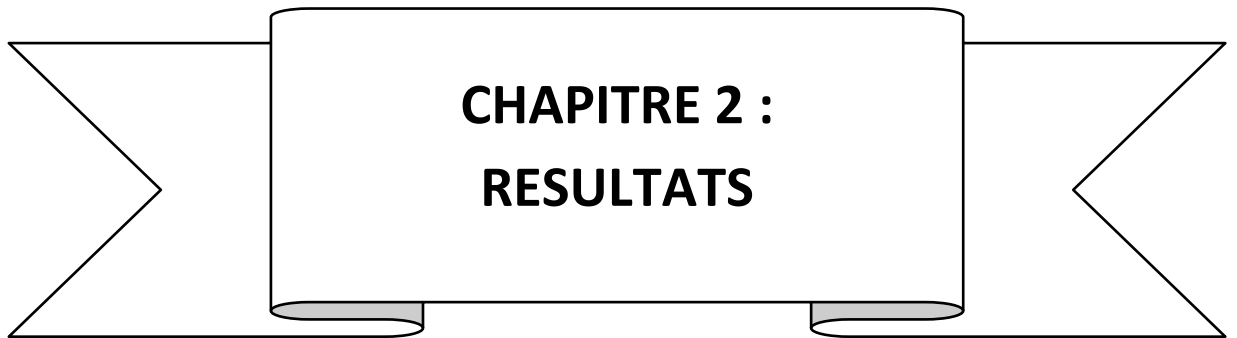
---

statistiques ont été effectuées au moyen du logiciel R. Les différences sont considérées comme significatives à 95 % de niveau de confiance ( $p < 0,05$ ).

#### 1.2.5 Limites du travail

\* L'expérimentation a démarré en fin de la période sèche avec cependant une persistance du froid. Ce qui a nécessité l'arrosage pendant le premier mois. Ces situations pourraient avoir des conséquences sur la croissance de la culture.

\* La parcelle fût labourée l'année précédente avec le tracteur et semée avec le haricot et le soja. Cela pourrait laisser des effets résiduels et donc influencer nos résultats.



**CHAPITRE 2 :  
RESULTATS**

## 2. RESULTATS

Sur toutes les parcelles, l'état initial du sol, le précédent cultural, l'apport en éléments fertilisants (fumier, NPK et urée), la variété de maïs, la méthode de semis, la dose d'irrigation ainsi que l'entretien des cultures sont identiques.

### 2.1 Effets du degré de mécanisation sur les paramètres physiques du sol

#### 2.1.1 Teneur en matériaux du sol

Afin de comparer les variations en teneur des matériaux entre les couches du sol engendrées par les différents labours, les prélèvements ont été effectués proportionnellement à la profondeur de labour. Le tableau 2 présente les résultats de l'analyse granulométrique du sol initial et des sols des différentes parcelles sur l'horizon labouré.

**Tableau 2 : Texture du sol**

	Profondeur (cm)	Sable (%)	Argile (%)	Limons (%)	Texture	
<b>Granulométrie du sol initial</b>	0-10	7,55	48,65	42,53	Argilo-limoneux	
	10-20	6,9	47,93	44,18	Argilo-limoneux	
	20-30	5,85	51,01	41,99	Argilo-limoneux	
	Traitements		L1	L2	L3	L4
<b>Granulométrie du sol après labour</b>	Profondeur du prélèvement	cm	10	15	15	25
	Argiles (< 2 µm)	%	48,65	48,9	49,11	49,76
	Limons fins (2-20 µm)	%	31,21	31,95	31,83	31,8
	Limons grossiers (20-50 µm)	%	11,36	11,65	11,55	11,59
	Sables fins (50-200 µm)	%	4,58	4,34	4,43	4,01
	Sables grossiers (200-2000 µm)	%	3,13	3,08	2,99	2,81

De façon générale, les textures sont de type argilo-limoneux sur toutes les parcelles avec une faible proportion de sable. Il s'agit donc d'un sol lourd. Même si aucune différence majeure n'a été notée, il est cependant observé une variation entre les proportions des fractions au niveau des différents traitements au sein de la couche labourée, puis entre les traitements et le témoin. Ainsi, inversement au taux de sable, les proportions en argile et en limon ont relativement augmenté du labour manuel au labour avec le tracteur, passant de 48,65 % à 49,76 % pour l'argile et de 42,57 % à 43,39 % pour le limon.

#### 2.1.2 Structure et indice de battance du sol

Les résultats de l'observation de l'état structural du sol et l'évaluation des indices de battance sur les différentes parcelles 6 semaines après le labour sont regroupés dans le tableau 3.

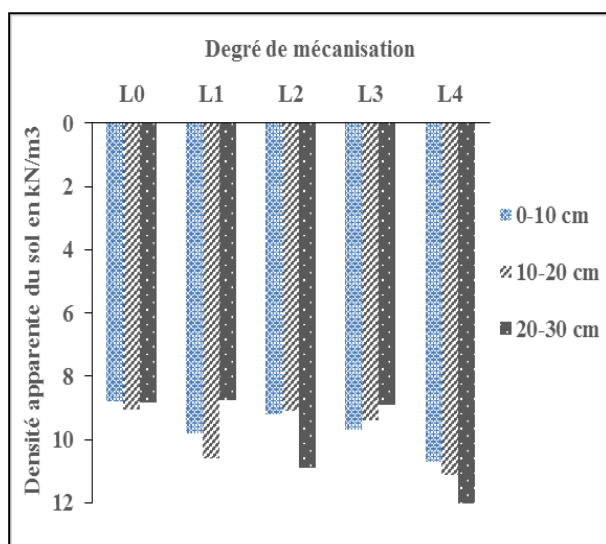
**Tableau 3 : Etat structural et indice de battance du sol**

Traitements	Etat de surface	Etat de consistance en profondeur	Profondeur considérée (cm)	Matière organique (%)	pH	Indice de battance "Ib"
L0	Pas de croûte	Dure	0-20	12,06	6,16	0,34
L1	Quasi-absence de croûte	Meuble	0-10	11,65	6,06	0,34
L2	Croûte faiblement dure	Meuble	0-15	12,19	6,01	0,33
L3	Croûte faiblement dure	Meuble	0-15	12,80	6,19	0,32
L4	Croûte moyennement dure	Meuble	0-25	12,12	6,08	0,33

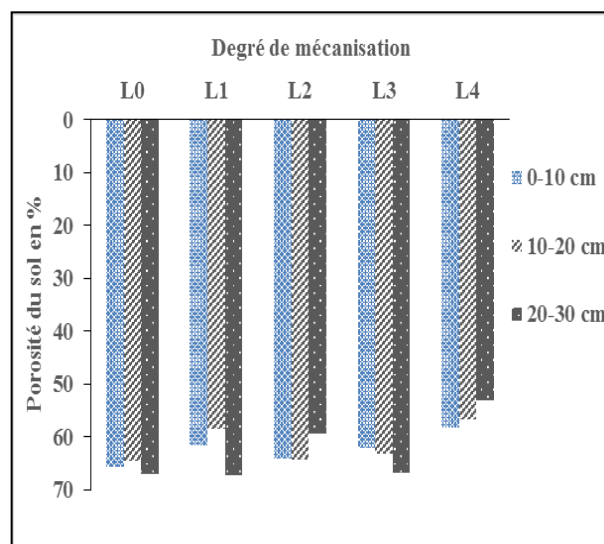
Il ressort du tableau 3 que l'état de surface a faiblement varié pour les différents labours même si les consistances en profondeur semblent être les mêmes. Lesquels paramètres diffèrent entre les labours et le non labour. L'observation des indices de battance n'a révélé aucune différence remarquable. Ainsi, le sol initial de même que toutes les parcelles labourées apparaissent non battant ( $Ib < 1,4$ ).

### 2.1.3 Densité et porosité du sol

Les figures 3 et 4 montrent l'évolution de la densité apparente et de la porosité totale du sol en fonction des différents degrés de mécanisation du travail du sol.



**Figure 3. Densité apparente du sol**



**Figure 4. Porosité totale du sol**

Globalement, il ressort des figures 3 et 4 que la densité et la porosité du sol varient d'un horizon à un autre pour chaque traitement et d'un traitement à un autre. Sur une profondeur de 30 cm, les fortes densités de sol (respectivement les faibles porosités) sont relevées sur les parcelles labourées. Ainsi, le labour avec le tracteur conduit à une densité moyenne de  $11,3 \pm 0,7$   $\text{kN/m}^3$  supérieure à celles des autres degrés de mécanisation qui sont de  $9,7 \pm 0,9$   $\text{kN/m}^3$  pour le labour manuel ;  $9,7 \pm 1,0$   $\text{kN/m}^3$  pour le labour avec la traction animale et  $9,3 \pm 0,4$   $\text{kN/m}^3$  pour le labour avec le motoculteur ; la moyenne du non labour étant de  $8,9 \pm 0,1$   $\text{kN/m}^3$ . Les porosités se présentent comme suit : L0 :  $65,8 \pm 1,2$  % ; L1 :  $62,5 \pm 4,5$  % ; L2 :  $62,6 \pm 2,8$  % ; L3 :  $64,0 \pm 2,5$  %

; L4 :  $56,0 \pm 2,6$  %. Les données relatives à la densité apparente, la densité réelle et la porosité du sol sont listées dans l'annexe 4.

#### 2.1.4 Vitesse d'infiltration et profondeur humectée

##### 2.1.4.1 Durée d'infiltration

La diminution de la hauteur d'eau en fonction du temps sur le sol sec et après humectation est illustrée par les figures 5 et 6.

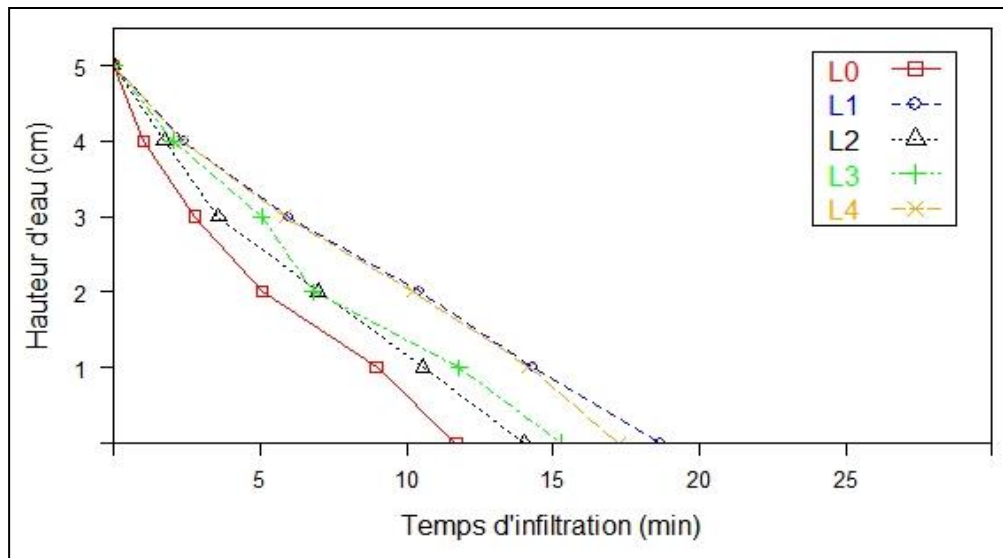


Figure 5. Temps d'infiltration du sol à sec

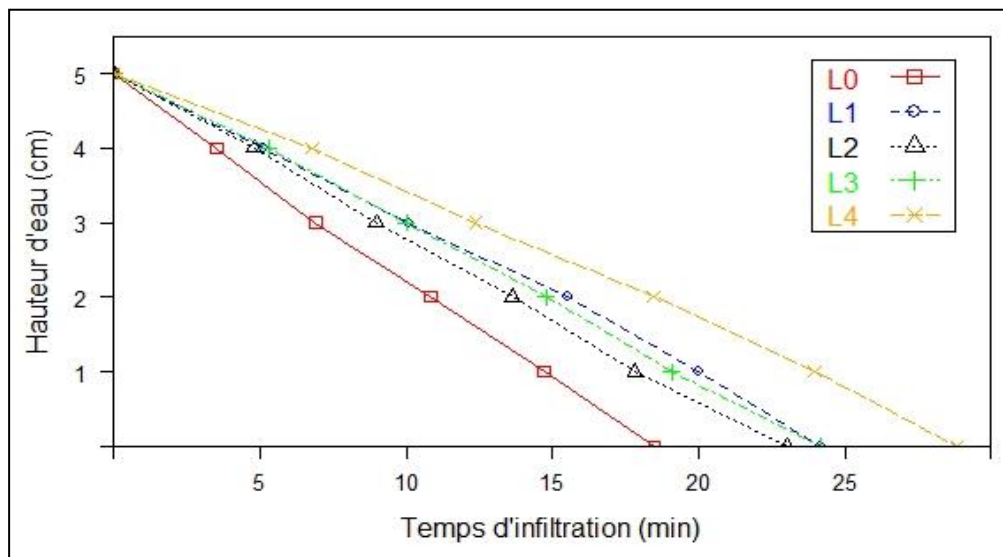


Figure 6. Temps d'infiltration du sol après humectation

Il ressort des figures 5 et 6 que les différents degrés de mécanisation n'ont pas induit les mêmes rythmes d'infiltration d'eau dans le temps. Sur un sol sec, c'est le labour manuel et le labour avec le tracteur qui ont les temps d'infiltration les plus élevés, suivis respectivement du labour

avec le motoculteur et le labour avec la traction animale. Par ailleurs, tous les différents labours ont un temps d'infiltration plus élevé que le sol non labouré. Après humectation, il est noté que c'est le traitement L4 qui a la durée d'infiltration la plus élevée. Il est relativement suivi des traitements L1, L3, L2 et enfin le témoin L0. Il existe probablement une différence significative entre ces durées d'infiltration.

Afin de rechercher une différence significative entre les temps d'infiltration, de même que les profondeurs humectées et les diamètres des taches d'humectation, une analyse de variances (ANOVA) a été effectuée sur les données recueillies pour le test du monocylindre de Roose *et al.* 1993. Le tableau 4 résume les résultats de l'ANOVA.

**Tableau 4 : Comparaison des moyennes des temps d'infiltration, profondeurs humectées et diamètres des taches d'humectation**

Traitements	Temps moyen d'infiltration à sec (min)	Temps moyen d'infiltration après humectation (min)	Profondeur moyenne humectée (cm)	Diamètre moyen de la tache d'humectation (cm)
L0	11,68±1,18 c	18,50±2,08 b	12,83±0,8 a	19,9±2,2 b
L1	18,65±0,94 a	24,19±2,33 ab	12,00±0,5 ab	23,7±1,1 b(*)
L2	14,04±2,42b c	23,00±2,67 ab	12,07±0,3 ab	19,3±0,3 b
L3	15,28±1,46 b	24,15±1,07 ab	11,97±0,4 ab	19,7±2,7 b
L4	17,24±0,52 ab	28,84±5,03 a	11,08±0,1 b	18,5±2,0 b

*Les chiffres portant différentes lettres dans la même colonne sont significativement différents au seuil de 5% d'après le test de Newman et Keuls.*

*(\*) Significatif au seuil de 10%.*

Le tableau 4 montre qu'il y a une différence significative entre les temps moyens d'infiltration, les profondeurs moyennes humectées et les diamètres moyens des taches d'humectation. Ainsi, en condition sèche, les sols labourés manuellement et avec le tracteur se sont avérés les moins filtrants contre le non labour qui est plus filtrant ; ceux travaillés avec la traction animale et le motoculteur ont une durée intermédiaire comparée aux précédents. En condition humide, seul le labour avec le tracteur donne une infiltration relativement faible comparée aux autres degrés de mécanisation ; le non labour demeurant toujours le plus filtrant. Par ailleurs, la plus faible profondeur humectée est observée au niveau de L4 contre la plus forte au niveau du L0. De plus, les diamètres des tâches d'humectation n'ont pas significativement varié sauf le cas du labour manuel qui révèle un diamètre plus élevé au seuil de 10 %.

#### 2.1.4.2 Capacité d'infiltration corrigée

Le tableau 5 présente la capacité d'infiltration moyenne et corrigée, et la forme de la tache d'humectation de chaque parcelle suivant les degrés de mécanisation.



**Tableau 5 : Capacité d'infiltration moyenne et finale corrigée, coefficient de correction et la forme de la tache d'humectation**

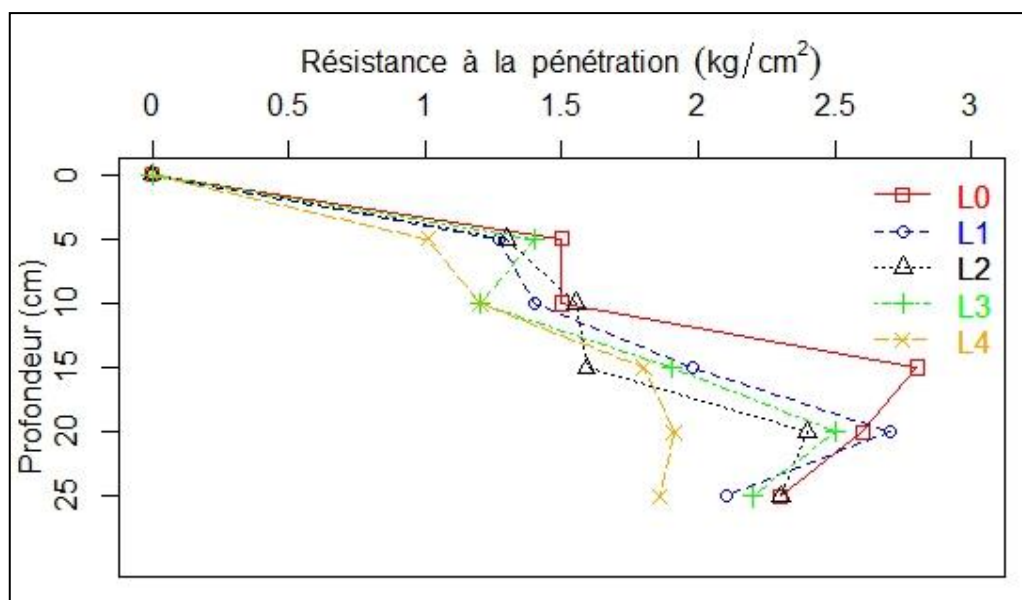
Traitements	Infiltration moyenne à sec (mm/h)	Infiltration moyenne après humectation (mm/h)	Infiltration moyenne finale (mm/h)	Coefficient de correction	Infiltration finale corrigée (mm/h)	Forme de la tache d'humectation
L0	258,6±27,7 a	163,5±18,4 a	211,1±22,04 a	4,5	947,57±98,9	Evasée
L1	161,1±8,0 c	124,8±12,2 b	142,9±9,93 b	6,4	909,93±63,2	Evasée
L2	217,6±34,5 b	131,6±14,5 b	174,6±24,01 b	4,2	738,56±101,6	Evasée
L3	197,4±18,0 bc	124,4±5,4 b	160,9±8,55 b	4,4	704,39±37,4	Evasée
L4	174,1±5,2 bc	106,0±16,9 b	140,0±8,96 b	3,9	542,40±34,7	Evasée

Les chiffres portant différentes lettres dans la même colonne sont significativement différents au seuil de 5% d'après le test de Newman et Keuls.

Il ressort du tableau 5 que les différents traitements ont un effet significatif sur la capacité d'infiltration du sol. Notons ici qu'inversement à l'évolution des durées d'infiltration, les traitements ayant les plus grandes vitesses d'infiltration sont celles qui ont les plus petites durées d'infiltration. Par ailleurs, sur toutes les parcelles, la forme de la tache est pratiquement la même (annexe 5). Ce qui confirme la texture argilo-limoneuse du sol étudié.

#### 2.1.5 Pénétrométrie du sol

La figure 7 traduit l'évolution de la résistance des différentes parcelles à la pénétration suivant la profondeur et le degré de mécanisation du travail du sol. Les données de pénétrométrie et l'humidité du sol lors des mesures sont consignées à l'annexe 6.



**Figure 7. Résistance à la pénétration du sol suivant différents degrés de mécanisation**

A partir de la figure 7, il est noté de façon générale une augmentation progressive de la résistance du sol à la pénétration sur l'horizon 0-20 cm et une diminution sur l'épaisseur 20-25 cm. Le traitement L1 a induit la plus grande résistance qui est de  $1,9 \pm 0,5$  kg/cm<sup>2</sup> contre  $1,8 \pm 0,4$  kg/cm<sup>2</sup> pour L2 et  $1,8 \pm 0,5$  kg/cm<sup>2</sup> pour L3. Le traitement L4 confère  $1,6 \pm 0,4$  kg/cm<sup>2</sup>, la plus

petite résistance à la pénétration. Par ailleurs, toutes les résistances relevées sur les 4 traitements sont inférieures à celle du témoin L0 :  $2,1 \pm 0,5 \text{ kg/cm}^2$ .

## 2.2 Effets du degré de mécanisation sur le développement racinaire du maïs

### 2.2.1 Evolution de la profondeur maximale et la largeur d'enracinement, l'horizon difficile à traverser et l'orientation des racines.

L'analyse de variances de l'extension des racines du maïs suivant les différentes couches et le degré de travail du sol est présentée dans le tableau 6.

**Tableau 6 : Comparaison de la profondeur maximale et la largeur d'enracinement, l'horizon difficile à traverser par les racines et la direction des grosses racines**

Traitements	Profondeur maximale d'enracinement (cm)	Largeur maximale d'enracinement (cm)	Horizon difficile à traverser par les racines (cm)	Direction des grosses racines
L0	31,50±1,1 c	45,25±2,4 b	43,90±0,27 a	Descendante
L1	30,25±1,1 c	30,00±1,8 d	27,38±0,48 d	Étalée
L2	38,00±1,9 a	54,00±1,4 a	37,94±0,13 b	Eparpillée
L3	27,13±0,9 d	40,75±1,5 c	27,48±0,55 d	Eparpillée
L4	34,25±1,8 b	45,00±1,4 b	35,85±0,83 c	Eparpillée

*Les chiffres portant différentes lettres dans la même colonne sont significativement différents au seuil de 5% d'après le test de Newman et Keuls.*

Il est noté à partir du tableau 6 que le traitement L2 a facilité un enracinement plus profond, suivi respectivement de L4, L0 et L1 puis L3. Le traitement L2 a également conduit au plus grand enracinement latéral. Il est suivi du L0 et L4, L3, et enfin de L1. Par ailleurs, l'horizon difficile à traverser est moins profond sur les parcelles du L1 et L3. Cet horizon est plus profond successivement pour les traitements L0, L2 et L4.

### 2.2.2 Comportement des racines suivant les horizons du sol

Le tableau 7 indique la variation de la surface de concentration des racines, la profondeur d'apparition des premières racines et la forme d'enracinement.

**Tableau 7 : Comparaison de la surface de concentration des racines, la profondeur d'apparition et la forme d'enracinement**

Traitements	Surface de concentration des racines (cm <sup>2</sup> )	Profondeur d'apparition des premières racines (cm)	Forme d'enracinement
L0	80,00±6,68 c	7,25±0,65 a	Demi-sphère
L1	73,75±17,93 c	5,38±0,48 b	Demi-sphère
L2	147,58±32,92 b	5,99±0,52 b	Entonnoir
L3	106,83±30,24 c	5,68±0,39 b	Entonnoir
L4	214,50±18,57 a	3,81±0,24 c	Demi-sphère

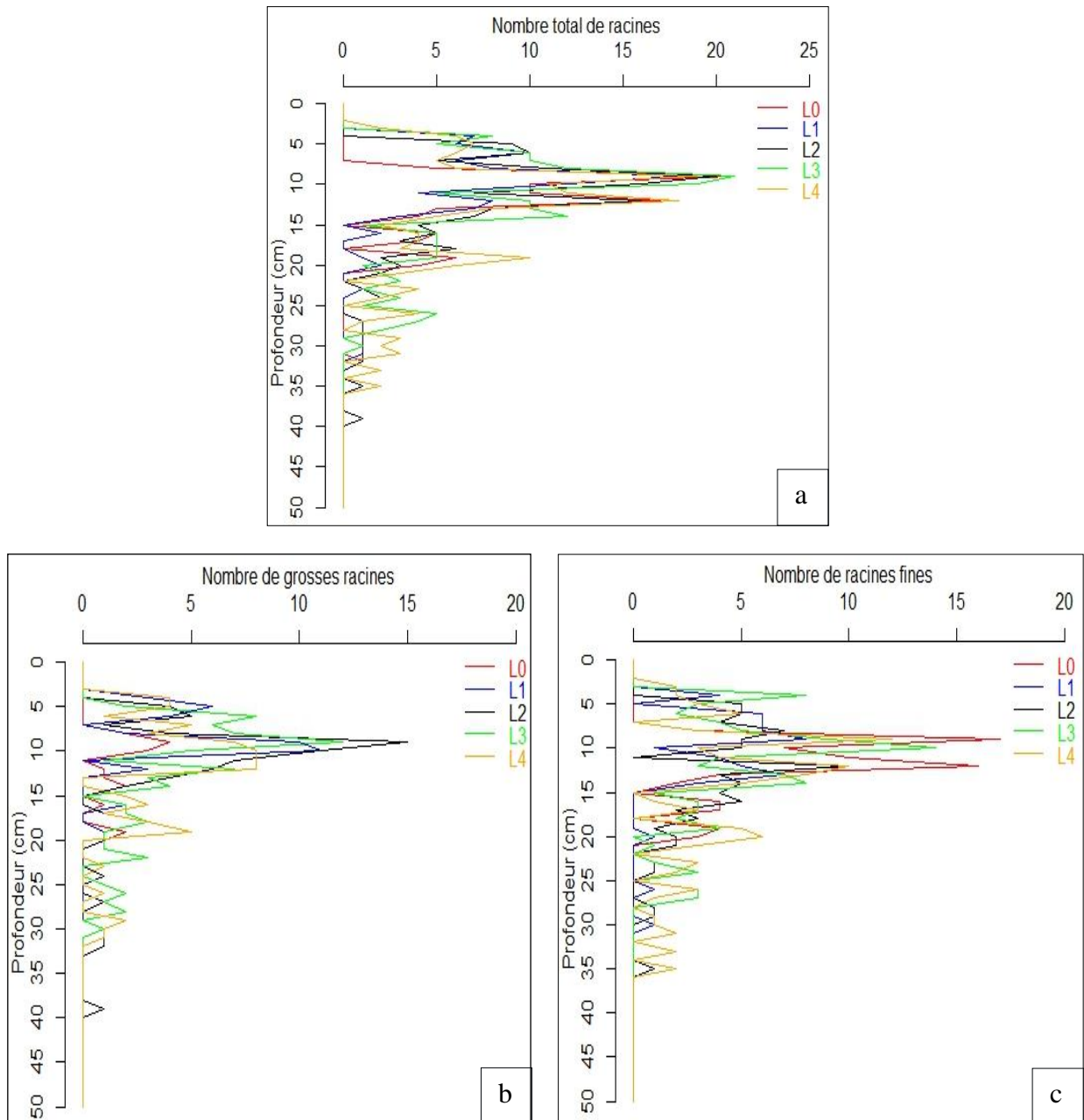
*Les chiffres portant différentes lettres dans la même colonne sont significativement différents au seuil de 5% d'après le test de Newman et Keuls.*

Une différence significative est observée entre les traitements pour les différents paramètres. Ainsi, le L4 offre la plus large zone de concentration des racines, suivi du L2 et enfin du L3,

L0, L1. Par ailleurs, les profondeurs d'apparition des premières racines et la forme d'enracinement ont faiblement différencié entre les traitements.

### 2.2.3 Distribution des racines suivant la profondeur

La figure 8 montre la répartition du nombre de racines suivant la profondeur, ceci pour tous les degrés de travail du sol.



**Figure 8. Distribution du nombre de racines par traitement suivant la profondeur (a : nombre total de racines ; b : nombre de grosses racines ; c : nombre de racines fines)**

Il s'observe sur la figure 8 une différence du nombre de racines entre les horizons avec une diminution bien marquée du nombre de racines avec la profondeur. Les quantités de racines au niveau de chaque horizon sont résumées dans le tableau 8.

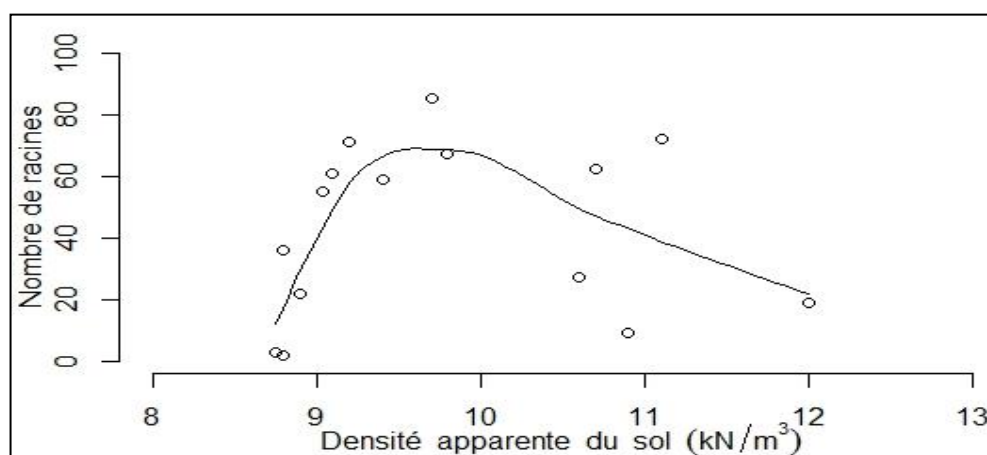
**Tableau 8 : Evolution du nombre de racines en fonction des profondeurs et des traitements**

	Profondeur	L0	L1	L2	L3	L4
<b>Nombre total de racines</b>	0-10 cm	36	67	71	85	62
	10-20 cm	55	27	61	59	72
	20-30 cm	2	3	9	22	19
	30-40 cm	1	1	4	0	7
<b>Nombre de grosses racines (d &gt; 0,5 mm)</b>	0-10 cm	9	36	40	40	32
	10-20 cm	8	7	25	24	30
	20-30 cm	2	2	3	11	5
	30-40 cm	1	0	3	0	1
<b>Nombre de racines fines (d ≤ 0,5 mm)</b>	0-10 cm	27	31	31	45	30
	10-20 cm	47	20	36	35	42
	20-30 cm	0	1	6	11	14
	30-40 cm	0	1	1	0	6

Il est relevé une distribution décroissante du nombre total de racines pour les traitements L1, L2 et L3 d'une part ; puis un nombre plus élevé de racines entre 10 et 20 cm pour le L0 et L4 d'autre part. Par ailleurs, il est observé au-delà de 20 cm une présence plus marquée du nombre de racines fines au niveau du L4, L3 et L2.

#### 2.2.4 Relation entre la densité du sol et le nombre de racines du maïs

La figure 9 montre la courbe de distribution du nombre de racines en fonction de la densité apparente du sol tous les 10 cm sur la profondeur 0-30 cm.



**Figure 9. Relation entre la densité du sol et le nombre de racines du maïs**

A partir de la figure 9, il est noté une relation non linéaire entre la densité apparente du sol et le nombre de racines développées par le maïs. La régression polynomiale conduit à l'équation :

$$y = 16,2 x^3 - 519,6 x^2 + 5524 x - 19366,5 \text{ avec } R^2 = 0,55$$

Même si le coefficient de détermination apparaît faible, on remarque cependant qu'il existe un seuil à partir duquel la densité racinaire devient inversement proportionnelle à la densité apparente du sol. Ainsi, dans chaque horizon de 10 cm d'épaisseur à moins de 30 cm de profondeur, l'enracinement maximal d'environ 67 racines est atteint lorsque la densité apparente du sol avoisine  $9,8 \pm 1,0 \text{ kN/m}^3$ .

### 2.3 Synthèse des effets du degré de mécanisation du travail du sol sur les propriétés physiques du sol et l'enracinement du maïs

Le tableau 9 récapitule les modifications qu'apporte chaque degré de modification sur les propriétés physiques du sol et l'enracinement du maïs.

**Tableau 9 : Synthèse des effets du degré de mécanisation sur le sol et l'enracinement du maïs**

<b>Paramètres</b>	<b>L0</b>	<b>L1</b>	<b>L2</b>	<b>L3</b>	<b>L4</b>
<b>Texture</b>	r	+	++	++	+++
<b>Battance</b>	r	≈	-	-	-
<b>Densité</b>	r	+	+	+	++
<b>Porosité</b>	r	-	-	-	--
<b>Infiltration</b>	r	-	--	--	---
<b>Pénétrométrie</b>	r	-	--	--	---
<b>Nombre de racines</b>	r	≈	+	+	+
<b>Largeur d'enracinement</b>	r	--	+	-	≈
<b>Profondeur d'enracinement</b>	r	≈	+++	-	++

*r : référence ; + : effet positif ; - : effet négatif ; ≈ : pas de différence significative*



**CHAPITRE 3 :  
DISCUSSIONS ET  
PERSPECTIVES**

### 3. DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

#### 3.1 Par rapport aux paramètres physiques du sol sous différents degrés de mécanisation

##### 3.1.1 Teneur en matériaux du sol

L'augmentation progressive du taux d'argile et de limon du labour manuel au labour avec le tracteur est imputable à la variation des profondeurs de labour et des proportions des matériaux entre les différents horizons. En effet, la couche 0-10 cm du sol initial comportait une teneur élevée en sable (7,55 %), une teneur moyenne en limon (42,53 %) et en argile (48,65 %) comparées aux couches 10-20 et 20-30 cm (tableau 1). Mais après le labour, les proportions élevées de l'argile et du limon des couches inférieures sont ramenées et mélangées avec la couche supérieure, augmentant ainsi la teneur moyenne en argile et en limon de l'horizon labouré. On peut en déduire que la variation de la profondeur de labour due ici à la variation du degré de mécanisation modifie dans une certaine mesure la texture du sol. Ce qui va améliorer la porosité des horizons inférieurs et peut être bénéfique pour le développement racinaire des cultures (Nicou *et al.*, 1993).

##### 3.1.2 Structure et battance du sol

La variation de l'état de surface est une conséquence de la remontée des particules fines du sol. Ce qui devrait conduire à la battance du sol (Pasquier, 2016). Cependant, les indices de battance sont restés faibles, indiquant une absence de battance. Ceci est notamment dû à la teneur en argile (> 48 %) (tableau 2) et à la forte teneur en matière organique du sol (> 11,6 %) (tableau 3) pour toutes les parcelles. En effet, les andosols sont généralement caractérisés par leur forte teneur en matière organique (> 10 %), montrant ainsi leur très grande intégration à la fraction minérale (CIRAD *et al.*, 1988). Ainsi, à partir de la formule de l'indice de battance (1.2.2.3), il est déduit que plus les teneurs en argile et en matière organique sont élevées, moins le sol est sensible à la battance. C'est effectivement une résultante de l'aptitude élevée à la cohésion de l'argile et du rôle de liant que joue la matière organique entre les particules minérales du sol (Chenu, 1989). Cependant, l'expansion et la contraction des particules d'argile suivant la variation du sol d'un état humide à sec peuvent provoquer la cassure des agrégats.

##### 3.1.3 Densité et porosité du sol

Les densités apparentes moyennes obtenues sur toutes les parcelles labourées (9,7 à 11,3 kN/m<sup>3</sup>) (figure 3 et annexe 4) sont supérieures à la densité naturelle ( $\leq 9$  kN/m<sup>3</sup>) des andosols contenant plus de 10 % d'argile (Legrand *et al.*, 2007). Elles sont cependant faibles par rapport à celles obtenues par Moussadek *et al.* (2011) qui sont toutes supérieures à 14 kN/m<sup>3</sup> pour un labour conventionnel et des semis directs sur un vertisol. Les figures 3 et 4 ont révélé respectivement une augmentation de la densité et une diminution de la porosité presque proportionnelle au degré de mécanisation du travail du sol. La forte augmentation de la densité du sol provoquée par le labour avec le tracteur comparée aux autres degrés serait une incidence

de la profondeur de labour et de l'affinement du sol suite au pulvérisage. Dans tous les cas, le travail du sol a modifié la densité apparente et la porosité du sol. Celles-ci devraient agir sur l'enracinement et l'améliorer (Tourte *et al.*, 1968 cité par Chopart, 1999) vu que toutes les densités sont inférieures à la plage 13,3 à 15,5 kN/m<sup>3</sup> jugée optimale et compromettante à l'enracinement du maïs selon Iijima et Kono (1991).

#### 3.1.4 Infiltration de l'eau

La faible infiltration lors du labour manuel constatée dans le tableau 3 est provoquée par les particules fines découlant de l'affinement du sol comme le cas du labour avec le tracteur. Toutefois, après humectation, l'eau a atteint la profondeur labourée (10 cm) et se trouve confrontée à la couche argilo-limoneuse dense, responsable de la forte infiltration latérale comme au niveau du non labour. Ce phénomène n'est pas constaté pour les parcelles labourées avec le tracteur. A ce niveau, ladite couche dense étant ameublie par le labour, c'est plutôt la migration des particules fines qui se poursuit, rendant de plus en plus difficile la descente de l'eau. Ce résultat se rapproche des travaux de Valet (1984) qui obtient une baisse de la vitesse d'infiltration sous le labour par rapport au grattage sur des sols sablo-limoneux. Par ailleurs, les diamètres humectés n'ont pas significativement varié entre les traitements. Ceci est peut être une conséquence de l'adsorption de l'eau par les particules fines (argile et limon).

Plus loin dans le tableau 4, les différents labours ont significativement réduit la vitesse d'infiltration de l'eau avec la plus faible vitesse constatée pour le L4 (542,40±34,7 mm/h), les moyennes intermédiaires pour L3 (704,39±37,4 mm/h) et L2 (738,56±101,6 mm/h). Les traitements L1 (909,93±63,2 mm/h) et L0 (947,57±98,9 mm/h) sont les plus filtrants et ceci de façon latérale créant ainsi le départ de l'eau sur la parcelle. La faible infiltration au niveau du L4 confirme les résultats de Hamza (1994) qui prouve que le travail du sol à l'aide d'un pulvérisateur à disque réduit sa perméabilité. L'infiltration élevée sur la parcelle non labourée peut s'expliquer par l'apparition des fentes de retrait sous un sol argileux pendant la période sèche durant laquelle nos mesures ont été effectuées ; ou dans une moindre mesure par la présence de structure stable non perturbée comme le cas du semis direct par rapport aux parcelles labourées (Moussadek *et al.*, 2011).

#### 3.1.5 Pénétrométrie du sol

La décroissance progressive de la résistance du sol partant du L1 (plus petite profondeur de labour) au L4 (plus grande profondeur de labour), avec toutes les résistances inférieures à celle du L0 (figure 7), permet de dire que la résistance du sol est inversement proportionnelle à la profondeur de labour. Cela confirme les travaux de Seguy *et al.*, (1989a) qui démontrent que la résistance mécanique à la pénétration est diminuée sous le labour.



## 3.2 Par rapport au développement racinaire du maïs

### 3.2.1 Profondeur et largeur d'enracinement

Le labour avec la traction animale a favorisé simultanément l'enracinement vertical et latéral (tableau 5). Dans le cas de l'extension latérale, la direction "éparpillée" des grosses racines n'a été possible que grâce à des mottes de taille moyenne laissées après le labour. A cela s'ajoute la profondeur d'apparition de la couche difficile à traverser qui semble avoir facilité l'enracinement vertical. Tout ceci a contribué à la forte vitesse d'infiltration, rendant le sol plus rapidement sec et justifie l'enracinement plus profond du maïs sur un sol sec (Jordan, 1987a). La profondeur de labour n'a pas significativement favorisé l'enracinement vertical des racines pour le labour avec le tracteur. C'est dû au fait que le substrat oppose une résistance purement mécanique à la pénétration racinaire, qui est d'autant plus importante que la granulométrie est fine et le taux d'humidité résiduelle faible. Elle atteint sa valeur maximale pour un sol contenant moins de 18 % d'eau et plus de 40 % d'argile, la nature de celle-ci n'ayant aucune importance (Maertens, 1964). Cette situation est accentuée par la présence d'horizon difficile à traverser par les racines. Ce qui a fortement limité la profondeur d'enracinement observée au niveau du L3 et L1. Cela peut être comparé à l'effet d'ombrage évoqué par Tardieu et Manichon (1987) lorsqu'ils constatent que les obstacles à la pénétration racinaire réduisent la densité racinaire non seulement dans la zone compactée mais aussi dans le sol sous-jacent non compacté. Cependant, malgré la position de cet horizon à  $43,90 \pm 0,27$  cm, l'enracinement vertical du L0 s'est limité à  $31,50 \pm 1,1$  cm avec pourtant des racines à orientation descendante. On retient donc qu'en absence de cette couche, les parcelles labourées conduiraient à un enracinement vertical plus élevé comparé au témoin L0. Cela pourrait compléter le rôle prépondérant joué par les racines séminales dans l'établissement du système racinaire en situation de contrainte selon Groleau-Renaud (1998), pour qui ces racines très fortement impliquées dans l'approvisionnement en eau et en éléments nutritifs chez la jeune plante sont significativement modifiées par la contrainte mécanique.

### 3.2.2 Comportement des racines suivant les horizons du sol

L'analyse des résultats du tableau 6 permet de dire que la surface explorée par la majorité des racines est fortement liée au degré de mécanisation. Ainsi, le labour avec le tracteur a créé une meilleure condition d'extension pour les racines (surface de concentration plus large). Ce qui facilite la capture des éléments nutritifs sur une grande surface, surtout avec l'enracinement en demi-sphère qui est le plus efficace en termes d'exploration du milieu, puisque l'inter-rang sur toute sa hauteur est accessible. Les traitements L3 et L2 ont aussi conduit à une surface non moins importante explorée par les racines avec cependant un enracinement en forme d'entonnoir (annexe 9) qui laisse penser à un suivi des gros pores laissés par les mottes de terre résultant de ces deux degrés de labour. Malgré la répartition sous forme de demi-sphère au niveau du labour manuel et le non labour, la grande majorité des racines n'a pas pu explorer

une grande surface. Tout ceci met en évidence l'effet de la profondeur du labour et de l'affinement des mottes de terre sur l'extension racinaire. C'est certainement une conséquence de la teneur en argile du sol car les sols à haute teneur en argile peuvent limiter considérablement la prospection verticale des racines (Thomas, 2000) et la diminution de la densité racinaire serait, entre autres, proportionnelle à l'augmentation en argile d'un horizon donné (Sudmeyer *et al.*, 2004). De plus, bien que la génétique ait une incidence sur le type d'enracinement, la distribution racinaire dépend de nombreux autres facteurs, notamment de la fertilité des sols, des techniques culturales et des différentes contraintes de sol (Drénou, 2006).

### 3.2.3 Distribution des racines suivant la profondeur

La concentration des racines dans les premières couches (0-15 cm) peut être liée d'une part à la forte teneur en matière organique du sol et aux apports en fertilisant, et d'autre part à la précipitation régulière durant la période végétative de la culture (figure 8). Selon Tamia *et al.* (1999), la diminution de la densité racinaire globale suivant la profondeur d'enracinement telle que constatée pour les traitements L1, L2 et L3 peut s'expliquer par la variation de l'état structural du sol suivant la profondeur, due à la profondeur de labour ; ou peut être par la décroissante naturelle de la densité d'enracinement avec la profondeur (Tardieu et Manichon, 1987). La densité élevée des racines (grosses et fines) entre 10 et 20 cm de profondeur pour L4, L3 et L2 serait également une conséquence de l'ameublissement du sol par ces différents labours à cette profondeur. Les variations observées au niveau du L0 peuvent s'expliquer par le fait que dans les sols argileux où la densité du matériau est très élevée, les racines ne pénètrent que dans les fissures ou dans les traces d'anciennes racines en voie de décomposition (Ruark *et al.*, 1982 cités par Drénou, 2000). Ainsi, la profondeur et la densité d'enracinement sont donc fortement affectées par des facteurs exogènes dont les plus importants sont la texture, la structure, la densité apparente et la pierrosité (Charnet, 2003)

### 3.2.4 Relation entre la densité du sol et le nombre de racines du maïs

La relation polynomiale qui lie la densité apparente du sol et le nombre de racine du maïs traduit la contribution tant positive que négative de la densité du sol sur l'enracinement du maïs (figure 9). Les plus faibles colonisations des horizons par les racines de maïs s'observent au niveau des parcelles insuffisamment tassées (Nicoullaud *et al.*, 1995). Ainsi, la culture de maïs exige un minimum de densité (tassement du sol) pour exprimer son potentiel d'enracinement. Cependant, cette densité exigée de la plante ne saurait s'accroître exponentiellement car, en conditions d'aération faible, consécutives à une porosité insuffisante ou à un remplissage des pores par l'eau du sol, la respiration racinaire serait très fortement diminuée ; ce qui aurait un effet dépressif sur le développement de l'ensemble de la plante (Jordan, 1987b). La compaction excessive produit des effets sur les propriétés physiques du sol. La taille des pores est réduite ce qui augmente la dureté (ou résistance) du sol, les transferts d'eau et d'air se trouvant modifiés (Agrawal, 1991). Par ailleurs, l'enracinement maximal n'est atteint que pour les densités

apparentes du sol voisines de  $9,8 \pm 1,0 \text{ kN/m}^3$ . Or cette densité n'est prioritairement obtenue qu'avec les traitements L1, L2 et L3. Cela met en évidence la forte densité conférée au sol par le labour L4 certainement imputable à l'affinement du sol, et l'excès en porosité causée par le non labour sur un sol argilo-limoneux, conséquence d'éventuelles fentes de retrait en période sèche ou de galeries issues d'activités biologiques (vers de terre, anciennes racines en décompositions...).

### 3.3 Suggestions et perspectives

Le tableau 9 a montré qu'en définitive, les différents degrés de mécanisation apportent une disparité de modifications sur les propriétés physiques du sol et affectent différemment le développement racinaire du maïs. Les deux hypothèses H1 et H2 de ce travail sont donc vérifiées.

Parmi les paramètres évalués sur le sol, la texture et l'état structural sont les plus importants car ils agissent simultanément sur la densité et donc la porosité du sol. L'infiltration et la résistance à la pénétration du sol sont par la suite affectées. Ces caractéristiques physiques du sol sont ici significativement modifiées par le travail du sol lorsque les fractions constitutives du sol sont bien différenciées. Ceci s'observe de manière graduelle partant du labour manuel à la traction animale et le motoculteur, et surtout pour le labour avec le tracteur.

Afin d'optimiser les conditions d'enracinement du maïs sans entraver l'exploitation durable des sols argilo-limoneux, il s'avère indispensable de :

#### **En général :**

- ☞ régulièrement labourer ces sols ou dans une moindre mesure intercaler le labour avec le non labour tous les deux ans. A cet effet, le non labour permanent doit être évité surtout pour la culture de maïs sur ces sols ;

- ☞ faire le labour en fin de période sèche ou juste après les premières pluies pour limiter la compaction du sol ;

- ☞ labourer à une profondeur allant de 15 à 25 cm pour faire remonter les particules fines (argile et limon) du sol ;

- ☞ éviter le pulvérisage du sol après le labour. A ce titre, un bon retournement du sol devient nécessaire pour limiter la reprise rapide des mauvaises herbes, et certainement bénéficier de la matière organique enfouie.

- ☞ concevoir des semoirs munis d'organes de préparation du lit de semis pour affiner les blocs de labour et faciliter le contact sol-semence ; ceci pour les grandes exploitations ;

- ☞ éviter un désherbage précoce afin de protéger la surface du sol du risque de battance. Dans ce cadre, en moyenne deux sarclages bien planifiés suffiront pour le cas de maïs.

#### **En fonction des moyens dont dispose le producteur :**

- pour le labour manuel : éviter l'émottage excessif ;

- pour la traction animale et le motoculteur : labourer sans herser tout en explorant aussi profondément que possible le sol suivant la capacité des animaux et du motoculteur ;
- dans le cas du tracteur : un labour profond non affiné et sans pulvérisage s'impose.

**Pour les recherches futures :**

Vu que les effets d'une même technique de travail du sol peuvent être très variables suivant l'espèce cultivée, le type de sol et la qualité du travail ; il n'est pas peut être rationnel de généraliser directement ces résultats à d'autres milieux sans analyses complémentaires. Il serait intéressant de :

- ✓ faire des recherches qui relient les degrés de mécanisation du travail du sol en intégrant les paramètres climatiques (précipitations et températures) et le degré de fertilisation du sol ;
- ✓ du fait de l'évaluation difficile lorsque les racines sont orientées vers le bas, de nouvelles méthodes d'évaluation de l'enracinement peuvent être utilisées pour compléter les présents résultats ;
- ✓ poursuivre l'expérimentation jusqu'à la récolte de la culture ;
- ✓ réaliser également d'autres études avec les mêmes degrés de mécanisation du travail du sol pour décrire le comportement du maïs sur d'autres types de sols ;
- ✓ étendre cette étude à d'autres cultures présentant différents systèmes racinaires) ;
- ✓ faire les études consécutives à moyen et à long terme (sur 3 à 4 ans minimum).



**CONCLUSION**

## CONCLUSION

La présente étude s'est investie sur les effets du degré de mécanisation du labour sur les paramètres physiques du sol et l'enracinement des cultures. Elle a permis de mieux cerner le comportement du sol et de la culture du maïs suivant la profondeur de labour, le degré d'affinement du sol et les exigences au bon développement des racines de cette plante. D'importantes différences significatives ont été observées en ce qui concerne les conséquences des différents degrés de mécanisation du labour sur le sol et l'enracinement de la culture. Il ressort de ce travail que sur les sols à forte teneur en argile et en limon, le labour manuel avec angady modifie sensiblement les proportions des matériaux et la structure superficielle du sol, et influe négativement sur la porosité et l'infiltration ; le développement racinaire du maïs étant pratiquement non affecté. Le labour avec la traction animale et le motoculteur, lorsque le sol n'est pas affiné, améliorent positivement la teneur des matériaux et la densité du sol avec comme conséquence une réduction de la porosité, une faible diminution de la résistance du sol à l'enfoncement. Tout ceci contribue au bon développement du système racinaire du maïs. Enfin, le labour avec le tracteur suivi d'un pulvérisage entraîne une forte amélioration de la proportions des matériaux et de la densité du sol accompagnée d'une réduction excessive de la porosité, de l'infiltration et de la résistance du sol. Ce qui favorise un peu la profondeur et la forme d'enracinement sans pour autant avoir des répercussions strictement positives sur l'enracinement global.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1- Abdellaoui, Z., Zaghouane, O., Belhadj, A., Teskrat, H. 2011. Etude comparative de l'effet du travail conventionnel, semis direct et travail minimum sur le comportement d'une culture de blé dur dans la zone subhumide. In : *Bouzerzour H. (ed.), Irekti H. (ed.), Vadon B. (ed.). 4. Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct. Zaragoza : CIHEAM / ATU-PAM / INRAA / ITGC / FERT, 2011. p 71-87 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 9 6)*
- 2- Agrawal, R. P. 1991. Water and nutrient management in sandy soils by compaction. *Soil Tillage Res.* 19: 121-130.
- 3- Andriamanantena, Z. 2006. Biomasse racinaire des plantes sous différents systèmes de culture : labour et semis direct sous couverture végétale dans le Vakinankaratra. Mémoire de fin d'étude pour obtenir le diplôme d'ingénieur Agronome, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo-Madagascar. 51 p.
- 4- Charnet, F. 2003. L'enracinement des arbres et les propriétés physiques des sols. *Forêt-entreprise.* 154 : 37-43.
- 5- Chenu, C. 1989. Influence of fungal polysaccharide, scleroglucan, on clay microstructures. *Soil Biology and Biochemistry,* 21, 299-305.
- 6- Chopart, J. L. 1999. Relation entre état physique du sol, système racinaires et fonctionnement hydrique du peuplement végétal : outils d'analyse in situ et exemples d'études en milieu tropical à risque climatique élevé. Thèse de Doctorat. Université de Grenoble 1 (Joseph Fourier) (Sciences de la Terre) / Grenoble / France. 138 p.
- 7- CPCS, 1967. Classification des sols. Commission de Pédologie et de Cartographie des sols. Edition 1967. Numérisé par l'Association Française pour l'Etude du Sol ([www.afes.fr](http://www.afes.fr) - 2011) pour mise à disposition de la communauté (avec corrections de Denis Baize). 100 p.
- 8- CIRAD, CNRS, INRA, ORSTOM, UNIVERSITE, 1988. Les andosols de l'Île de la Réunion. Préparation d'un programme de recherches pluridisciplinaires. Séminaire de Saint-Denis. 24 mai au 1<sup>er</sup> juin 1988. 196 p.
- 9- CPSA, 2016. Centre de Production de Semence d'Agnarafaly. <http://semences.dusud.com/station/cpsa.htm>. Consulté le 14/09/2016.
- 10- Deffontaine, J. P. 1964. Une méthode d'appréciation du système racinaire sous prairie. *Fourrages,* 19 : 91-96.
- 11- Drénou, C. 2006. Les racines : face cachée des arbres. Paris : Institut pour le développement forestier. 335 p.
- 12- Drénou, C. 2000. Étude des relations entre systèmes racinaires et stabilité des arbres. *Les Dossiers de l'environnement de l'INRA.* 20: 153-159.
- 13- FAO, ISRIC et AISS. 1999. Base de référence mondiale pour les ressources en sols. Rapport sur les ressources en sols du monde. M-51\_ ISBN 92-5-304141-9. 101 p.
- 14- FAO et Unesco, 1975. Carte mondiale des sols. Volume I, Légende. Paris, 1975. 68 p.

- 15- Gautronneau, Y. et Manichon, H. 1987. Guide méthodique du profil cultural. 62p.
- 16- Gifford, R. C. 1993. Génie agricole et développement : élaboration d'une stratégie en matière de mécanisation. Vol I- Concept et principes, FAO. *Bulletin des services agricoles* 99/1, Rome, Italie.
- 17- Groleau-Renaud, V. 1998. Contrainte mécanique et exsudation racinaire du maïs : incidence de la morphologie du système racinaire. Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques à l'Institut National Polytechnique de Lorraine. 268 p.
- 18- Hamza, M. E. 1994. Les effets de trois techniques de travail du sol sur état structural et hydrique. *Tropicultura*, 1994, 12, 1, 6-9.
- 19- Houmy, K. 2008. Guide de formulation d'une stratégie de mécanisation agricole. Etude de cas : stratégie nationale de la mécanisation agricole au Mali. Document de travail sur le Génie Rural et Alimentaire, FAO, Rome, 2008. 47 p.
- 20- Iijima M. and Kono Y. 1991. Interspecific differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction. *Japan. J. Crop Sci.* 60: 130-138.
- 21- INSTAT, 2011. Enquête Périodique auprès des Ménages 2010. EPM-2010. Rapport Principal. INSTAT. Antananarivo Août 2011. 374 p. [http://www.instat.mg/pdf/epm\\_10.pdf](http://www.instat.mg/pdf/epm_10.pdf). Consulté le 27/10/2016.
- 22- Jenhaoui, Z. et Raclot, D. 2011. Le travail du sol dans le bassin versant de Kamech. Rapport de travail, Institut de Recherche pour le Développement, IRD Tunis. 23 p.
- 23- Jordan, M. O. 1987a. Mise en place du système racinaire du maïs. I. Importance de quelques paramètres relatifs à la plante. *Agronomie, EDP Sciences*, 1987, 7 (6), pp.365-371.
- 24- Jordan, M. O. 1987b. Mise en place du système racinaire du maïs. II. - Importance de quelques paramètres relatifs aux conditions de milieu. *Agronomie, EDP Sciences*, 1987, 7 (7), pp.457-465.
- 25- Köller, K. 2003. Techniques of Soil Tillage. In A. El Titi, ed. *Soil Tillage in Agroecosystems*. CRC Press LLC, Boca Raton. Pp 1-25.
- 26- Legrand, P., Bartoli, F. et Curt, T. 2007. Spécificités des sols volcaniques du Massif central : bénéfiques et contraintes pour la gestion forestière. *Rev. For. Fr. LIX* - 2-2007. Pp99-118.
- 27- Lhoste, P., Havard, M. et Vall, E. 2010. La traction animale. Collection « Agricultures tropicales en poche ». p12.
- 28- MAEP, 2003. Monographie de la Région de Vakinankaratra. Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche. Antananarivo. 118 p.
- 29- Maertens, C. 1964. La résistance mécanique des sols à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement. *Ann. agron.*, 15, 539-554.
- 30- Macauley, H. et Ramadjita, T. 2015. Les cultures céréalières : riz, maïs, millet, sorgho et blé. Document de référence. Centre international de conférences Abdou Diouf, Dakar, Sénégal, 21-23 Octobre 2015. 38 p.



- 31- Masciandaro, G., Ceccantini, B. et Gallardo-Lancho, J. F. 1998. Organic matter properties in cultivated versus set-aside arable soils. *Agric. Ecosys. Environ.* 67: 267-274.
- 32- Moussadek, R. et al. 2011. Effets du travail du sol et de la gestion des résidus sur les propriétés du sol et sur l'érosion hydrique d'un Vertisol Méditerranéen. *Can. J. Soil Sci.* 91: 627-635.
- 33- Nicou, R., Charreau, C. et Chopart, J. L. 1993. Tillage and soil physique properties in semi-arid west Africa. *Soil and Tillage Research*, 27 125-147.
- 34- Nicoulaud, B., Dartout, R. et Duval, O. 1995. Etude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs dans les sols argilo-limoneux de Petite Beauce. Dans : Etude et Gestion des sols, 2, 3, 1995, pages 183-200.
- 35- Nicoulaud, B., King, D., and Tardieu, F. 1994. Vertical distribution of maize roots in relation to permanent soil characteristics. *Plant and soil*, 159 (2) 245-254.
- 36- PADR, 2007. Programme Régional de Développement Rural (PRDR) - GTDR Vakinankaratra. Primature/Plan d'action pour le développement rural. 156 p.
- 37- Pasquier, L. 2016. Guide du sol. Largile et Lamotte. ENESAD - Unité Informatique Pédagogique. 111 p. [www.ecoledepermaculture.org/.../Le\\_sol/Guide%20du%20sol%20%20ENESAD.pdf](http://www.ecoledepermaculture.org/.../Le_sol/Guide%20du%20sol%20%20ENESAD.pdf). Consulté le 17/12/2016.
- 38- Raboin, L.-M., Ramanantsoanirina, A., Dzido, J.-L., Frouin J., Radanielina, T., Tharreau, D., Dusserre, J. et Ahmadi N. 2013. Création variétale pour la riziculture pluviale d'altitude à Madagascar : bilan de 25 années de sélection. *Cah Agric*, 22 (5): 450-458. doi:10.1684/agr.2013.0624
- 39- Raunet, M. 2009. Initiation à la lecture des paysages morpho-pédologiques de Madagascar. Formation des ingénieurs et techniciens des opérateurs du projet BVPI / SEHP. 81p.
- 40- Roisin, C. 2006. Travail du sol et structure. Centre wallon de Recherches agronomiques. Département Production Végétale. Présentation du 13/10/2006. 24p.
- 41- Roose, E., Blancaneaux, P. et Luiz de Freitas, P. L. 1993. Un simple test de terrain pour évaluer la capacité d'infiltration et le comportement hydrodynamique des horizons pédologiques superficiels : méthode et exemples. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVIII, n°2, 1993 : 413-419.
- 42- Seguy, L., Bouzinac, S., Pacheco, A., Klutchouski, J. 1989a. Des modes de gestion mécanisés des sols et des cultures aux techniques de gestion en semi direct, sans travail du sol, appliquées aux cerrado du centre-ouest brésilien. IRAT /EMBRAPA. 165 p.
- 43- Sourisseau, J-M. et al. 2016. Diagnostic Territorial de la Région du Vakinankaratra à Madagascar. « Prospective territoriale sur les dynamiques démographiques et le développement rural en Afrique subsaharienne et à Madagascar ». Etude pour le compte de l'Agence Française de Développement. Rapport pays. Pp 34-40.

- 44- Sudmeyer, R.A., Speijers, J., et Nicholas, B.D. 2004. Root distribution of *Pinus pinaster*, *P. radiata*, *Eucalyptus globulus* and *E. kochii* and associated soil chemistry in agricultural land adjacent to tree lines. *Tree physiology*. 24 : 1333-1346.
- 45- Tamia, A., Moreau, R., Fortier M. et Yoro G. 1999. Influence du travail du sol sur l'évolution physique d'un sol forestier ferrallitique après défrichage motorisé Conséquence sur l'enracinement du maïs. *Etude et Gestion des Sols*, 6, 1, 1999. 14 p
- 46- Tapsoba, E. S., Vall, E. et Havard, M. 2013. Introduction et évaluation de la traction monobovine avec le jouguet IRAD-BF à l'Ouest du Burkina Faso. *Mechanics of materials*. 2013. <https://hal-auf.archives-ouvertes.fr/hal-00911548>. Consulté le 18/09/2016.
- 47- Tardieu, F. et Manichon, H. 1987. Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II. - Croissance et disposition spatiale du système racinaire. *Agronomie, EDP Sciences*, 1987, 7 (3), pp.201-211.
- 48- Thomas, F.M. 2000. Vertical rooting patterns of mature *Quercus* trees growing on different soil types in northern Germany. *Plant Ecology*. 147:95-103.
- 49- Quantin, P. 1972. Les andosols. Revue bibliographique des connaissances actuelles. Pédologue de l'ORSTOM, SCC, Bondy. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, no 3, 1972 : 273-301.
- 50- Valet, S. 1984. Caractérisation hydropédologique du sol sablo-limoneux de l'essai travail du sol de Nioro-bit (enracinement, consommation en eau et production en h hivernage 1983). Montpellier (FRA), IRAT /DEVE. 26 p.
- 51- Wambeke, A. V., Louis, A., Ameryekx, J. et Aissoug, M. 1986. Clés de la taxonomie des sols. Traduction de "Keys to Soil Taxonomy". Monographie Technique N°13, 1986. 350 p.
- 52- Zoelinirina, Z. P. 2007. Caractérisation du système racinaire du riz pluvial : mise au point d'une méthode, effets de conditions de culture, dynamique et relation avec le fonctionnement de la culture. Mémoire de fin d'étude pour obtenir le diplôme d'ingénieur Agronome, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo-Madagascar. 48 p.

## **LISTE DES ANNEXES**

Annexe 1 : Présentation du CFAMA.....	II
Annexe 2 : Fiche itineraire technique du maïs .....	III
Annexe 3 : Méthode de mesure d'infiltration.....	IV
Annexe 4 : Densité apparente, densité réelle et porosité du sol .....	IV
Annexe 5 : Forme de la tache d'humectation .....	V
Annexe 6 : Pénétrométrie et humidité du sol .....	V
Annexe 7 : Tableaux d'analyse de variances (ANOVA) .....	V
Annexe 8 : Coefficient et statistique de la régression polynomiale .....	VII
Annexe 9 : Formes d'enracinement.....	VII

## **Annexe 1 : Présentation du CFAMA**

### 1. Création

Dans le cadre du développement rural où le machinisme agricole joue un rôle prépondérant dans la lutte contre la pauvreté et dans l'amélioration des conditions de travail, le CFAMA a été créé par l'arrêté n° 82-248 du 27 Mai 1982 comme Entreprise Publique à caractère Industriel et Commercial (EPIC) dans le cadre de formation en machinisme agricole.

### 2. Statut

Le CFAMA est un Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial soumis aux règles de la comptabilité commerciale. Il est placé sous tutelle technique du Ministère des Finances et du Budget.

### 3. Mission

Le CFAMA d'Antsirabe a pour mission principale de développer et de promouvoir la mécanisation agricole dans tout Madagascar, par le biais de la formation diplômante et/ou qualifiante, et par la présentation des matériels de productions aux opérateurs agricoles et ruraux.

### 4. Objectif global

Contribuer à la politique d'autosuffisance alimentaire et à la réduction de la pauvreté, tout en préservant l'environnement à travers la mécanisation agricole.

### 5. Objectifs spécifiques

Promouvoir la mécanisation agricole afin d'accroître la productivité surtout dans les principales régions agricoles de Madagascar (Régions rizicoles de Boeny, Alaotra, Vakinankaratra, régions laitières telles que le triangle laitier...).

### 6. Stratégie

- Impliquer et motiver les différents responsables à tous les niveaux ;
- Développer le partenariat et le marketing ;
- Rechercher l'extension des activités porteuses.

### 7. Résultats attendus

- ✓ Des techniciens malagasy spécialisés en mécanisation agricole seront suffisamment disponibles et opérationnels, répondant aux besoins des utilisateurs ;
- ✓ La mécanisation agricole à Madagascar sera développée et généralisée ;
- ✓ Le CFAMA et son personnel seront pris comme référentiel en matière de promotion de la mécanisation.

## Annexe 2 : Fiche itinéraire technique du maïs

<b>Saison de culture</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Novembre à décembre</li></ul>
<b>Semences</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Cultivars améliorés IRAT 200</li><li>– CIRAD 412</li><li>– Mailaka</li></ul>
<b>Zones de culture et exigence en sol</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Tanety riches, en bas de pente et sur sols de plaine non inondables, sols riches et pas trop sableux, bien structurés, sols pas trop acides</li></ul>
<b>Préparation du sol</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Labour une fois au moins tous les trois ans</li><li>– Offsetage sur 15-20 cm de profondeur.</li><li>– - Culture sur billons</li></ul>
<b>Semis</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Ecartement de 40 cm (ou 50) x 100 cm</li><li>– Dose de semence/ha : 25 kg /ha soit 2 à 3 graines par poquet.</li><li>– Densité de population : + 62 500 pieds/ha (billonnage mécanisé)</li><li>– Profondeur de semis : 3 à 5 cm</li></ul>
<b>Entretien</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Démariage, au besoin, au stade 4-5 feuilles ou 15-20 jours après la levée</li><li>– Eviter l'excès d'eau sur la parcelle</li><li>– Chronologie des opérations culturales suivantes à respecter :</li><li>– Sarclages-Urée-Buttage-Irrigation-Traitements</li></ul>
<b>Fertilisation</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Engrais de couverture : 150 kg/ha d'Urée fractionnée en :</li><li>– +100 kg/ha en début de la phase végétative (stade 5 feuilles, soit 15-20 jours après l'émergence de la plantule)</li><li>– + 50 kg/ha en pleine phase végétative (stade 9-10 feuilles, soit 25-40 jours après le premier apport d'urée).</li></ul>
<b>Irrigation (sans apport de pluie)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– 6 000 à 7 000 m<sup>3</sup> selon les fréquences suivantes :</li><li>– Semis-montaison (45 jrs) = 10 à 15 jours d'intervalle suivant le type de sol</li><li>– Montaison-début maturation = 7 jours</li><li>– Début maturation-récolte = 10-15 jours</li><li>– Très sensible au stress hydrique de 15 jours avant la floraison mâle à 15 jours après la floraison</li></ul>
<b>Récolte</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Quand les plantes commencent à jaunir et quand le point noir est visible à la base du grain</li><li>– Un taux d'humidité compris entre 9 et 15% offre les meilleures conditions de stockage</li><li>– Rendements moyens : jusqu'à plus de 5 tonnes par hectare selon le cultivar et le climat</li></ul>
<b>Cycle végétatif</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Cycle en environ 110 jours</li><li>– Du semis à la floraison : 55 jours</li><li>– De la floraison à la maturité : 55 jours</li></ul>



Variété du maïs cultivée

### Annexe 3 : Méthode de mesure d'infiltration

La méthode de mesure d'infiltration selon Roose *et al.* (1993) consiste à choisir une zone représentative d'un état de surface du sol, si possible en période sèche, sans pluie depuis plus de dix jours. Ensuite, on enfonce délicatement et bien verticalement le cylindre en perturbant le moins possible la surface du sol. L'étanchéité est assurée en tassant le sol autour du cylindre et en y posant un cordon d'argile. Un papier-filtre est posé au fond du cylindre pour éviter de créer une suspension en versant l'eau, de même qu'une réglette posée au niveau du sol pour lire le niveau d'eau. L'eau est versée rapidement (sur une cuillère à soupe tordue pour casser l'énergie de chute) jusqu'à atteindre 5 cm à la réglette. On pose une brindille sur la réglette pour observer sans erreur de parallaxe le niveau d'eau descendant dans le cylindre. Le temps  $T_0$  et les temps de passage du niveau d'eau à chaque centimètre de la réglette sont notés. Après la première infiltration, l'on remet 5 cm d'eau sur la surface mouillée du sol et poursuivre le chronométrage. Quand l'eau disparaît de la surface du sol, le cylindre et le filtre sont enlevés et une fosse est creusée en coupant la tache humide au centre du cylindre initial jusqu'à atteindre la limite de la tache d'humectation. La forme de la tache dans la direction perpendiculaire à la pente est dessinée. La profondeur humectée et les diamètres tous les 5 cm sont également notés.

### Annexe 4 : Densité apparente, densité réelle et porosité du sol

#### Densité apparente (kN/m<sup>3</sup>)

	L0	L1	L2	L3	L4
0-10 cm	8,8	9,8	9,2	9,7	10,7
10-20 cm	9,0	10,6	9,1	9,4	11,1
20-30 cm	8,8	8,75	10,9	8,9	12
Moyenne	8,9	9,7	9,7	9,3	11,3
Ecart type	0,1	0,9	1,0	0,4	0,7

#### Densité réelle (kN/m<sup>3</sup>)

	L0	L1	L2	L3	L4
0-10 cm	25,6	25,6	25,55	25,55	25,63
10-20 cm	25,5	25,5	25,53	25,53	25,6
20-30 cm	26,8	26,8	26,8	26,8	25,61
Moyenne	25,97	25,97	25,96	25,96	25,61
Ecart type	0,72	0,72	0,73	0,73	0,02

#### Porosité (%)

	L0	L1	L2	L3	L4
0-10 cm	65,71	61,72	63,99	62,04	58,25
10-20 cm	64,57	58,43	64,36	63,18	56,64
20-30 cm	67,00	67,35	59,33	66,79	53,14
Moyenne	65,76	62,50	62,56	64,00	56,01
Ecart type	1,22	4,51	2,80	2,48	2,61

## Annexe 5 : Forme de la tache d'humectation



Forme évasée de la tache d'humectation

## Annexe 6 : Pénétrométrie et humidité du sol

### Pénétrométrie (Kg/cm<sup>2</sup>)

Profondeur (cm)	L0	L1	L2	L3	L4
0	0	0	0	0	0
5	1,5	1,27	1,3	1,4	1,01
10	1,5	1,4	1,55	1,2	1,2
15	2,8	1,98	1,59	1,9	1,8
20	2,6	2,7	2,4	2,5	1,91
25	2,3	2,1	2,3	2,2	1,86
Moyenne	2,1	1,9	1,8	1,8	1,6
Ecart type	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4

### Humidité du sol lors des mesures pénétrométriques (%)

Profondeur (cm)	L0	L1	L2	L3	L4
0-10	15,4	15,7	15,8	15,9	16,4
10-20	28,5	28,1	16,2	15,9	17,8
20-30	29,6	29,8	29,2	29,5	19,3
Moyenne	24,5	29,0	22,7	22,7	18,6
Ecart type	7,9	0,9	6,5	6,8	0,8

## Annexe 7 : Tableaux d'analyse de variances (ANOVA)

### Temps moyen d'infiltration à sec

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)
Blocs	2	3,15	1,573	0,702	0,52356
Traitements	4	88,97	22,243	9,931	0,00342 **
Résidus	8	17,92	2,240		

Codes de significativité : 0 '\*\*\*\*' 0,001 '\*\*\*' 0,01 '\*\*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Df : degré de liberté

F value : statistique de Fisher

Sum sq : somme des carrés des écarts

Pr : probabilité

Mean sq : carré moyen

### Temps moyen d'infiltration après humectation

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)
Blocs	2	31,96	15,98	2,337	0,1587
Traitements	4	163,05	40,76	5,963	0,0159 *
Résidus	8	54,69	6,84		

### Profondeur moyenne humectée

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)
Blocs	2	1,153	0,5765	4,316	0,05354.
Traitements	4	4,619	1,1548	8,645	0,00529 **
Résidus	8	1,069	0,1336		

**Diamètre moyen de la tache d'humectation**

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)
Blocs	2	5,49	2,743	0,738	0,5078
Traitements	4	49,11	12,277	3,305	0,0706
Résidus	8	29,72	3,715		

**Infiltration moyenne à sec**

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)
Blocs	2	550	275	0,526	0,61011
Traitements	4	17776	4444	8,495	0,00559 **
Résidus	8	4185	523		

**Infiltration moyenne après humectation**

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)
Blocs	2	790	394,9	2,562	0,13805
Traitements	4	5281	1320,3	8,566	0,00545 **
Résidus	8	1233	154,1		

**Infiltration moyenne finale**

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)
Blocs	2	644	321,9	1,297	0,32508
Traitements	4	10014	2503,4	10,090	0,00325 **
Résidus	8	1985	248,1		

**Profondeur maximale d'enracinement**

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)
Répétitions	3	10,4	3,47	1,185	0,357
Traitements	4	1216,5	304,13	103,974	3,32e-09 ***
Résidus	12	35,1	2,93		

**Largeur maximale d'enracinement**

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)
Répétitions	3	10,4	3,47	1,185	0,357
Traitements	4	1216,5	304,13	103,974	3,32e-09 ***
Résidus	12	35,1	2,93		

**Horizon difficile à traverser par les racines**

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)
Répétitions	3	1,2	0,39	1,702	0,22
Traitements	4	808,5	202,11	874,798	1,11e-14 ***
Résidus	12	2,8	0,23		

**Surface de concentration des racines**

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)
Répétitions	3	942	314	0,524	0,674
Traitements	4	54004	13501	22,543	1,65e-05 ***
Résidus	12	7187	599		

**Profondeur d'apparition des premières racines**

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)
Répétitions	3	0,808	0,269	1,257	0,333
Traitements	4	24,488	6,122	28,577	4,73e-06 ***
Résidus	12	2,571	0,214		



### Annexe 8 : Coefficient et statistique de la régression polynomiale

Résidus				
Min	1Q	Médiane	3Q	Max
-30,063	-9,634	-5,114	11,309	41,041
Coefficients				
	Estimation	Erreur standard	t value	Pr(> t )
(Interception)	-19366,52	7330,76	-2,642	0,0229 *
Densité apparente du sol	5523,99	2146,05	2,574	0,0259 *
I (Densité apparente du sol <sup>2</sup> )	-519,64	208,25	-2,495	0,0298 *
I (Densité apparente du sol <sup>3</sup> )	16,16	6,70	2,412	0,0345 *

Codes de significativité : 0 '\*\*\*\*' 0,001 '\*\*' 0,01 '\*' 0,05 '.' 0,1 '.' 1

Erreur standard résiduelle: 20,92 avec 11 degrés de liberté

R<sup>2</sup> : 0,5544

R<sup>2</sup> ajusté : 0,4329

Statistique F: 4,563 avec 3 et 11 degrés de liberté

Valeur de p : 0,02608

### Annexe 9 : Formes d'enracinement



**Forme entonnoir**



**Forme demi-sphère**

## Table des matières

Dédicace.....	i
Remerciements.....	ii
Sommaire.....	iii
Liste des illustrations.....	iv
Liste des tableaux.....	iv
Liste des figures.....	iv
Liste des cartes.....	iv
Liste des photos.....	iv
Liste des sigles et abréviations.....	v
Résumé.....	vi
Abstract.....	vi
Introduction.....	2
1. Matériel et méthodes.....	5
1.1 Matériel.....	5
1.1.1 Milieu d'étude.....	5
1.1.1.1 Situation géographique.....	5
1.1.1.2 Conditions climatiques.....	7
1.1.1.3 Morphopédologie et réseau hydrographique.....	7
1.1.1.4 Aspects humain et économique.....	10
1.1.2 Matériel utilisé.....	10
1.1.2.1 Matériel végétal.....	10
1.1.2.2 Matériel de labour.....	10
1.1.2.3 Autres matériels.....	10
1.1.3 Notion de degré de mécanisation, travail du sol et importance du système racinaire.....	11
1.1.3.1 Différents degrés de mécanisation.....	11
1.1.3.2 Travail du sol.....	122
1.1.3.3 Intérêts de la connaissance du système racinaire.....	12
1.2 Méthodes.....	12
1.2.1 Présentation du dispositif expérimental.....	12
1.2.2 Mesure des paramètres physiques du sol.....	14
1.2.2.1 Texture.....	14
1.2.2.2 Structure.....	14
1.2.2.3 Stabilité structurale.....	14
1.2.2.4 Densité.....	15
1.2.2.5 Porosité.....	15
1.2.2.6 Vitesse et profondeur d'infiltration de l'eau.....	15
1.2.2.7 Pénétrométrie.....	16
1.2.3 Evaluation sur les cultures.....	16

1.2.3.1	Méthodes d'étude des racines .....	16
1.2.3.2	Méthode de profil cultural.....	17
1.2.4	Analyses statistiques des données.....	17
1.2.5	Limites du travail .....	18
2.	Résultats .....	20
2.1	Effets du degré de mécanisation sur les paramètres physiques du sol .....	20
2.1.1	Teneur en matériaux du sol.....	20
2.1.2	Structure et indice de battance du sol .....	20
2.1.3	Densité et porosité du sol.....	21
2.1.4	Vitesse d'infiltration et profondeur humectée .....	22
2.1.4.1	Durée d'infiltration.....	22
2.1.4.2	Capacité d'infiltration corrigée .....	23
2.1.5	Pénétrométrie du sol .....	24
2.2	Effets du degré de mécanisation sur le développement racinaire du maïs .....	25
2.2.1	Evolution de la profondeur maximale et la largeur d'enracinement, l'horizon difficile à traverser et l'orientation des racines. ....	25
2.2.2	Comportement des racines suivant les horizons du sol .....	25
2.2.3	Distribution des racines suivant la profondeur.....	26
2.2.4	Relation entre la densité du sol et le nombre de racines du maïs .....	27
2.3	Synthèse des effets du degré de mécanisation du travail du sol sur les propriétés physiques du sol et l'enracinement du maïs.....	28
3.	Discussions et perspectives .....	30
3.1	Par rapport aux paramètres physiques du sol sous différents degrés de mecanisation....	30
3.1.1	Teneur en matériaux du sol.....	30
3.1.2	Structure et battance du sol.....	30
3.1.3	Densité et porosité du sol.....	30
3.1.4	Infiltration de l'eau .....	31
3.1.5	Pénétrométrie du sol .....	31
3.2	Par rapport au développement racinaire du maïs.....	32
3.2.1	Profondeur et largeur d'enracinement .....	32
3.2.2	Comportement des racines suivant les horizons du sol .....	32
3.2.3	Distribution des racines suivant la profondeur .....	33
3.2.4	Relation entre la densité du sol et le nombre de racines du maïs .....	33
3.3	Suggestions et perspectives .....	34
	Conclusion.....	37
	Références bibliographiques.....	38
	Liste des annexes.....	I
	Table des matières.....	VIII

---