

**ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES**  
**Département AGRICULTURE**  
**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO**  
**Ambohitsaina-Ankatso**



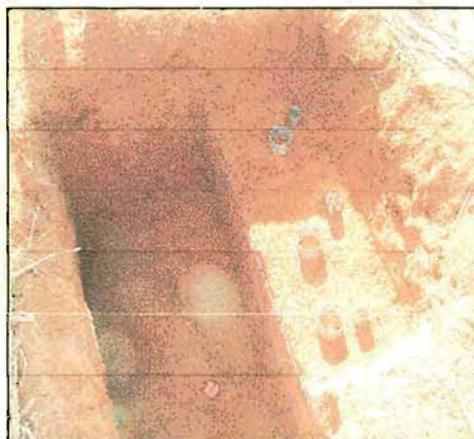
**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU  
DIPLOME D'INGENIEUR EN AGRONOMIE**

**ETUDES COMPARATIVES DES PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS  
SOUS DIFFERENTS SYSTEMES DE CULTURE EN SEMIS DIRECTS  
SUR COUVERTURE VEGETALE ET EN LABOUR :**  
**Cas de la station Tafa à ANDRANOMANELATRA**

**Réalisé et présenté par : RAKOTONIAINA NIVONDRAHONA Herizo**

**Promotion INTSA 1998-2003**

**13 Septembre 2003**

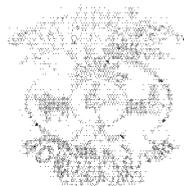
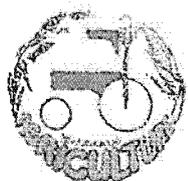


**O.N.G « Tafa »**

**TAny sy Fampandrosoana**



**ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES**  
**Département AGRICULTURE**  
**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO**  
**Ambohitsaina-Ankatso**



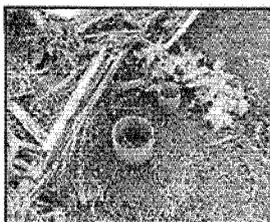
**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU  
DIPLOME D'INGENIEUR EN AGRONOMIE**

**ETUDES COMPARATIVES DES PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS  
SOUS DIFFERENTS SYSTEMES DE CULTURE EN SEMIS DIRECTS  
SUR COUVERTURE VEGETALE ET EN LABOUR :**  
**Cas de la station Tafa à ANDRANOMANELATRA**

**Réalisé et présenté par : RAKOTONIAINA NIVONDRAHONA Herizo**

**Promotion INTSA 1998-2003**

**13 Septembre 2003**



**O.N.G « Tafa »**

**TAny sy Fampanandrosoana**



## DEDICACES

*Je dédie ce livre en l'honneur de :*

*\* l'Eternel Dieu tout puissant car « Par la grâce de Dieu je suis ce que je suis »,*

*\* Mes Parents, Harisoa, mes frères et sœurs, toute ma famille et tous mes amis,*

*\*L'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques.*

« Ne reste jamais assis, pleurant ou fronçant les sourcils. Mais mène ta barque toi-même »

Lord Baden Powell



## REMERCIEMENTS

Ces six mois de stage m'ont permis d'avoir une excellente formation et de connaître le monde professionnel, et surtout de voir les réalités au niveau de la vie paysanne.

Nous avons le plaisir de trouver ici l'occasion de remercier toutes les personnes et entités contribuant à la réalisation de ce mémoire,

*Nos vifs remerciements s'adressent particulièrement à :*

-Monsieur RANDRIAMIHARISOA Robert Philipposon, Docteur ès-sciences, Professeur titulaire de l'Université, Chef du Département AGRICULTURE à l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), notre Tuteur, président du jury, pour ses conseils et soutiens durant le stage et au cours de la rédaction, et de présider le jury de cette soutenance.

-Monsieur Bertrand MULLER, Docteur, agronome chercheur du CIRAD, collaborateur du Projet FFEM à Madagascar, maître de stage, membre du jury ; pour m'avoir donné des conseils, me soutenir moralement et m'avoir aidé dans la rédaction du mémoire.

-Monsieur RAKOTO Benjamin, Enseignant Chercheur à l'ESSA, membre du jury qui nous a prodigué ses précieuses recommandations tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

-Monsieur RAZAKAMIARAMANANA, Chef de station régionale du FOFIFA Antsirabe, Chercheur Agronome, membre du jury, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire et appuyé mon travail sur le terrain.

Je tiens encore à exprimer toute ma gratitude aux nombreuses personnes et entités car sans eux ce livre ne serait pas illustré,

Nos remerciements vont particulièrement :

- Au pôle PCP-SCRID (Antsirabe) pour ses soutiens moral et financier,
- A l'ONG TAFa, pour nous avoir permis à faire l'étude sur ses différents sites et parcelles d'expérimentation.
- IRD-MOST pour leur collaboration
- MOST-CIRAD pour les analyses de laboratoire,
- Laboratoire Radio Isotopes d'Antananarivo (LRI)
- A tous les personnels de l'ESSA, FOFIFA, CIRAD, TAFa pour leur aimable collaboration,

J'adresse aussi mes vives recommandations à mes Parents, mes Frères et Sœurs, ma Famille, mes Amis qui ont volontairement contribué à faire de ce mémoire une réussite particulière.

## TABLE DES MATIERES

Dédicaces	
Remerciements	
Sigles et abréviations	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des cartes	
Liste des images photographiques	
Liste des annexes	
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>1 PRESENTATION ET OBJECTIFS DE L'ETUDE.....</b>	<b>2</b>
<b>2 CADRE DE L'ETUDE.....</b>	<b>4</b>
2.1 Milieu physique.....	4
2.1.1 Situation géographique.....	4
2.1.2 Conditions climatiques.....	4
2.1.3 Descriptions géologique et pédologique.....	6
2.1.4 Topographie du milieu.....	8
2.2 Milieu humain et agriculture traditionnelle.....	9
2.2.1 Place de l'agriculture à Madagascar.....	9
2.2.2 Une société traditionnelle à forte migration.....	9
2.2.3 Mises en valeur traditionnelle des terres dans la région.....	10
2.2.4 Le développement du riz pluvial.....	13
2.3 Problèmes d'érosion et dégradations liées aux labours.....	14
2.3.1 Rappels sur le travail mécanique du sol ou « LABOUR ».....	14
2.3.2 Les problèmes d'érosion et dégradation des sols :.....	15
2.4 Le semis-direct sur couverture végétale (SCV) comme solution.....	17
2.4.1 Les raisons du semis-direct sur couverture végétale (SCV) à Madagascar.....	17
2.4.2 Principes et originalités du concept SCV.....	17
2.4.3 Caractéristiques du fonctionnement des SCV.....	18
2.4.4 Travaux et résultats sur les SCV à Madagascar.....	19
2.5 Cadre institutionnel de l'étude.....	21
2.5.1 Le PCP SCRID : FOFIFA, UNIVERSITE, CIRAD.....	21
2.5.2 L'ONG Tafa.....	22
2.5.3 Le projet IRD-FFEM Séquestration du Carbone.....	23
<b>3 MATERIEL ET METHODES.....</b>	<b>25</b>
3.1 Les caractéristiques physiques du sol : présentation et mesure.....	25
3.1.1 Texture et granulométrie.....	25
3.1.2 Structure.....	25
3.1.3 Densité réelle.....	26
3.1.4 Densité apparente.....	27
3.1.5 Porosités, macroporosité et microporosité.....	28
3.1.6 Compacité, dureté et pénétrométrie.....	32
3.1.7 Caractéristiques hydriques.....	33

3.2	Quelques références concernant les effets des systèmes SCV sur les caractéristiques physiques des sols .....	35
3.2.1	Effets escomptés des SCV et facteurs influençant l'état structural du sol : .....	35
3.2.2	Quelques références chiffrées concernant les effets des SCV sur les propriétés physiques des sols : .....	36
3.3	Les mesures mises en œuvre .....	37
3.3.1	Les sites d'étude.....	37
3.3.2	Les systèmes étudiés .....	37
3.3.3	Vue d'ensemble des mesures réalisées .....	39
3.3.4	Réalisation de la campagne de mesures de densités et de pénétrométrie .....	40
3.3.5	Réalisation des mesures de pénétrométrie.....	43
3.3.6	Seconde campagne : prélèvements de mottes pour étude des classes de porosités par la méthode du porosimètre au mercure.....	46
3.3.7	Troisième campagne : prélèvements d'échantillons sur fosses pour études des caractéristiques de rétention (courbes pF) .....	47
<b>4</b>	<b>RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....</b>	<b>49</b>
4.1	Densités apparentes .....	49
4.1.1	Densités apparentes sur le site d'ANDRANOMANELATRA.....	49
4.1.2	Densités apparentes sur le site de BEMASOANDRO.....	52
4.1.3	Synthèse des résultats de densités apparentes .....	54
4.2	Densités sèches (Densités réelles) .....	55
4.3	Porosités .....	56
4.3.1	Porosités déterminées à partir des mesures de densités apparentes et sèches ..	56
4.3.2	Etude de la porosité par porosimétrie au mercure .....	57
4.3.3	Conclusions sur les porosités.....	59
4.4	Pénétrométrie.....	59
4.5	Courbes pF et réserve utile.....	61
4.5.1	Courbes pF.....	61
4.5.2	Réserves utiles .....	62
	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>63</b>

Liste bibliographique  
ANNEXES

## SIGLES ET ABREVIATIONS

<b>ANAE</b>	-Association Nationale d'Actions Environnementales
<b>AMEGES</b>	-Association Malagasy pour l'Etude et la Gestion des Sols
<b>CIRAD-CA</b>	-Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Département des Cultures Annuelles
<b>CIRAGRI</b>	-CIRconscription de l'AGRIculture
<b>CIRVA</b>	-CIRconscription de Vulgarisation Agricole
<b>CNEARC</b>	-Centre National d'Etudes Agronomiques des Régions Chaudes
<b>CR</b>	-Capacité de Rétention
<b>HSK</b>	-Haricot-Soja sur Kikuyu
<b>ESSA</b>	-Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
<b>FAFIALA</b>	-Fampiroboroana sy Fikojakojana ALA
<b>FFEM</b>	-Fonds Français pour l'Environnement Mondial
<b>FIFAMANOR</b>	-Fiompiana sy Fambolena Malagasy NORveziana
<b>FOFIFA</b>	-Foibem-pirenena momba ny Fikarohana ampin'ny Fampandrosoana ny eny Ambanivohitra
<b>GSDM</b>	-Groupement Semis-Direct de Madagascar
<b>HP</b>	-Humidité Pondérale
<b>HV</b>	-Humidité Volumique
<b>IN</b>	- Interligne (Inter Rang)
<b>IRD</b>	-Institut de Recherche pour le Développement (ex ORSTOM)
<b>L</b>	-Ligne (rang)
<b>LB</b>	-Labour
<b>MMD</b>	-Maïs- Maïs sur Desmodium
<b>MO</b>	-Matière Organique
<b>MOST</b>	- laboratoire Matière Organiques des sols Tropicaux, CIRAD
<b>MP</b>	-Maïs-Pomme de terre
<b>MS</b>	-Maïs-Soja
<b>ONG</b>	-Organisation Non Gouvernementale
<b>PCP-SCRID</b>	-Pôle de Compétences en Partenariat Systèmes de cultures et Riziculture Durable
<b>pFp</b>	-point de flétrissement permanent
<b>PRA</b>	-Projet Riz d'Altitude
<b>RS</b>	-Riz-Soja
<b>RU</b>	-Réserve utile
<b>SCV</b>	-Système de Culture sur Couvertures Végétales
<b>SD</b>	-Semis-Direct
<b>TAFA</b>	-TAny sy Fampandrosoana (Terre et développement) (ONG)
<b>TCS</b>	-Techniques Culturelles Simplifiées
<b>UR</b>	-Unité de Recherche

## LISTE DES TABLEAUX

- Tableau n°1 : Pluviométries et températures à Antsirabe (1500 m)  
Tableau n° 2 : Caractéristiques chimiques de différents sols de tanety typiques du Vakinankaratra  
Tableau n°3 : Lieux de mise au point des systèmes SCV à Madagascar  
Tableau n°4 : Echelle de classement des textures du sol  
Tableau n°5 : Valeurs représentatives de densité apparente  
Tableau n°6 : Typologie des porosités et états et disponibilités de l'eau du sol  
Tableau n°7 : Facteurs défavorables influençant l'état structural du sol et effets des SCV  
Tableau n°8 : Valeurs des densités apparentes par type de travail du sol à Goiás, Brésil  
Tableau n° 9 : Porosité totale des situations étudiées à Santa Helena de Goiás, Brésil  
Tableau n°10 : Infiltration moyennes et corrigées à Goiânas, Brésil  
Tableau n°11 : Pénétrromètre : correspondances entre forces lues et résistances  
Tableau n°12 : Porosités totales d'après densités au cylindre et au pycnomètre  
Tableau n° 13 : Porosités sur mottes par porosimétrie au mercure

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : diagramme ombrothermique d'Antsirabe  
Figure 2 : occupation agricole de l'espace (D'après OLIVIER, 2000, et FOFIFA, 1995)  
Figure 3 : pluviométrie et températures des sites d'Andranomanelatra au cours de la saison de culture 2002- 2003  
Figure 4 : disposition des sites de prélèvements et mesures sur les parcelles  
Figure 5 : positions des mesures sur les profils  
Figure 6 : étalonnage des valeurs pénétrométriques  
Figure 7 : emplacement des fosses profondes et positionnement des cylindres  
Figures 8 : densités apparentes 0 -40 cm à Andranomanelatra selon les systèmes  
Figures 9 : densités apparentes 0 -40 cm à Andranomanelatra selon les fumures  
Figure 10 : densités apparentes en profondeur (Andranomanelatra)  
Figure 11 : comparaison des densités apparentes mesurées sur les fosses profondes avec celles mesurées lors de la première campagne aux 4 coins des parcelles  
Figures 12 : densités apparentes RS 0 -40 cm Bemasoandro selon le travail du sol  
Figures 13 : densités apparentes RS 0 -40 cm Bemasoandro selon les fumures  
Figures 14 : densités apparentes MP 0-40 cm Bemasoandro selon travail du sol  
Figures 15 : densités apparentes MP 0-40 cm Bemasoandro selon les fumures  
Figures 16 : densités apparentes 0-40 cm Bemasoandro tous traitements  
Figure 17 : densités sèches déterminées au pycnomètre  
Figure 18 : spectres poraux des mottes  
Figures 19 : répartition et distribution de la porosité  
Figures 20 : résistances au pénétromètre tous traitements à Bemasoandro  
Figures 21 : résistances au pénétromètre tous traitements à Andranomanelatra  
Figures 22 : résistances et densités apparentes sous HSK SD à Andranomanelatra  
Figures 23 : exemples de courbes pF sur échantillons remaniés  
Figures 24 : humidités volumiques aux pF 2 et pF 4,2 (échantillons remaniés)  
Figures 25 : réserves utiles (échantillons remaniés)

## LISTE DES CARTES

CARTE n°1 : ISOHYETES ANNUELLES

CARTE n° 2: ESQUISSE DE CARTE PEDOLOGIQUE

CARTE n°3: Rapport Tanety cultivable/Tanety cultivée

CARTE n° 4: Sites d'intervention Pôle « PCP SCRID & TAFE » dans la région du VAKINANKARATRA

## LISTE DES IMAGES PHOTOGRAPHIQUES

*Photo n°1 : mulch en surface du traitement maïs-soja SCV F2 à Andranomanelatra*

*Photos n°2 : opérations réalisées pour les mesures de densités apparentes au cylindre*

*Photos n°3 : mesure de la dureté au pénétromètre et détail de la jauge de pression*

*Photos n°4 : études sur fosses profondes à Andranomanelatra : prélèvements 0-5cm*

*Photos n°5 : études sur fosses profondes à Andranomanelatra : préparation du profil et prélèvements en profondeur*

## LISTE DES ANNEXES

ANNEXE n°I : Généralités sur les sites d'études

ANNEXE n°II : Plan du site de BEMASOANDRO

ANNEXE n°III : Plan du site d'ANDRANOMANELATRA

ANNEXE n°IV: Tableau des données brutes « météorologie de la commune  
d'Andranomanelatra (valeurs décadales)

ANNEXE n°V : Fonctionnement du porosimètre

ANNEXE n°VI: Données brutes et données statistiques des valeurs pénétrométriques de Bemasoandro

ANNEXE n°VII : Données brutes et données statistiques des valeurs pénétrométriques d'Andranomanelatra

ANNEXE n°VIII: Données brutes des densités apparentes Bemasoandro

ANNEXE n°IX : Données brutes des densités apparentes Andranomanelatra

ANNEXE n°X : Données brutes des valeurs des pF

ANNEXE n°XI : Données densités réelles, humidités, et porosités

## INTRODUCTION

Madagascar est un pays à vocation agricole dont la majeure partie du système de production est dominée par la Riziculture irriguée : pays typiquement rizicole.

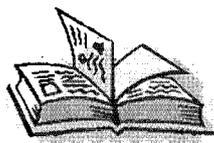
Actuellement, la pression démographique (démographie galopante) menace l'économie Nationale : la production ne suffit plus pour satisfaire les besoins de la population.

Au niveau du secteur rural surtout au niveau des paysans producteurs, l'espace cultivée par habitant diminue de plus en plus et c'est la raison d'une surexploitation des terres : les bas-fonds sont alors saturés donc sujets à une surexploitation agricole qui est la cause principale de leur perte de fertilité et de leur dégradation.

Face à tout ça, pour survivre, les ruraux cherchent d'autres alternatives : exploitation et aménagement des bassins versants surtout les Tanety qui sont pauvres chimiquement et physiquement. Or, la majeure partie des paysans malagasy ne pratique pas la Défense et Restauration des Sols donc dégradation et érosion au niveau des versants et ensablement des bas-fonds.

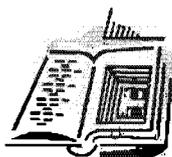
Actuellement, notre paysage agricole est détruit alors que nous n'avons pas encore senti le goût de son fruit de production, ; il est maintenant nécessaire de trouver des solutions pour compenser ces pertes et retards : c'est la raison du développement rapide et durable que l'Etat mène actuellement.

C'est la raison de l'intégration du *Système sur Couverture Végétale* à Madagascar qui peut répondre aux problèmes posés par la dégradation et l'érosion du milieu. C'est surtout la raison d'existence du Pôle PCP SCRID (Pôle de Compétence en Partenariat, Systèmes de Cultures et Riziculture Durable) à Antsirabe là où notre étude a été effectuée afin de mieux comprendre les effets des systèmes en semis-direct sur couverture végétale (SCV) sur les propriétés physiques et hydriques du sol, en comparaison avec les systèmes avec labour.



*Partie I:*

**PRESENTATION ET OBJECTIFS  
DE L'ETUDE**



## 1 PRESENTATION ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Ce travail s'est déroulé dans le cadre des actions de recherches sur les systèmes de culture en semi-direct et couverture végétale menées conjointement par le FOFIFA, le CIRAD et l'Université d'Antananarivo au sein du Pôle de Compétences en Partenariat "Systèmes de culture et la riziculture durable" (PCP-SCRID), et en collaboration avec l'ONG Tafa et le GSDM (Groupe Semi Direct à Madagascar)

Le pôle PCP SCRID s'intéresse aux systèmes de culture intégrant du riz pluvial (systèmes de culture de "tanety") qui sont susceptibles d'être durables. En pratique il travaille sur les systèmes en semis direct et couverture végétale (SCV). Ces systèmes ont en effet fait leur preuve dans divers pays du monde et à Madagascar également pour empêcher la dégradation des sols et maintenir, voire même améliorer la fertilité. La justification de ces pratiques conservatrices n'est pas à faire vues les importantes dégradations des terres de tanety que l'on peut observer et qui se généralisent suite à leur mise en culture avec les techniques traditionnelles de labour et brûlis. D'ailleurs on sait que ces dégradations des tanety causent des préjudices aux rizières irriguées. Les résultats accumulés dans le monde sur des millions d'hectares (Brésil, Chili, etc.) et à Madagascar depuis 10 ans en parcelles de démonstration (ONG Tafa) et depuis 3-4 ans en parcelles paysannes (Tafa, FIFAMANOR, FAFIALA, ANAE, etc.), témoignent de l'intérêt de ces techniques SCV.

Il faut maintenant arriver à assurer leur large diffusion et adoption, et pour cela il est nécessaire de mieux connaître le fonctionnement des systèmes SCV, leurs contraintes et limites en relation aux conditions du milieu et des paysans. C'est en les comprenant mieux qu'on pourra les améliorer, et mieux les choisir et conseiller aux agriculteurs en fonction de leurs situations (aspects technico-socio-économiques) et conditions du milieu. C'est là la raison d'être du PCP SCRID FOFIFA-Université-CIRAD. Il a également un devoir de formation des jeunes agronomes et scientifiques malgaches à ces techniques, et également à la recherche agronomique. Le PCP SCRID est donc une structure de recherche et de formation.

Au sein du pôle nous nous sommes intégrés dans les actions menées par les agronomes, qui ont pour objectif général de caractériser et comprendre les phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui sont mis en œuvre dans les fonctionnements des systèmes SCV.

**Dans ce cadre notre travail a eu pour objectif d'étudier certaines caractéristiques physiques du sol sous différents systèmes de culture SCV ou avec labour, dans le but d'évaluer et comparer les effets de ces systèmes de culture sur ces caractéristiques. Nous avons pu étudier les propriétés physiques suivantes :**

- densités apparentes et densités réelles ;
- porosité totale ;
- appréciation de la dureté, par pénétrométrie ;
- caractéristiques de la porosité, par porosimétrie au mercure ;
- caractéristiques de rétention en eau : courbes pF et réserves utiles.

Ces informations ont été recueillies au cours de différentes campagnes de mesures dans différents sites et sous différents systèmes SCV, sur des parcelles gérées par l'ONG Tafa (Tany sy Fampanandroana), que nous remercions encore ici.

Une partie de cette étude a en pratique été conduite à la fois par l'équipe des agronomes du pôle et par un projet de recherche de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement, ex ORSTOM) visant à étudier la séquestration du carbone par les systèmes de culture en semis direct et couverture végétale, projet financé par le FFEM (Fonds Français pour l'Environnement Mondial). En effet, afin de minimiser les perturbations causées aux parcelles de TAFÀ, et pour rechercher les complémentarités, les interventions des uns et des autres ont été coordonnées. Le travail du Projet Séquestration du carbone a été dirigé localement par une jeune thésarde malgache de l'IRD, Mlle Tantely RAZAFIMBELO que nous avons secondée. **En conséquences les résultats de densités apparentes présentés dans le cadre de ce travail sont des résultats à exploiter en commun par Mlle Tantely, l'IRD, le PCP et l'ONG TAFÀ.**

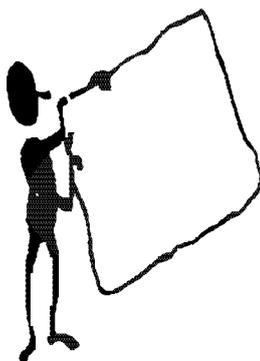
Nous avons travaillé également avec un étudiant français, Mr David Ferrat, qui est venu en stage à Madagascar en mai pour effectuer des prélèvements au cylindre (échantillons non remaniés) et de mottes pour les ramener en France au laboratoire MOST du CIRAD à Montpellier, pour étudier leur porosité et leur caractéristiques de rétention (courbes pF). **Nous partageons donc ces résultats avec lui.**

**Malheureusement nous devons regretter le démarrage très tardif des interventions sur le terrain, au mois d'avril seulement** (alors que nous étions sur place dès novembre), du fait de l'arrivée tardive des équipements nécessaires aux études (en mars puis en mai!) et de la difficulté à coordonner les interventions des uns et des autres. Or il était important de coordonner les interventions du pôle et de l'IRD de façon à n'intervenir qu'une seule fois sur les parcelles de l'ONG TAFÀ, et de façon organisée, afin de perturber le moins possible les parcelles. **A cela il faut ajouter le temps nécessaire à la réalisation des études prévues au laboratoire. Cela explique qu'à l'heure où nous devons terminer notre mémoire nous n'avons pas encore tous les résultats disponibles.**

Le stage nous a donc également permis de nous intéresser aux systèmes de culture SCV.

*Partie II:*

**CADRE DE L'ETUDE**



## 2 CADRE DE L'ETUDE

### 2.1 Milieu physique

#### 2.1.1 Situation géographique

##### Vue générale sur la préfecture de Vakinankaratra

La préfecture du Vakinankaratra, du nom du massif montagneux qu'elle englobe en partie, dite aussi Préfecture d'Antsirabe, est située au sud d'Antananarivo, le chef lieu de la préfecture étant distant de cette ville de 167km, par la Route Nationale n°7. Elle est définie par les coordonnées géographiques suivantes :

-19°12' et 20°16' de latitude sud ;

-45°52' et 47°52' de longitude Est ;

Sa superficie compte 16000km<sup>2</sup> environ, soit 2.72% de celle de Madagascar. Les distances entre les limites extrêmes sont de 115km du Nord au Sud et de 210km d'Est en Ouest. Les altitudes sont comprises entre 400m (475 au sud Ouest de Kalapapaina : Mandoto) et plus de 2400m (2483m à l'Est d'Ambohisampana : Faratsiho.).

Plus précisément, la région de Vakinankaratra est divisée en trois types altitudinaux :

-zone de basse altitude : inférieur à 1200m surtout du côté Ouest (Mandoto)

-zone de moyenne altitude : de 1600m à 1600m (côte Est, Centre)

-zone de haute altitude : supérieur à 1600m (côté Nord, sud est)

La préfecture de Vakinankaratra est dotée d'une grande hétérogénéité des conditions naturelles, économiques et sociales (société à forte migration, variabilités agronomique, physique et écologique, la grande partie écologique se situe entre 1300m et 1600m).

##### Cas d'Andranomanelatra (sous préfecture d'Antsirabe II)

Notre étude a été faite dans la commune d'Andranomanelatra, et plus précisément au niveau des fokontany : **Andranomanelatra centre** et **Bemololo** (divisé en plusieurs hameaux dont l'étude a été faite au sein de l'hameau de Bemasoandro).

La commune d'Andranomanelatra se situe dans le Fivondronana d'Antsirabe II, à 15km au Nord sur la RN7 conduisant à Antananarivo. Elle s'étend sur 164 km<sup>2</sup>. De nombreuses rivières baignent la commune, et des réseaux hydrographiques sont observables dans le paysage. L'altitude varie aux environs de 1400m à 1600m entre les sites de Bemasoandro et d'Andranomanelatra.

#### 2.1.2 Conditions climatiques

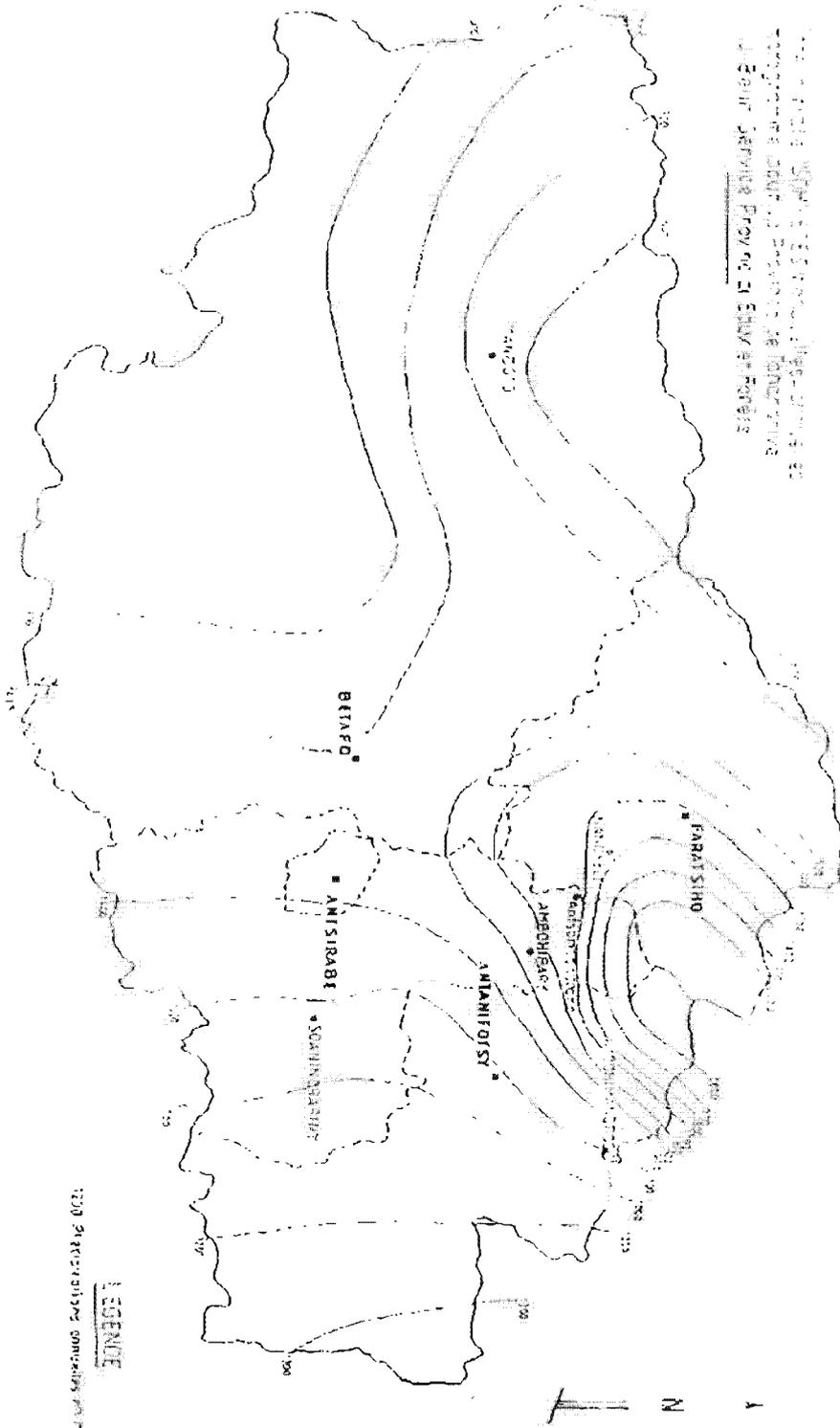
Sur les Hautes-Terres le climat est du type tropical d'altitude avec une saison des pluies, qui commence en octobre et s'arrête en avril. Pour cette raison il ne se pratique qu'une seule campagne rizicole. C'est également la saison « chaude ». Une saison sèche et froide lui succèdent (cf. tableau n°1). Comme souvent en zone tropicale, on constate de fortes hétérogénéités inter-annuelles, dont les principales manifestations sont soit une sécheresse particulièrement sévère en novembre (souvent au cours des dix dernières années), soit des

CARTE n°1 : ISOHYETES ANNUELLES

PROJET DE LA REGION D'ANTSIHABE

ISOHYETES ANNUELLES

Service de l'Hydrologie et de la Meteorologie  
Bureau de l'Hydrologie et de la Meteorologie  
Service de l'Hydrologie et de la Meteorologie  
Service de l'Hydrologie et de la Meteorologie



LEGENDE  
1:200

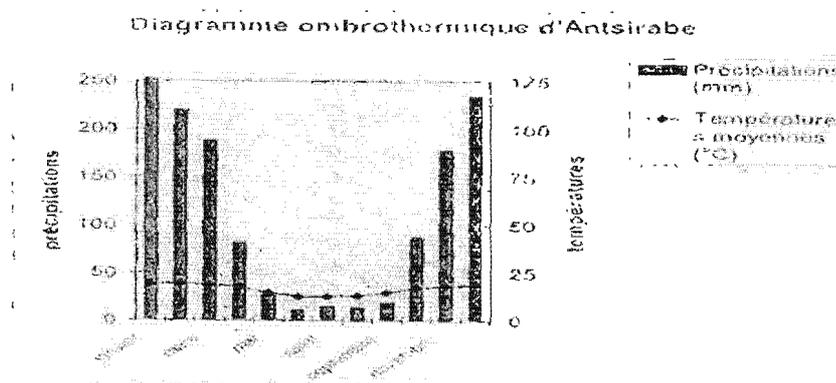
pluviométries diluviennes, essentiellement en janvier (500-900 mm) du fait de situations cycloniques, mais également en décembre, février, et parfois en novembre également (OLDEMAN, 1990 ; et données FOFIFA).

Tableau n°1 : Pluviométries et températures à Antsirabe (1500 m)

	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Total
Pluies 83-92 (mm)	102	169	202	256	211	162	110	1101
Pluies 93-99 (mm)	57	68	228	268	192	167	92	980
Temp. Moy. (°C)	18,1	19,1	19,7	20,0	21,6	19,5	18,3	---
Temp. Min. (°C)	9,9	12,6	13,7	14,8	18,0	13,7	11,9	---

Source : Projet FFEM à Madagascar, volet séquestration de Carbone

Figure n°1 : diagramme ombrothermique d'Antsirabe



Source : HARRIVEL, 2001

Pour information complémentaire on présente en annexe IV les données météorologiques relevées au cours de la saison 2002-2003. Celle-ci a été marquée par un arrêt précoce des précipitations.

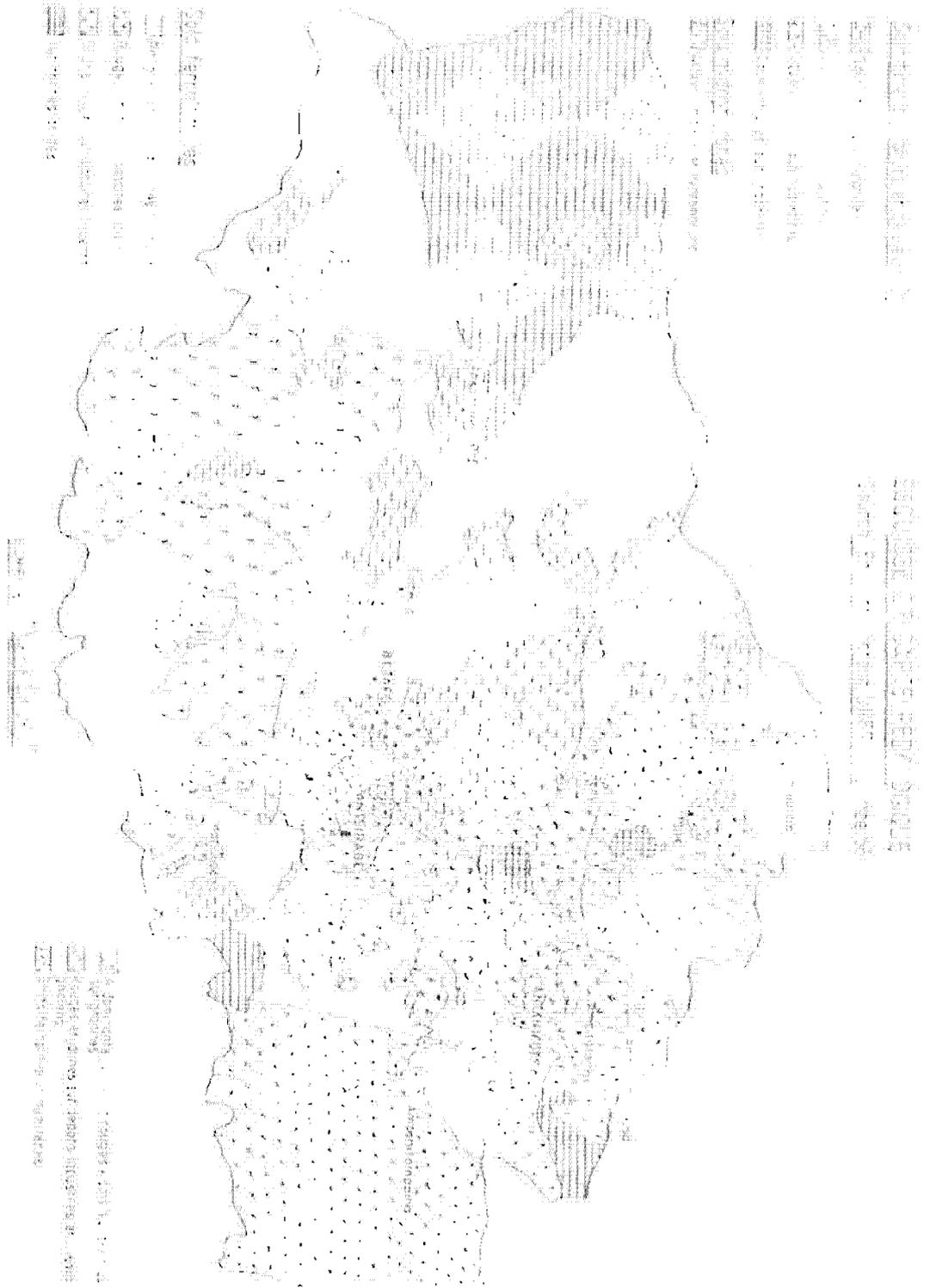
a)- saison sèche et fraîche : de mi-avril à mi-octobre

Durant cette saison, les températures minimales peuvent atteindre jusqu'à 6°C et les minima peuvent atteindre 0°C : cela est due à l'effet de l'altitude et sous l'influence de l'alizé Astral de la région. L'Alizé apporte des pluies de front et des crachins et surtout des gels et des givres surtout à partir de 1600m d'altitude. Rosée et brouillards sont abondants surtout sur les bas fonds. Aussi on peut rencontrer des pluies efficaces en hiver : tout cela permet donc d'envisager des cultures en contre saison du riz.

b)- saison humide et chaude (octobre en février)

La saison des pluies est très précoce par rapport à celle d'Antananarivo. Les pluies sont très abondantes en mois d'octobre et en mois de novembre : c'est surtout des orages. La pluviosité dépend de l'altitude, orientation de la région et la proximité par rapport à des hauts reliefs : il

# CARTE n° 2: ESQUISSE DE CARTE PEDOLOGIQUE



pleut davantage sur le versant Ouest qu'à l'Est à un même niveau d'altitude. Pendant cette saison de pluie, la grêle est fréquente surtout du mois d'octobre au mois de décembre (les régions les plus arrosées sont du côté Sud : Soanindrariny, au Nord : Fratsiho ; avec une hauteur de pluie qui peut aller jusqu'à 2000mm/an).

Notons qu'il y a chaque année des périodes de sécheresse à la fin de la période d'hiver. Pourtant, le climat permet une importante diversité des cultures.

#### Division des saisons suivant les agriculteurs :

Les agriculteurs de la région distinguent 4 saisons :

- *Lohataona* ou « début de l'année » : de mi-août jusqu'à la première pluie (mi-octobre à mi-novembre). Cette période est caractérisée par le travail des terres des Tanety.
- *Fahavaratra* ou « période de la foudre » : saison des pluies de mi-octobre en janvier.
- *Fararano* « fin des eaux » : février en mai. Cette saison correspond au moment où « les cultures montent », il s'agit de la période de récolte (surtout riz...)
- *Ririmina* ou hiver : de juin en mi-août

### 2.1.3 Descriptions géologique et pédologique

Les Hautes Terres malagasy reposent sur un socle de roches cristallines traversé et surmonté en son centre par les roches volcaniques du massif de l'Ankaratra. La région est caractérisée par des sols en majorité ferrallitiques, désaturés à fortement désaturés et acides. Dans ces sols, une couche compactée est présente de façon quasi générale à partir de 15-20cm de profondeur. Il faut remarquer par ailleurs la faible proportion de *plinthite* (argile tachetée kaolinique) dans les sols ferrallitiques des Hautes Terres. Il s'agit d'une spécificité marquante par rapport aux altérites d'Afrique tropicale, ce qui a comme conséquence une très faible formation d'indurations ferrugineuses puisque celles-ci sont issues la plupart du temps de la prise en masse de la *plinthite*.

Au point de vue géologique, la région du Vakinankaratra est constituée essentiellement de *roches granito gneissique du socle précambrien*. Le substratum sain est matelassé par 20 à 40 mètres de roches pourries coiffées par des sols rouges ferrallitiques rouges acides désaturés, aluminiques, sans indurations ferrugineuses (carapaces ou cuirasses). Les sols sont profonds et sont caractérisés par une décomposition très poussée des minéraux primaires qui existaient dans la roche mère originelle (mica, feldspath, amphibole, etc) ; Cette décomposition s'accompagne d'une perte de silice par lessivage, et aboutit à une libération et individualisation d'une quantité élevée de sesquioxydes non seulement de fer mais aussi d'aluminium. Les minéraux argileux dans ces sols sont essentiellement constitués par de la « kaolinite » et le rapport  $SiO_2/Al_2O_3$  est inférieur à 2. (RABEZANDRINA, 2000). La richesse en élément chimique du sol dépend de la nature de la roche mère et la matière humique dépend du type de végétations qu'il porte.

Ainsi, la formation des Tanety ferrallitiques est favorisée par la nature de la roche mère et du lessivage (avec au moins 1200mm de pluies, qui entraîne la silice hydrolysée en profondeur.) Une nappe phréatique d'altérite permanente imprègne la base de ce manteau d'altération, et joue un grand rôle sur les régimes hydrologiques des plaines et des vallées.

Les sols de Tanety (littéralement « terres sèches » ; collines aux pentes parfois fortes caractéristiques des Hautes Terres malagasy, résultant de l'altération de l'ancien haut plateau.)

Les sols de Tanety proviennent de l'altération des roches métamorphiques. Les roches basiques ont une altération conduisant à des sols rouge-sombre, argileux, pauvres en sables quartzeux. Les roches acides donnent des altérites très profondes, riches en sable et mica. Les sols qui en dérivent sont jaune ocre, ils sont moins bien structurés et ont une plus faible capacité de rétention d'eau. Ces sols sont dans l'ensemble acides, désaturés et pauvres en matière organique (<4%). Ils sont ferrallitisés ou résultent de remaniements, fluages et lavages d'anciennes altérites. Il en résulte que la fertilité des hauts Tanety est très faible voire nulle, quelle que soit la culture pratiquée. Ils présentent souvent un lit de concrétions de quelques centimètres d'épaisseur et une certaine compacité.

Tableau n° 2 : caractéristiques chimiques de différents sols de tanety typiques du Vakinankaratra

BETAFO	BEMASOANDRO	IBITY
<b>ANDOSOL(volcanique)</b>	<b>FERRALLITIQUE sur dépôts fluviolacustres</b>	<b>FERRALLITIQUE sur socle cristallin</b>
*Sol moyennement acide (pH eau 6,0 à 6,3), *Riche en matière organique (MO = 13 à 15%, N <sub>i</sub> = 4 pour mille, C <sub>t</sub> = 8%, C/N= 20), *Riche en phosphore total (P total 2600 à 2700 ppm) *Pauvre en calcium ( 2à 3 me/100g), *Mg (0,9 à 1,5 me/100g. *K (0,03 à 0,08 me/100g) *CEC de 7 à 11 me/100g et un totaux de saturation de 50%	* terrain proche de la ferme d'Andranomanelatra *le sol d'origine (bozaka) est acide (pH eau = 4,9 à 5,1) *pauvre en matière organique (MO = 4 à 8%, N <sub>i</sub> =1,2 à 2,3 pour mille, C <sub>t</sub> = 2,2 à 3,9%, C/N= 17 à 18), très pauvre en P (P olsen= 1,2 ppm) *calcium (0,01 à 0,1 me/100g), Mg ( 0,1 à 0,2 me/100g), K (0,07 à 0,3 me/100g) *CEC de 4 à 6 me/100g et désaturé (V= 4 à 15%)	*Sol d'origine (bozaka) acide (pH eau= 4,8 à 5,2) * pauvre en matière organique (MO =3 à 4%, N <sub>i</sub> =1 à 1,11 pour mille, C <sub>t</sub> = 1,8 à 2,2%, C/N= 19 à 22) *très pauvre en P (P olsen= 1,3 à 2,7 ppm sur un total de P total = 220 ppm) *Calcium (0,001 me/100g), Mg (0,03 à 0,05 me/100g, K (0,06 me/100g) *CEC de 1,1 me/100g et désaturé (V= 17 à 18%)

SOURCE : rapport de l'ONG TAFA, 2002, n°2

### Les sols des bas fonds

Les bas fonds forment 30 à 4 0% de la surface de la région, ils sont essentiellement hydromorphes moyennement organiques. Ils sont en fait de moins en moins organiques et de plus en plus sableux de centre à la périphérie de la cuvette.

On distingue 4 types de bas fonds sur les Hautes Terres :

- les sols tourbeux :

Sols organiques qui évoluent sous l'action du drainage et des feux. Leur taux de matière organique est >20%. Il y a une forte hétérogénéité suivant l'épaisseur de la couche de la tourbe. Ils sont très sensibles au tassement.

- les sols moyennement organiques :

Le taux de matière organique est de 6 à 20%. Ils présentent un taux d'argile plus important que les sols précédents, ce qui leur confère une bonne stabilité structurale.

- les sols minéraux

Ce sont des sols plus ou moins sableux et leur aptitude à l'irrigation dépend du matériau sous-jacent.

- les baibofo :

Ils sont composés d'un mélange d'alluvions fluviales et de colluvions limoneuses, ils résultent de l'altération des bassins versants et peuvent former de véritables cônes de déjection en aval des rivières. Malgré leur discontinuité structurale (du sable pur à argile pure) et les risques de déversement plus ou moins brutaux des rivières, ces sols ont une aptitude à produire très fort surtout en période sèche où il y a une forte remontée capillaire. Leur extension est très limitée.

#### 2.1.4 Topographie du milieu

Madagascar est un pays typiquement rizicole. Les Hautes Terres centrales sont la principale région de production et sont dotées d'une diversité topographique : vallées, grande plaine et surtout des versants façonnés en terrasses, aménagés différemment suivant les régimes hydrologiques, socioculturels et les moyens techniques mis en œuvre.

L'unité pédo-géomorphologique est essentiellement dominée par :

- des sols hydromorphes des bas fonds pour la riziculture de Bas fonds (rizières)

- des sols ferrallitiques qu'on rencontre sous forme de Tanety à relief plus ou moins accidenté.

En particulier, les tanety ont un trait tourmenté, très favorable à l'érosion.

Avec les 16000km<sup>2</sup> la surface déjà exploitée est de 79% pour les rizières et 65% environ pour les tanety.

*Remarques : « Les bassins versants et les ensembles hydrologiques »*

Les Hautes Terres malagasy constituent, vis-à-vis des zones basses périphériques, un énorme « château d'eau ». L'épaisseur considérable du manteau d'altérites qui recouvre le socle forme une « éponge » qui piège une grande partie des eaux de pluies infiltrées. La particularité de ces nappes est leur mobilité constante du fait de la pente sensible du réseau hydrographique. Une frange capillaire imprègne le sol presque jusqu'en surface. C'est par cette dynamique hydrologique que s'expliquent les conditions extrêmement favorables qui règnent dans les bas-fonds pour les cultures de contre-saison (par exemple le blé).

Pour le cas du Vakinankaratra, trois grands ensembles hydrologiques drainent la région

- l'*Onive* qui se jette dans l'Océan indien. La limite du Bassin versant de l'*Onive* correspond à la ligne de partage des eaux entre l'océan indien et le canal de Mozambique (le bassin versant du cours supérieur de l'*Onive* est assez bien hiérarchisé)

- la *Mania* : affluent de la Tsiribihina laquelle se jette dans le canal de Mozambique. Le bassin versant de la *Mania* se divise en deux bassins secondaires : celui de l'*Iandratsay* et celui de *Manandona* (tous deux sont hiérarchisés). On peut noter en passant que la *Manandona*, par érosion régressive, assure la vidange de l'ancien lac d'Antsirabe, d'où le tracé actuel des cours d'eau.

- la *Mahajilo* : également affluent de la Tsiribihina. Le bassin versant de la *Mahajilo* est essentiellement représenté, dans la Préfecture, par celui de son affluent, la *Kitsamby* au réseau faiblement hiérarchisé. (MADAGASCAR, Revue de Géographie n°III, 1963)

## 2.2 Milieu humain et agriculture traditionnelle

### 2.2.1 Place de l'agriculture à Madagascar

A Madagascar, la répartition de la population active montre encore une large occupation du secteur primaire ou « secteur agricole » (agriculture : 75%, services : 15%, industrie : 9%, mines : 1%). L'agriculture contribuait 43% à la formation du PNB en 1990 (MORÉL J, 2000-2001). Les terres mises en valeur pour l'agriculture représentent 20% du territoire. En général, les 80% de la population sont formées de paysans agriculteurs. On les retrouve surtout sur les Hautes Terres centrales.

L'alimentation de base est « le Riz » qui est fondamental pour les Malagasy (120kg par personne et par an en moyenne. Le riz est presque substitué en taro, manioc, maïs en période de soudure. Ainsi les principales cultures vivrières sont le riz (40% des terres cultivées), le manioc (11%) et le maïs. Les cultures d'exportation sont essentiellement constituées des vanilles, girofles, les divers fruits et les condiments...

Notons que, la riziculture humide constitue l'essentiel du paysage agraire sur les Hautes Terres. Et aussi, on ne peut pas se passer des divers problèmes des Hautes Terres dont les plus connus sont :

- la difficulté d'intensifier le système agraire : les techniques culturales restent assez rudimentaires (pas ou peu d'utilisation de fumures minérale ou organique), ni de variétés améliorées (problèmes de vulgarisation), des équipements agricoles qui poussent les gens à travailler dur mais à de rapport « bénéfice/peines » de moins en moins.
- utilisation rare d'intrants, et de ce fait des désherbages manuels en général.
- accroissement démographique en opposition à l'amélioration de la production : un système de production centré sur la riziculture n'est plus en mesure de répondre aux besoins vivriers et monétaires de la grande partie des familles paysannes.
- sur le plan foncier, on observe la saturation des bas-fonds irrigables, la micro-parcellisation des rizières, l'augmentation de la pratique du fermage et surtout du métayage et du nombre de paysans ne possédant pas de rizière ou des parcelles de culture.
- problèmes de mise en valeur des tanety, les grands problèmes sont leur fertilité (sols pauvres chimiquement) et les risques de dégradation des terres et de l'érosion.

### 2.2.2 Une société traditionnelle à forte migration

Dotée d'une population dont la majeure partie est d'origine asiatique, Madagascar est un pays à vocation agricole. Cette origine explique que son économie vivrière est basée sur la riziculture repiquée. Les Hautes Terres (Imerina, Vakinankaratra, Betsileo) centrales sont la principale région de production. On rencontre généralement trois (3) grands types de paysages rizières, aménagés différemment suivant les régions hydrologiques à maîtriser, les traditions socioculturelles et les moyens techniques : vallées, grandes plaines, versants façonnés.

La commune d'Andranomanelatra s'étend à 164km<sup>2</sup>. La région est contrastée d'un point de vue physique et humain entraînant des modes variés de mise en valeur du milieu : les habitants font partie de deux ethnies (les Merina et les Betsileo). Les peuples sont appelés « VAKINANKARATRA » : des Merina sont descendus, des Betsileo sont montés dans le Vakinankaratra. De ce fait, les Merina ont surtout apporté *la riziculture irriguée* des

bas fonds et *la culture en terrasses* de la part des Betsileo. Pour cela, les Vakinankaratra utilisent des outillages manuels et à traction animale : angady, charrue par exemple.

La société rurale traditionnelle des Hautes Terres est basée sur la grande famille. La forte cohésion familiale qui y règne s'exprime dans la mise en commun des terres, ainsi que lors de nombreuses cérémonies, telles celles en rapport avec la célébration des ancêtres.

L'autorité est aux mains des hommes les plus âgés, les ray aman-dreny. Ceux-ci détiennent seuls le droit de partager les terres communes entre les héritiers.

Les terres furent souvent cadastrées au nom d'une seule personne de la grande famille. Cela a donné naissance *aux terres en indivis c'est l'ensemble des parcelles appartenant aux membres familiaux et regroupés sous un seul titre*. Il est formellement interdit de vendre la terre à l'extérieur de la grande famille, ceci afin de conserver la terre des ancêtres, mais aussi de cimenter la cohésion du groupe.

Ainsi la vie communautaire de cette société traditionnelle se traduit par une intense solidarité villageoise. *L'entraide* constitue par exemple le seul moyen permettant aux ruraux d'achever leurs *activités rizicoles*

#### **Note : Une organisation foncière hétérogène et inégalitaire**

Les migrants ont acquis une grande partie de leurs terres dans les années de crise. En accumulant plusieurs lopins, ils ont réussi à devenir propriétaire de grandes surfaces couvrant souvent l'ensemble du topo séquence. Certains ont réussi à avoir des blocs de parcelles de grande taille. Les grandes propriétaires sont aussi en général intéressées par une vente d'une partie de leurs terres aux migrants. Ceux-ci achètent en général toujours volontiers, quelle que soit la surface. Ainsi les migrants se différencient des autochtones par la surface qu'ils possèdent. Mais ce ne sont pas en général les meilleures terres. En effet, les paysans vendent préférentiellement les terres les moins bonnes. Les migrants ont les moyens de fertiliser de manière correcte leurs terres pour compenser leur faible fertilité.

#### 2.2.3 Mises en valeur traditionnelle des terres dans la région

Mise en valeur traditionnelle des vallons et des vallées : « système de vallées très hiérarchisées profondément enfoncé entre les collines »

Les systèmes des vallées (et vallons) sont cultivés en riz inondé (riz repiqué ou riziculture de bas fonds) dont l'alimentation en eau provient de la pluie et des affleurements de la nappe phréatique. Le riz est prépondérant dans l'alimentation des Malagasy et constitue le pivot de l'organisation sociale : de ce fait, la majeure partie des bas fonds est occupée par des rizières. La préparation des sols, les travaux saisonniers et les façons culturales sont généralement faits par des petits outillages agricoles et à la main. De ce fait, labour, émiettement, binage, hersage... sont faits à la main.

Des pentes aménagées en terrasses : « paysages agricoles très spectaculaires »

Les tanety sont originellement pauvres surtout en phosphores, acides, mauvaises structures. Il faut donc faire des apports de matières organiques, pour pouvoir les restituer. Vue la croissance anthropique et la faible densité des plaines et vallées de cette région les peuples ont

exploité les versants : causes de la construction des terrasses dont l'aménagement a été fait suivant les courbes de niveaux. En effet une autre unité est constituée par des terrasses aménagées selon les courbes de niveaux. Ces terrasses sont plus ou moins éloignées des habitations. Parfois les terrasses sont délimitées par des *pins* ou des *arbres* (balise de propriété pour des familles).

Généralement, on voit trois (3) sortes de mises en valeur des terrasses :

- les plus basses sont réservées aux cultures maraîchères (brèdes, tomates...) et à la culture de taro ;
- les autres en cultures sèches (maïs, pomme de terre, haricot, patate douce, manioc,...)
- les rizières en terrasses ou sakamaina : ce sont des parcelles situées plus haut que les rizières irriguées. L'alimentation en eau est difficile, donc risque de déficit en eau (pas de culture de contre saison).

Les terrasses sont alimentées par des canaux sinueux à partir des vallons à sourcins perchés et captés, eaux de pluie et les ruissellements issus des parties supérieures non aménagés des versants.

Notons que les meilleurs sols se trouvent sur les versants inclinés, leur fertilité supérieure est due au processus de rajeunissement : l'érosion (hydraulique) continue y dégage partiellement la roche mère.

#### Importance des systèmes de cultures pluviaux sur les Hautes Terres :

Les systèmes de culture pluviaux sont conditionnés par les conditions climatiques, et en particulier le régime des pluies. Notons que, l'exploitation agricole du Vakinankaratra se caractérise par une très grande diversité des cultures, mais toujours à base de riz irrigué.

Dans la région du Vakinankaratra, la surface moyenne des exploitations est de 155,4 ares, mais cette moyenne cache une énorme dispersion : 10% des exploitations ont moins de 20 ares et 10% dépassent 4 hectares. Les exploitations inférieures à 1 ha sont la majorité - près de 60% - et la tranche des 1 à 4 ha représente 30%. Sauf exception, on a donc affaire à des structures de très faibles dimensions, de plus très morcelées, pour lesquelles le recours à la mécanisation, même animale, ne présente guère d'intérêt. Très logiquement, les parcelles en terrasse, qui représentent les aménagements les plus importants, ont les plus petites tailles : 2 à 3 ares en moyenne. La faible taille relative des parcelles sans aménagement exprime aussi l'exploitation systématique de tout espace de sol, même de très faible dimension, pouvant être mis en culture. (CORUS, 2002).

La conquête des versants est donc aujourd'hui, un objectif essentiel des stratégies paysannes sur les Hauts Plateaux, de même que dans les régions du Moyen Ouest malgache et du Lac Alaotra. Le premier obstacle majeur à leur mise en valeur réside dans la pauvreté souvent extrême des sols qui sont soumis à une dégradation continue par l'utilisation de techniques culturales inappropriées, dont le labour, qui est réalisé le plus souvent à l'Angady (longue pelle-bêche) ou à la charrue attelée aux zébus, la surexploitation rapide de la couverture végétale (jachères fourragères, espèces arbustives. La première conséquence de ces modes de gestion inadéquates des sols est le très faible et décroissant niveau de production des exploitations surtout sur les sols pauvres ferrallitiques issus de roches acides. Seules les terres riches dérivées du volcanisme récent (cas de la région de Betafo dans le Vakinankaratra), offrent des niveaux de production assez élevés. Les cultures sont menées d'octobre en mai, et

il n'y a pas de cultures de contre saison, alors que cela est possible sur les parcelles de rizières : blé, avoine, maraîchage, mais pas de second riz du fait des températures froides d'avril-mai en septembre. Les principales cultures sont: maïs, haricot, patate douce, pomme de terre et soja, et depuis 10 ans, et très marginalement encore en terme de surface, le riz pluvial. Dans les zones de moins de 1000 m on a également du manioc, de l'arachide, quelques vigna et du voandzou (*Voandzeia subterranea*). De fait, le maïs domine les paysages avec le haricot et la pomme de terre (FOFIFA-CIRAGRI, 1996).

Les semis sont réalisés tôt dans la saison, dès que les conditions d'humidité du sol le permettent. En général au cours de la seconde quinzaine d'octobre, après les 40 à 60 premiers millimètres de pluie qui permettent le labour. Si la parcelle a bénéficié d'un labour de fin de saison précédente on a parfois des reprises de labour en sec, avant le démarrage réel de la saison des pluies. La pratique du semis en sec a également été observée, en particulier avec le riz pluvial. A noter enfin que l'on peut avoir des semis très précoces en septembre dans certaines zones de bas-fonds qui bénéficient encore d'un peu d'humidité résiduelle qui permettra à la culture d'attendre le véritable début de la saison des pluies (seconde quinzaine d'octobre) : cela concerne surtout le maïs et le haricot. Notons qu'un semi-précoce évite de prendre du retard sur les autres activités, dont la préparation des rizières qui peut commencer début décembre suivant les conditions pluviométriques et les situations.

D'une manière générale, l'association de cultures est la plus pratiquée : en effet elle permet de mieux gérer les risques à encourir sur la petite surface disponible pour assurer autant que faire se peut la subsistance familiale. Ainsi le maïs est-il le plus souvent semé en association avec le haricot (avec densités faibles de l'ordre de 10000 p/Ha) : semés dès que possible dans la saison (en octobre). Le haricot (variétés locales précoces de moins de 3 mois) est alors récolté en janvier, et le maïs (5 mois) en mars. Les paysans ne sèment rien dans le maïs après haricot, sans doute à cause du manque de lumière dans le maïs. Le soja peut remplacer le haricot, avec un cycle plus long : de 4 (variété Cometa par exemple) à 5 mois. Il y a également « une seconde saison » pour le haricot : semé en février, seul. Dans ce système il vient parfois après une première culture comme l'avoine (ROLLIN, 1994 ; FOFIFA-CIRAGRI, 1996).

Systèmes pluviaux traditionnels (+ : association; - : succession; / : ou)

- en zone d'altitude (1000-1600 m) :
  - double culture (rotation saison-1/2 saison) : pomme de terre - haricot (ou l'inverse) ; pomme de terre - blé (ou haricot - blé) ;
  - rotation - association : maïs - pomme de terre ; maïs + haricot - pomme de terre + blé ; maïs + pomme de terre - haricot + blé ;
  - association ou culture intercalée : maïs et haricot/soja ; maïs et riz pluvial ; maïs et pomme de terre ;
- en zone de moyenne altitude (<1000 m) :
  - rotation association : maïs + voandzou/soja ; riz pluvial + voandzou/haricot/soja ; manioc - riz pluvial

L'arboriculture fruitière est également importante : pommes, poires, pêches, prunes. A noter enfin l'intérêt grandissant des agriculteurs pour la production laitière du fait d'un marché garanti (Société Tiko et d'autres sociétés plus petites). Cet intérêt se traduit par des demandes pour les productions fourragères et, dans certaines zones, par une « compétition » pour le *bozaka* (HARRIVEL, 2001).

La mise en culture des terres est souvent précédée d'un brûlis de nettoyage de la végétation naturelle de *bozaka*. A noter d'ailleurs que cette pratique était traditionnellement pratiquée pour favoriser le ruissellement rapide des premières pluies et permettre un travail plus précoce dans les rizières. Mais le développement des cultures pluviales l'a encore plus répandue. Le sol est traditionnellement labouré à « l'angady », sorte de bêche au fer long et étroit, qui permet un travail de bonne qualité jusqu'à 25 cm. Le labour en traction animale est également répandu. Moins cher (mais encore faut-il y avoir accès et pouvoir payer), il permet un travail un peu moins profond, d'environ 20 cm.

La gestion de la fertilité se fait à travers les jachères, de plus en plus courtes, les associations et rotations des cultures, et l'utilisation du fumier. D'une manière générale, on a une très faible (sinon nulle !) intensification des cultures pluviales: avec fumier seul dont la qualité (de bovin le plus souvent, voire de porc) et la quantité varient. On considère en général d'après les enquêtes que les paysans mettent en général autour de 5 T/Ha de fumier de bovin, mais il semble que bien souvent cela ne soit pas le cas sur toutes les parcelles car ce dernier est souvent non disponible en quantité suffisante.

Les enquêtes indiquent une faible utilisation des engrais et pratiquement pas d'usage des herbicides (HARRIVEL, 2001). En fait les intrants semblent n'être utilisés que pour quelques cultures de rente, telles que le blé, la pomme de terre, des cultures maraîchères. Ceci est étroitement lié à la faible monétarisation des agriculteurs et au fait que les bénéfices des exploitations agricoles dans le contexte socio-économique actuel ne sont pas du tout incitatifs. Par ailleurs, en corollaire on ne produit que pour la subsistance familiale en général, attitude probablement liée aussi à la taille du ménage (élevée) contre une faible surface disponible (environ moins d'1 ha) par famille. Le matériel végétal utilisé dans la plupart est non adapté ou du type traditionnel pour diverses raisons : habitude, goût, non-disponibilité de matériel amélioré, etc.

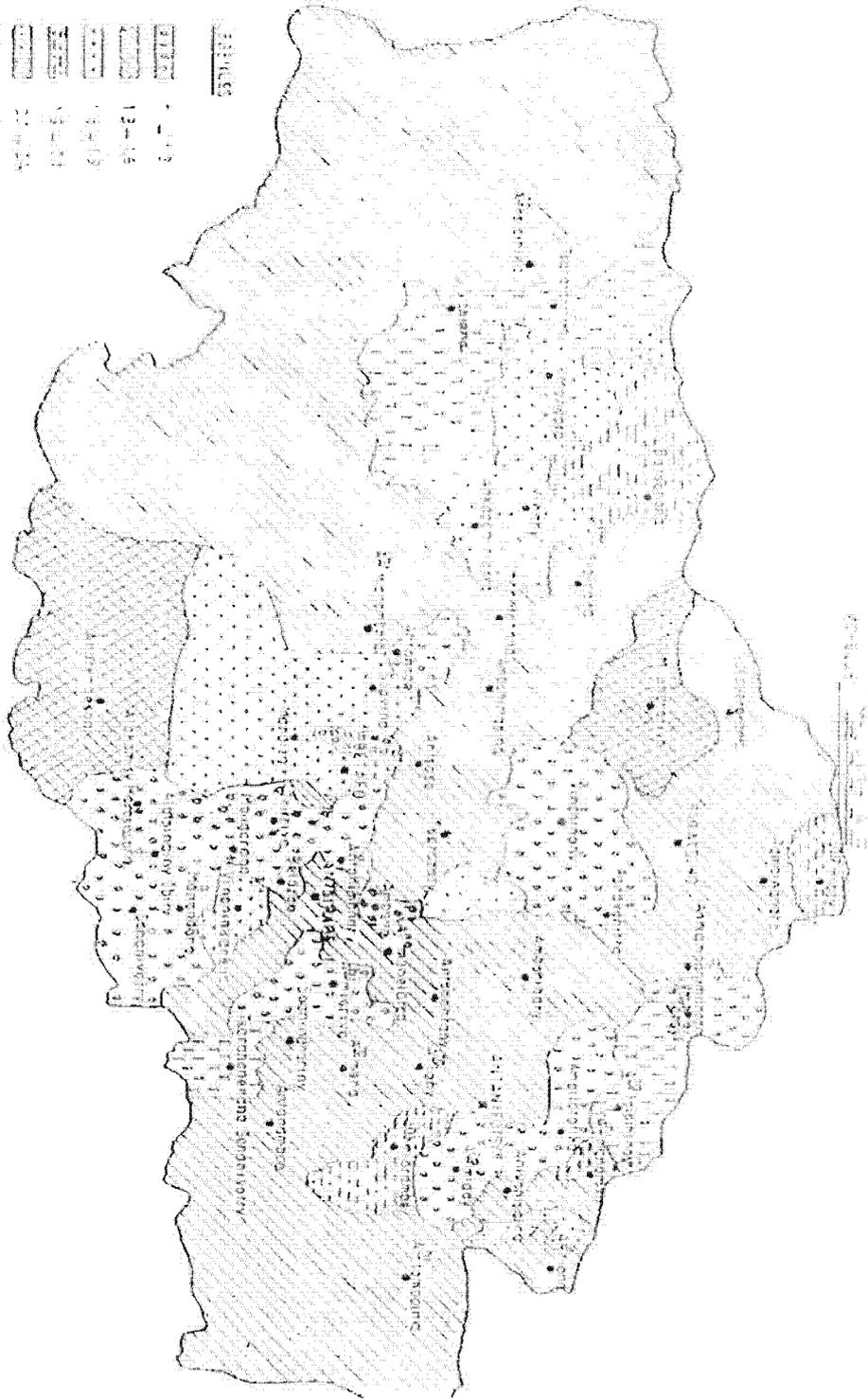
La pratique successive durant plusieurs années de la même culture ou la même association aggrave parfois davantage la diminution de fertilité du sol. Outre les problèmes de dégradation des sols, et de basse fertilité, les adventices et les insectes terricoles (adultes et larves) sont parmi les principales difficultés rencontrées par les agriculteurs. Les rendements sont de ce fait en général très faibles : par exemple en maïs: 0,4T/Ha sans fumure; 0,7-1T/Ha avec 5T/Ha de fumier (FOFIFA-CIRAGRI, 1996) et un calendrier cultural extrêmement chargé de plus de 200 jours/ha en culture manuelle. Ces nombres traduisent bien, à la fois, un calendrier cultural très contraignant et des conditions de très basse fertilité des sols.

#### 2.2.4 Le développement du riz pluvial

Le développement du riz pluvial sur les Hautes Terres est tout récent : il a commencé après la mise au point à la fin des années 80 de variétés améliorées d'altitude (Projet Riz d'Altitude PRA CIRAD-FOFIFA ; DECHANET et al, 1997) pouvant être semées jusqu'à 1800 m (première mondiale!). La 1<sup>ère</sup> série de ces variétés a commencé à être diffusée en 1990. L'adoption du riz pluvial sur les Hautes Terres au dessus de 1300 m est pour l'instant restreinte (en comparaison de la population importante de la région), mais estimée cependant déjà à 15000 exploitations agricoles en 2000 (GALTIER et GUIMERA, 2000). Cela s'explique aisément du fait des problèmes « structurels » découlant de sa nouveauté: freins culturels, faible diffusion, manque des semences, etc.

CARTE n°3: Rapport Tanety cultivable/Tanety cultivée

LÉGENDE	
	1 - 2
	12 - 15
	16 - 19
	20 - 24
	25 - 28
	29 - 32
	33 - 36
	37 - 40
	41 - 44
	45 - 48
	49 - 52
	53 - 56
	57 - 60
	61 - 64
	65 - 68
	69 - 72
	73 - 76
	77 - 80
	81 - 84
	85 - 88
	89 - 92
	93 - 96
	97 - 100
	101 - 104
	105 - 108
	109 - 112
	113 - 116
	117 - 120
	121 - 124
	125 - 128
	129 - 132
	133 - 136
	137 - 140
	141 - 144
	145 - 148
	149 - 152
	153 - 156
	157 - 160
	161 - 164
	165 - 168
	169 - 172
	173 - 176
	177 - 180
	181 - 184
	185 - 188
	189 - 192
	193 - 196
	197 - 200
	201 - 204
	205 - 208
	209 - 212
	213 - 216
	217 - 220
	221 - 224
	225 - 228
	229 - 232
	233 - 236
	237 - 240
	241 - 244
	245 - 248
	249 - 252
	253 - 256
	257 - 260
	261 - 264
	265 - 268
	269 - 272
	273 - 276
	277 - 280
	281 - 284
	285 - 288
	289 - 292
	293 - 296
	297 - 300
	301 - 304
	305 - 308
	309 - 312
	313 - 316
	317 - 320
	321 - 324
	325 - 328
	329 - 332
	333 - 336
	337 - 340
	341 - 344
	345 - 348
	349 - 352
	353 - 356
	357 - 360
	361 - 364
	365 - 368
	369 - 372
	373 - 376
	377 - 380
	381 - 384
	385 - 388
	389 - 392
	393 - 396
	397 - 400
	401 - 404
	405 - 408
	409 - 412
	413 - 416
	417 - 420
	421 - 424
	425 - 428
	429 - 432
	433 - 436
	437 - 440
	441 - 444
	445 - 448
	449 - 452
	453 - 456
	457 - 460
	461 - 464
	465 - 468
	469 - 472
	473 - 476
	477 - 480
	481 - 484
	485 - 488
	489 - 492
	493 - 496
	497 - 500



CIRVA D'ANTSIRABE  
 Rapport Tanety cultivable / Tanety cultivée

Source: Rapport de synthèse 1987-1988  
 Mon Z.D.A

Chez les paysans le riz pluvial peut arriver en tête de rotation (mise en culture d'une nouvelle parcelle après défriche) ou après d'autres cultures (maïs, soja, haricot, maraîchage, associations maïs-haricot ou maïs-soja, etc.). *Une des qualités du riz pluvial est qu'il est peu sensible à l'acidité du sol, moins que le maïs, le haricot ou le soja, ce qui fait qu'il se prête bien à ouvrir les rotations après défriche, et supporte mieux l'absence d'amendements calcique et magnésien.*

Comme les autres productions pluviales, sa culture se heurte à diverses difficultés : insectes terricoles, adventices, pyriculariose, *nécessité d'une bonne macro-porosité*. Il peut également y avoir un chevauchement des périodes de sarclage du riz pluvial et de repiquage sur rizière (idem avec d'autres cultures), ce qui peut être considéré comme un handicap puisque les agriculteurs donnent la priorité aux rizières. Enfin, compte tenu des « traditions agricoles pluviales », il semble important de considérer également, comme certains paysans en ont fait la remarque au cours d'enquêtes (RAZAKAMIARAMANANA, com. pers. ; HARRIVEL, 2001), que « *le riz pluvial occupe une parcelle à lui tout seul pendant toute une saison* ». De fait, il est en principe semé seul et son cycle de 5 mois ou plus fait qu'il est impossible de réaliser (de par les conditions pluviométriques) une seconde culture après lui. Cet aspect des choses représente un facteur de risque et tranche avec les « traditions » des cultures de Tanety.

Différents facteurs poussent globalement à l'extension des surfaces de riz pluvial, dont en premier lieu la saturation des zones irriguées et/ou potentiellement irrigables, conjuguée aux difficultés de plus en plus aiguës d'entretien et de maintenance des zones et infrastructures irriguées, qui viennent en conséquence de la dégradation des terroirs. Ainsi, l'extension de la riziculture pluviale s'opère-t-elle progressivement ? (GALTIER et GUIMERA, 2000). Elle semble même s'accélérer depuis 3-4 ans: des observations non encore quantifiées l'indiquent et les témoignages recueillis auprès des agriculteurs permettent justement d'expliquer cette avancée du fait des avatars climatiques des dernières saisons (arrivée tardive des pluies, sécheresses, inondations du fait des régimes cycloniques) qui ont affecté les rizières, occasionnant des dommages et destructions. *La culture du riz pluvial apparaît donc bien comme une des solutions possibles face aux problèmes de la riziculture irriguée.*

### 2.3 Problèmes d'érosion et dégradations liées aux labours

#### 2.3.1 Rappels sur le travail mécanique du sol ou « LABOUR »

Le labour est une opération qui consiste à retourner le sol et enfouir ainsi en profondeur la partie superficielle (qui contient des semences de plantes et la biomasse présentes). Ses objectifs sont multiples:

- ameublir le sol pour favoriser et faciliter la pénétration des racines et l'infiltration des eaux (pluies...).
- lutter contre l'enherbement, par l'enfouissement des herbes et leurs graines.
- contribuer en principe à l'entretien de la fertilité en enfouissant de la biomasse dans le sol, qui deviendra donc de la matière organique.

Il permet aussi d'enfuir les fumiers et les amendements s'ils ont été mis avant l'implantation.

Un labour correct est caractérisé par :

- Une profondeur constante ;
- Des bandes régulièrement retournées ;
- Une muraille verticale et fond horizontal.

Le labour sert en particulier à l'augmentation de la porosité qui peut dépasser les 60% et cela due à la destruction des grosses mottes, soit à la reconstitution des petites mottes par la pression d'outils. C'est la macro-porosité qui est améliorée. Cela va améliorer l'infiltration de l'eau.

De ce fait il est important de connaître que le labour a des rôles très importants dans les relations eau/sol : il peut intervenir dans la circulation de l'eau dans le sol, ainsi que dans la circulation superficielle d'eau excédentaire. Il est aussi essentiel de noter l'importance de l'époque du labour car il faut tenir compte de l'humidité du sol, de sa texture et de sa structure ainsi que des exigences culturales propres de la plante. Plus la terre est argileuse, plus la période favorable pour labourer est réduite.

Si le labour a longtemps été considéré comme préalable indispensable à l'implantation d'une culture, comme toutes les techniques, il présente des inconvénients, notamment dans les pays tropicaux :

- pénibilité, car en général réalisé manuellement : c'est le cas en particulier à Madagascar ;
- risques d'érosions et de dégradation favorisées par un affinement excessif du sol et l'absence de couverture protectrice et surtout si il est pratiqué sur un terrain à forte pente (à partir de 5%) ;
- accélération de la minéralisation de la matière organique, d'où appauvrissement rapide du sol. Cela est vraie surtout en région chaude (moins sur les Hautes Terres de Madagascar) ;
- limitation de l'activité biologique des sols, due aux perturbations sur la faune du labour.

Si les travaux du sol sont effectués dans de mauvaises conditions (trop sèches ou trop humides, pente forte,...), les effets obtenus peuvent être contraires à ceux attendus : apparition d'une semelle de labour, ou sol émiétté en surface et érosion accrue... De plus, en agriculture motorisée, des passages répétés du tracteur favorisent le tassement du sol.

Pour le cas de Madagascar où le travail du sol (labour) est généralement effectué à l'angady (fer de bêche pour labourer la terre, faire des diguettes, des canaux...), il faut tenir compte de la production totale par exploitation ou par habitant et du rapport bénéfice/peine. Il faut donc amener les paysans à travailler moins tout en produisant plus.

### 2.3.2 Les problèmes d'érosion et dégradation des sols :

La terre va mal partout dans le monde et surtout sous les tropiques où les excès climatiques sont plus sévères. D'abord les milieux physiques y sont fragiles et cela à cause d'un climat chaud et humide (pluie agressive accompagnée d'une forte température durant la saison estivale alterne une longue saison sèche et fraîche) ; d'où forte minéralisation des matières organiques après laquelle les éléments minéraux sont sujets aux ruissellements, érosion hydriques et lixiviation en profondeur.

Aussi et surtout, la démographie galopante caractéristique de la société rurale est la vraie cause, même indirecte, de la dégradation du milieu. A cet effet, en plus que le milieu soit détruit, la production n'est plus en état de satisfaire les besoins en alimentation et de cela viennent les problèmes concernant l'exploitation des surfaces cultivées. L'agriculteur n'arrive plus à gérer la ressource sol (fertilité, protection ...) car vue la cherté des intrants, il cherche à exploiter d'autres parcelles libres, jamais cultivées : ce sont les Tanety. En effet,

une faible densité des plaines et de vallées a obligé les paysans à remonter sur les versants pour la riziculture en terrasses : les altérations ferrallitiques ont alors été soigneusement modelées en gradins plus ou moins étroits, suivant les courbes de niveaux et fonction de la pente des versants.

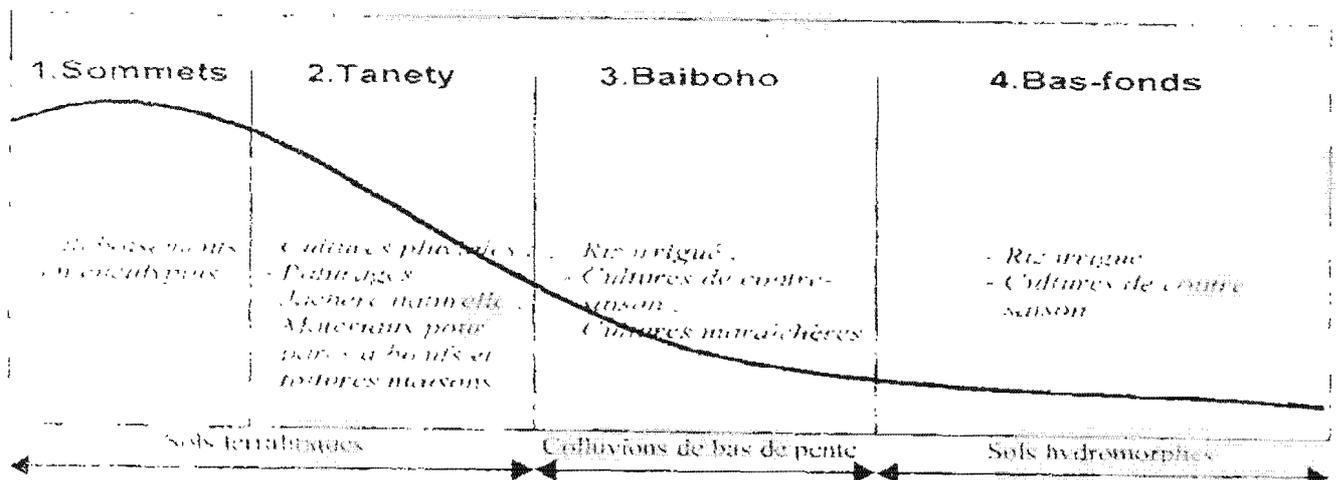
Les Tanety sont généralement alimentées par des eaux de pluie et des ruissellements issus des parties supérieures non aménagées. Elles sont donc toujours soumises aux aléas pluviométriques. En plus de leur topographie, les Tanety de la région sont peu couverts à cause des périodes de friche, (bozaka seulement), d'où forte érosion hydrique qui causent divers dégâts : formation des lavaka, ensablement des bassins versants et des ouvrages, éboulements... formation des baiboho dans les vallées alluviales suite à la formation des lavaka.

Notons que la mise en valeur des Tanety est très délicate, surtout qu'il y a une partie dont la mise en valeur semble impossible : partie recouverte de cuirasse ou de carapace ; car en général il faut considérer divers facteurs surtout les climats et en particulier la pluviométrie, les propriétés physiques et chimiques de ces tanety, la topographie sans oublier les facteurs humain et économique. En effet, les Tanety ont une topographie très particulière qui ne permet pas une bonne maîtrise des eaux qui y passent. A cela les spéculations à faire sont souvent des cultures pluviales qui méritent une bonne connaissance précise de la quantité et de la répartition des pluies.

**Note : les Lavaka**

Les lavaka sont des ravins souvent en forme de cirque semi-circulaire, entaillant profondément un versant ou une croupe, avec des parois abruptes atteignant parfois une trentaine de mètres en amont du cirque. Ils se forment en général sur une roche -mère de gneiss ou de micaschiste qui en s'altérant donne une zone de départ limoneuse, micacée, friable. Pendant que l'altération se poursuit en profondeur, il apparaît en surface un horizon plus ou moins compact, plus cohérent. Il se produit donc entre le sol de surface et la zone d'altération sous jacente une variation importante de la résistance à l'érosion, très favorable à la formation des lavaka. Les lavaka peuvent être aussi favorisés par un abaissement du système hydrographique à la suite d'un effondrement tectonique et un climat à saison sèche marquée, en limitant la végétation, favorise le ruissellement intense en saison de pluies.

Figure n°2 : occupation agricole de l'espace (D'après OLIVIER, 2000, et FOFIFA, 1995)



Alors vue la croissance démographique et les problèmes anthropiques, foncier et économiques, la production diminue et devient insuffisante à cause d'une *surexploitation*

*agricole ou des techniques culturales non respectées* (exemple : pente > 5%). Ces raisons là poussent les ruraux à exploiter de nouveaux versants ou Tanety (riziculture et des cultures sèches) qui sans défenses et restaurations des sols, provoquent l'érosion (surtout hydrique) et la dégradation des sols.

Les dégradations ont par ailleurs des répercussions négatives sur les rizières irriguées (bas-fonds et plaines) et leurs infrastructures, qui les mettent en péril et impliquent des travaux et coûts de maintenance de plus en plus élevés : ensablements, dégradations, submersions violentes lors des périodes pluvieuses, ou au contraire pénurie d'eau (tarissements rapides) dès qu'il y a une petite rémission des pluies.

Compte tenu des répercussions environnementales et socio-économiques graves des dégradations liées aux phénomènes d'érosions qui s'intensifient et se généralisent du fait de l'expansion des cultures pluviales conduites selon des pratiques traditionnelles en labour, et parfois après brûlis de nettoyage, **tout le monde s'accorde sur l'urgence qu'il y a à développer et diffuser des méthodes de cultures pluviales qui soient réellement durables.**

## 2.4 Le semis-direct sur couverture végétale (SCV) comme solution

### 2.4.1 Les raisons du semis-direct sur couverture végétale (SCV) à Madagascar

Au cours des années 70 et 80 la recherche et les organismes de développement ont tenté de trouver des solutions à la faible productivité des Hautes Terres et à leur rapide dégradation aux conséquences dramatiques pour les paysans et le pays. Mais ces études n'ont pas permis de proposer des solutions durables réalistes et acceptables économiquement (ROLLIN, 1994) : leurs recommandations portaient sur des doses d'intrants trop élevées pour être réalistes et des aménagements contraignants, inspirés de la défense et restauration du sol (DRS).

Suite à ces échecs, le CIRAD, fort de son expérience brésilienne réussie (travaux de Lucien Séguy), s'est orienté à partir de 1990 sur la mise au point de systèmes de culture en semis direct et couverture végétale (SCV) en liaison avec l'ONG TAFI, et plus récemment, la recherche (FOFIFA). La zone principale de mise au point de ces systèmes a été le Vakinankaratra, autour de la ville d'Antsirabe, au cœur des Hautes Terres. Mais des travaux similaires ont été menés dans différentes régions de Madagascar aux écologies très différentes depuis 1995.

### 2.4.2 Principes et originalités du concept SCV

Le principe de base des systèmes sur couverture végétale (SEGUY et BOUZINAC, 2001 ; DOUNIAS, 2001) est d'assurer une protection permanente du sol contre les érosions et dégradations par des mulchs de biomasses vivantes ou mortes. En corollaire, pour ne pas altérer cette protection, le sol n'est jamais labouré ni sarclé non plus. On distingue les systèmes sur couverture vive (couverture du sol assurée par une « culture de couverture » dans laquelle les cultures commerciales sont cultivées) et les systèmes sur couverture morte (protection assurée par les cultures, les résidus et/ou des biomasses apportées). Il n'y a qu'à l'installation (1ère année) que l'on doit labourer en général, de façon à *assurer une bonne porosité initiale au sol*. Sinon il serait trop compacté pour permettre un bon développement de la ou des cultures. Mais dès cette première année on ne sarcle pas et on doit produire puis

maintenir sur la parcelle le maximum de biomasse possible de façon à assurer la protection du sol pour éviter les phénomènes de dégradation, dont érosion et compaction.

La couverture distingue donc les SCV des systèmes paysans traditionnels avec semi-direct au bâton fousseur. De fait la pratique du SD datait déjà du temps des égyptiens anciens, ou encore des Incas dans les Andes d'Amérique du sud : ils utilisaient un bâton pour faire un trou dans les sols, dans lequel la graine était placée à la main et recouverte au pied. A notre époque, des centaines de milliers d'hectares sont plantées traditionnellement en semis-direct, par les petits agriculteurs indigènes des zones tropicales.

On doit apparenter les SCV à l'ensemble des "techniques culturales simplifiées" (TCS). Aucune autre préparation du sol n'est effectuée. « *L'élimination des mauvaises herbes, avant et après le semis, pendant la culture, est faite avec des herbicides, les moins polluants possibles pour le sol* » (SEGUY et BOUZINAC, 1999).

#### 2.4.3 Caractéristiques du fonctionnement des SCV

Le premier impact positif est qu'il n'y a presque plus de ruissellement et plus d'érosion (SCOPEL, 1994 ; ARREOLA, 1996; FINDELING, 2001 ; SCOPEL et al, 1998 ; SEGUY et al, 2001). On constate aussi que le sol s'ameublisse du fait de sa protection, des activités racinaires, des apports de biomasse (aériennes, racinaires), et des activités de la macrofaune (vers de terre, larves) qui se multiplie : *sa macroporosité et sa microporosité augmentent*. La mésofaune et la microflore du sol se développent également. Ces agents agissent en retour positivement sur les systèmes : activités « foreuses », « mélangeuses », dégradation et minéralisation des biomasses, intervention dans l'alimentation des plantes (oxydations et chélation des minéraux par les bactéries). Certains éléments peuvent être libérés par le sol (activités biologiques et physico-chimiques plus fortes) ou remontés des horizons profonds par les racines (GOBAT et al, 1998; BOURGUIGNON, 1996).

L'autre grand avantage des mulchs est qu'ils permettent de contrôler les adventices, annulant les tâches de sarclage. En *système sur couverture morte* le recours aux herbicides est parfois nécessaire en début de cycle en cas d'adventices. En *système sur couverture vive* leur usage est obligatoire pour contrôler la couverture avant l'installation de la culture : il s'agit d'un usage extrêmement raisonné et précis, avec des doses très faibles non polluantes, car il ne s'agit juste que d'affaiblir la couverture (dévitaliser) de façon localisée, et surtout pas de l'éliminer. En fin de cycle de la culture "commerciale" la couverture reprendra sa place.

Aussi, la protection du sol et l'augmentation de la porosité entraînent une meilleure infiltration de l'eau (effet de la macroporosité) et des gains de stockage (effet de la microporosité) qui peuvent permettre aux cultures de mieux affronter les aléas pluviométriques (SCOPEL, 1994). Ces avantages, couplés au fait qu'il n'y a plus de labour, peuvent permettre de semer plutôt qu'en système traditionnel (DOUNIAS, 2001). Ce peut être très avantageux en terme de calage du cycle.

En quelques mots le SD consiste à se dire : « *je ne veux plus passer des heures à labourer chaque année mes terres, dès lors qu'existent des techniques permettant, avec l'aide de la faune du sol, d'installer mes cultures pour moins cher en obtenant les mêmes rendements, en utilisant à terme moins d'engrais et de produits phytosanitaires, tout en réduisant l'érosion de*

mes terres, et en polluant moins les nappes souterraines et les cours d'eau qu'elles alimentent. » (SOLTNER, 2000).

Sur le plan physique les SCV permettent :

- une amélioration de la stabilité structurale du sol en l'enrichissant en matière organique.
- une amélioration de la structure du sol : les plantes de couverture permettent de fragmenter le sol grâce à l'action de leurs racines qui s'introduisent dans les fissures et les agrandissent.

La présence d'une couverture végétale permet de diminuer l'impact de la pluie sur le sol (effet splash) en interceptant les gouttes de pluie. Aussi la couverture permet de réduire les effets du vent à la surface du sol et empêche la formation de nuages de poussière :

- réduction du ruissellement et des pertes du sol
- la couverture retient l'eau des pluies sur le sol et augmente son infiltration et cela grâce à la réduction du ruissellement. La réduction du ruissellement enlève à l'eau sa fonction de transport des particules minérales, d'où une diminution des pertes de sol.
- effets sur le stockage de l'eau dans le sol
- effets sur la résistance du sol envers les agressivités atmosphériques
- effets sur l'évolution des matières organiques (minéralisation..)
- influences des SCV sur les rendements (comparaison des récoltes)

Ainsi les systèmes sur couverture végétale, implicitement « en semis direct », permettent :

- ✦ de lutter contre la dégradation des sols et maintenir voir restaurer/améliorer leur fertilité pour augmenter leur productivité,
- ✦ et tout à la fois de réduire les coûts de production des agriculteurs pour améliorer leurs marges, en diminuant à la fois les intrants (engrais) et temps de travaux (une fois les systèmes en place): plus de labour, plus de sarclage.

Ces systèmes présentent encore d'autres avantages potentiels sur le plan de la défense des cultures. Enfin, sur le plan environnemental ils impliquent également l'abandon des feux de nettoyage qui souvent s'étendent aux environs.

#### 2.4.4 Travaux et résultats sur les SCV à Madagascar

Le contexte physique de Madagascar se caractérise par une grande diversité climatique et pédologique. Depuis une dizaine d'années, le CIRAD avec ses partenaires malagasy a développé des expérimentations SCV en milieu paysan dans de nombreuses régions (voir tableau ci-après).

Tableau n°3 : lieux et date de mise au point des systèmes SCV à Madagascar

	Début SCV	Altitude (m)	Temp. (°C)	Pluviosité (mm/an)
Hautes Terres	1990	1300-1600	16	1200-1800
Sud-ouest	1995	0-500	24	300-800
Lac Alaotra	1998	800	21	1000-1200
Sud-est	1998	0-300	23	2000-3000
Moyen-Ouest	1998	500-1200	24	700-1300

SOURCE : Projet FFEM/IRD

Les types de sols sont très variés selon le climat et la nature de la roche mère. On trouve ainsi des sols ferrallitiques désaturés acides développés soit sur alluvions lacustres anciennes, soit sur granite ou granito-gneiss anciens, soit sur cendres basaltiques dans les Hautes Terres et

des sols très sableux dans la région du Sud-Ouest (Tuléar). Cette diversité pédologique se traduit par un gradient textural important ; la texture est un des déterminants majeurs de la séquestration du carbone dans les sols.

Les systèmes alternatifs à SCV ont été adaptés aux systèmes de production locaux :

- cultures vivrières sur versants (tanety) dans les Hautes Terres,
- cultures vivrières sur défriche-brûlis, amélioration des systèmes cotonniers et arachidiers avec vaine pâture dans le Sud-Ouest.

Les travaux de mise au point de systèmes SCV sur les SCV ont été l'œuvre de l'ONG TAFA, pilotée à distance par le CIRAD jusqu'en 1996, puis appuyés directement par le CIRAD et le FOFIFA ensuite. Ils ont tout d'abord porté sur les principales cultures pluviales: le maïs, la pomme de terre, le haricot, le soja. Les systèmes mis au point ont cherché depuis quelques années à intégrer des productions fourragères (avoine, vesce, Brachiaria, Arrachis).

Des résultats positifs ont été obtenus concernant la restauration durable de la fertilité, l'augmentation de la productivité, et la réduction globale des coûts (travail, intrants). De très nombreux résultats en attestent sur différentes cultures et pour de nombreuses situations (TAFA, 1992 à 2001 ; CHARPENTIER et al, 1999 et 2000).

Ainsi les systèmes SCV en maïs, soja et haricot produisent-ils plus tous les ans, quel que soit le niveau de fumure (même sans apport minéral, soit uniquement avec du fumier), alors qu'avec labour, et mêmes des fumures élevées, la productivité stagne ou régresse et est par ailleurs plus fluctuante face aux aléas. Les systèmes avec couverture vive sont plus rapidement performants, en particulier ceux intégrant des légumineuses.

Les actions de diffusion n'ont commencé qu'en 1995-1996. Logiquement, on peut déplorer l'insuffisance de structures de formation et d'encadrement formées aux SCV. Il y a par ailleurs une certaine méconnaissance des plantes à associer, à intégrer aux systèmes (type crotalaire, qui pousse cependant naturellement partout sur les Hautes Terres, vesce, Arrachis, Brachiaria, Desmodium) et, de plus, aucune production ni marché de leurs semences.

Mais l'adoption des systèmes SCV pose aussi diverses difficultés fortes qu'il faudra pouvoir surmonter, contourner, pour arriver à leur diffusion.

#### **Note : La gestion des adventices en SCV**

Les systèmes en semi-direct et ouverture végétale permettent de lutter efficacement contre les adventices, pouvant permettre de se passer totalement des sarclages. L'expérience acquise avec la rotation riz-soja, et paillages additionnels les 3 ou 4 premières années, montre un contrôle satisfaisant des adventices par la biomasse et les paillages au cours des cycles. En ce qui concerne le riz pluvial en SCV on manque d'autres références. Il faudra mettre au point d'autres systèmes, dont des systèmes sur couverture vive.

Les systèmes en couverture morte ont l'avantage de ne pas nécessairement impliquer des herbicides. Mais, nous le savons, ils sont moins puissants en terme de productivité. Par ailleurs ils impliquent des paillages qui peuvent occasionner des problèmes graves de « faim d'azote ». Les systèmes sur couverture vive sont plus difficiles à maîtriser, ce en particulier de part l'obligation de faire appel aux herbicides, et ce de façon très précise et raisonnée. Ainsi on avance en général que l'adoption de systèmes sur couverture morte est une étape intermédiaire « nécessaire » pour que l'agriculteur maîtrise les concepts. Par ailleurs les herbicides ont un certain coût et impliquent surtout la disponibilité d'un pulvérisateur.

## 2.5 Cadre institutionnel de l'étude

### 2.5.1 Le PCP SCRID : FOFIFA, UNIVERSITE, CIRAD

#### Origine et Position institutionnelle :

Le pôle de compétence en partenariat (PCP) Système de culture et rizicultures durables (SCRID) est né, fin 2001, de la volonté du FOFIFA et du CIRAD de mettre en place une nouvelle forme de partenariat et d'y associer l'Université de Tananarive. Ils entendaient de créer ainsi une dynamique de recherche et de formation sur la question de l'amélioration des systèmes de culture à base de riz, une des problématiques centrales du développement agricole à Madagascar.

L'objectif principal est de consolider la durabilité (une production de qualité respectueuse de l'environnement, dans des conditions économiques intéressantes pour les producteurs) des systèmes de culture à base de riz pluvial et SCV. Il s'agit donc de

- Comprendre comment, pourquoi et dans quelles conditions les systèmes SCV permettent de reconstituer la fertilité du sol, d'atténuer le parasitisme et les effets des aléas climatiques sur le riz en peuplement et d'aboutir, en définitive, à des rendements plus élevés.
- Diversifier les solutions techniques et mettre au point des méthodes de gestion intégrée de la culture du riz – variété, peuplement, fertilisation, protection de la culture, respect de l'environnement – dans un contexte d'incertitude climatique et de faible intégration au marché.

Pour le Cirad-Ca le PCP s'intègre dans sa stratégie de recherche pour une production agricole durable en relevant 3 défis majeurs : la transformation des milieux cultivés en préservant l'environnement, la proposition de systèmes techniques diversifiés et de variétés adaptées, l'intégration de ces systèmes techniques au sein des filières et des marchés. Plusieurs thématiques scientifiques du département y trouvent leur terrain d'application : l'agroécologie, vue comme l'intégration des disciplines agronomique et environnementale pour concevoir des systèmes de culture (tout particulièrement pour répondre à des ressources en eau variables), la gestion de la qualité et la génomique appliquée.

Pour le FOFIFA le PCP met en œuvre une partie de la mission de son département riziculture chargé de conduire les recherches pour le développement durable de la riziculture. De même, le PCP assure sa mission d'appui à la diffusion des résultats de recherche et celle de la formation de son personnel scientifique et technique.

Pour l'Université de Tananarive, la participation au PCP s'inscrit dans la nouvelle politique de participation de l'université au développement du pays. Il s'agit d'institutionnaliser la recherche pour le développement et le travail multidisciplinaire au sein l'université. Il s'agit aussi de nourrir le contenu des enseignements de questions et de connaissances liées au développement du pays. Il s'agit en fin, de développer une formation de 3<sup>ème</sup> cycle spécialisée et des formations professionnelles.

On rappelle que le FOFIFA (« Foibem-pirenena momba ny Fikarohana ampin'ny Fampanandroana ny eny Ambanivohitra) (Centre National de Recherche Appliquée au Développement dans le monde rural) » est un établissement public sous tutelle du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (MESRES), dont la vocation est l'exécution de la politique nationale en matière de recherche pour le développement dans les domaines de l'Agriculture et de l'Elevage, de la Foresterie, de la gestion des ressources

naturelles, de la Gestion de l'eau et de l'Agro-économie/socio-économie. C'est la principale institution de recherche agricole du Système National de Recherche Agricole à Madagascar.

#### Structuration et démarche scientifiques du PCP SCRJD:

Quatre axes scientifiques majeurs s'articulent à un projet de développement : la création et la diffusion de systèmes de culture pluviaux à base de riz, privilégiant la gestion agro-biologique des sols et des cultures à travers le semis direct sur couverture végétale (SCV). Ces axes sont :

- Fonctionnement biologique, physique et chimique du sol sous systèmes SCV.
- Fonctionnement du peuplement du riz pluvial en système SCV, et ses implications pour la génomique appliquée et la création variétale.
- Connaissances et outils pour la lutte intégrés contre les ennemis du riz au sein des systèmes SCV.
- Connaissances et outils pour intégrer les systèmes de cultures riz pluvial / SCV au sein de la filière riz malgache.

La démarche retenue est l'approche systémique. Le choix des systèmes de culture à mettre au point et à proposer est guidé par une vision dynamique des systèmes reposant sur l'analyse de l'évolution des contraintes économiques, sociales et environnementales.

La cohérence des systèmes de culture est analysée, sur le plan physique à l'échelle de la topo séquence ou du terroir (espace cultivé, pâturage et bois) et sur le plan humain à l'échelle de l'exploitation et des communautés impliqués dans sa gestion de ce terroir.

L'intégration pluridisciplinaire des activités de recherche est réalisée sur le terrain à travers un nombre limité de dispositifs pérennes, mais évolutifs, permettant de tester des innovations en vraie grandeur avec les producteurs et d'analyser des interactions en conditions réelles.

Des études agro-climatologiques et économiques de zonage sont effectuées pour l'évaluation des effets et pour l'analyse *a priori* des extrapolations possibles.

La mise en œuvre de ces recherches est organisée de manière à assurer la formation doctorale des chercheurs du FOFIFA (investissement institutionnel) et la formation de jeunes ingénieurs et chercheurs malgaches (investissement en termes de développement) et européens.

L'ouverture à des questions de recherche transversales, telles que la gestion des espaces sylvo-agricoles, appelant à la participation des départements Forêt, Tera du Cirad, et/ou de portée internationale telles que la séquestration de carbone complètent ou viendront rapidement compléter les orientations initiales de recherche scientifique.

Les principaux partenaires de recherche actuels du pôle sont:

- l'IRD : au travers des UR Séquestration de Carbone et UR IBIS;
- l'Université de La Réunion ;
- D'autres départements du CIRAD : AMIS (PC : 3P/Réunion & Agronomie : MOST/Montpellier) ;
- le Groupement pour le Semis Direct à Madagascar (particulièrement TAFa, FIFAMANOR, ANAE, FAFIALA) ;
- la Fédération des paysans producteurs de semences.

#### 2.5.2 L'ONG TAFa

TAFa « Tany sy Fampanandrosoana » (Terre et Développement) est une ONG basée à Antsirabe, dans les Hautes terres, comprenant 4 antennes régionales dans différentes zones

écologiques du pays. Créée en 1995, son objectif était la poursuite des expérimentations sur le Semi-direct avec couverture végétale entreprises depuis 1991 dans le cadre de l'opération blé de la KOBAMA. L'intérêt croissant des différents partenaires du développement rural à Madagascar pour les techniques de gestion agrobiologique des sols a conduit Tafa à se spécialiser dans le SCV avec notamment l'appui technique du CIRAD.

Son rôle au sein du GSDM (Groupement Semi-Direct de Madagascar) concerne l'expérimentation et la mise au point d'itinéraires techniques en milieu contrôlé et la formation des formateurs issus des divers organismes de diffusion des techniques de SCV.

### 2.5.3 Le projet IRD-FFEM Séquestration du Carbone

En réponse à un appel d'offre du FFEM (fonds français pour l'environnement mondial), l'Unité de recherche "Séquestration du carbone" (UR N° 041) de IRD a mis en œuvre un projet de recherche visant à quantifier et caractériser la séquestration du carbone dans les sols tropicaux par les systèmes en semi-direct sur couverture végétale. Un des termes de référence de ce projet est de travailler sur les terrains mis en œuvre par le CIRAD et ses partenaires. Plusieurs pays sont concernés: Brésil, Laos, Mali et Madagascar pour l'instant.

La séquestration de C réfère au problème de la recherche de solutions conduisant à un ralentissement de l'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre (GES, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) dans l'atmosphère. L'utilisation de systèmes performants permettant de séquestrer du carbone dans les sols, au lieu qu'il s'échappe, suite à sa minéralisation, sous forme de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>, fait partie des solutions envisagées pour la réduction de la teneur atmosphérique de ces gaz. C'est le cas des systèmes SCV qui, en plus de ses multiples avantages, produisent beaucoup de biomasse (aérienne et racinaire), et restitue donc du C au sol et favorise sa protection dans le sol.

L'objectif général du projet est d'évaluer la capacité des systèmes (SCV) à séquestrer le C dans le sol. Seront donc évaluées, et la quantité de carbone (C) séquestré sous ces systèmes, et sa qualité, intégrant ainsi sa localisation et ses différentes formes de protection dans le sol (physique et physico-chimique) contre la minéralisation. Cette étude est effectuée dans le but :

- d'apporter éléments chiffrés précis relatifs à divers systèmes SCV sous diverses conditions écologiques,
- de contribuer à la compréhension des mécanismes mis en jeu dans le fonctionnement des systèmes SCV (évolution MO) et,
- d'apporter quelques informations nécessaires lors des futures négociations internationales concernant le monnayage des stockages de carbone.

Cette évaluation sera étudiée suivant deux approches :

- approche synchronique : où la séquestration de C sous SCV se fera par caractérisation des stocks de C sur les dispositifs SCV déjà existants et différenciés de l'ONG Tafa et CIRAD, en comparant systèmes labourés et systèmes SCV, prenant en compte différents types de couverture (morte ou vivante) et types de sol. Cette approche synchrone impliquera un inventaire des chronoséquences. Elle se déroulera lors des deux premières années du projet ; il est question ici d'évaluer les stocks de C, la texture et l'agrégation du sol dans des systèmes SCV existants, de différentes durées, dans différents contextes pédoclimatiques ; une estimation des biomasses produites sera faite sur tous les sites étudiés.

- approche diachronique : où l'évaluation de la séquestration du C sur les systèmes SCV se fera sur un dispositif spécial mis en place à cet effet, par une caractérisation initiale du niveau de stock de C (2003), et ensuite une caractérisation finale du stock de C après 5 ans.

L'essai agronomique (avec répétitions et analyse préalable de la variabilité spatiale des teneurs en C) sera mis en place l'année 2 du projet ; les traitements testés seront définis grâce aux premiers résultats de la phase d'inventaire dans la même zone pédoclimatique où l'essai sera situé, soit les hautes Terres de la région d'Antsirabe ; avant l'implantation de l'essai, stocks de C, texture, agrégation, émission de GES (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) seront caractérisés ; les mêmes analyses seront faites lors de l'année 5 du projet, soient quatre années après l'implantation de l'essai ; les biomasses aériennes produites seront caractérisées chaque année.

Différentes mesures seront pratiquées pour ces deux approches :

- Les stocks de C seront estimés par mesure de la densité apparente et de la teneur en C du sol. En effet, avec seulement les teneurs en carbone on ne peut pas avoir les quantités réellement présentes : les densités sont nécessaires.

**C'est dans le cadre de la campagne de mesures des densités apparentes que nous avons collaboré avec le projet.**

- Les différentes formes de C seront étudiées au laboratoire par des fractionnements physiques de la matière organiques.

- La protection de C dans le sol seront évaluées d'abord par une étude de la stabilité des agrégats, ensuite par une caractérisation de la localisation de la matière organique dans ces agrégats et finalement par comparaison de la minéralisation du C, en conditions standards, de sol non broyé (agrégats conservés) et de sol broyé (agrégats détruits).

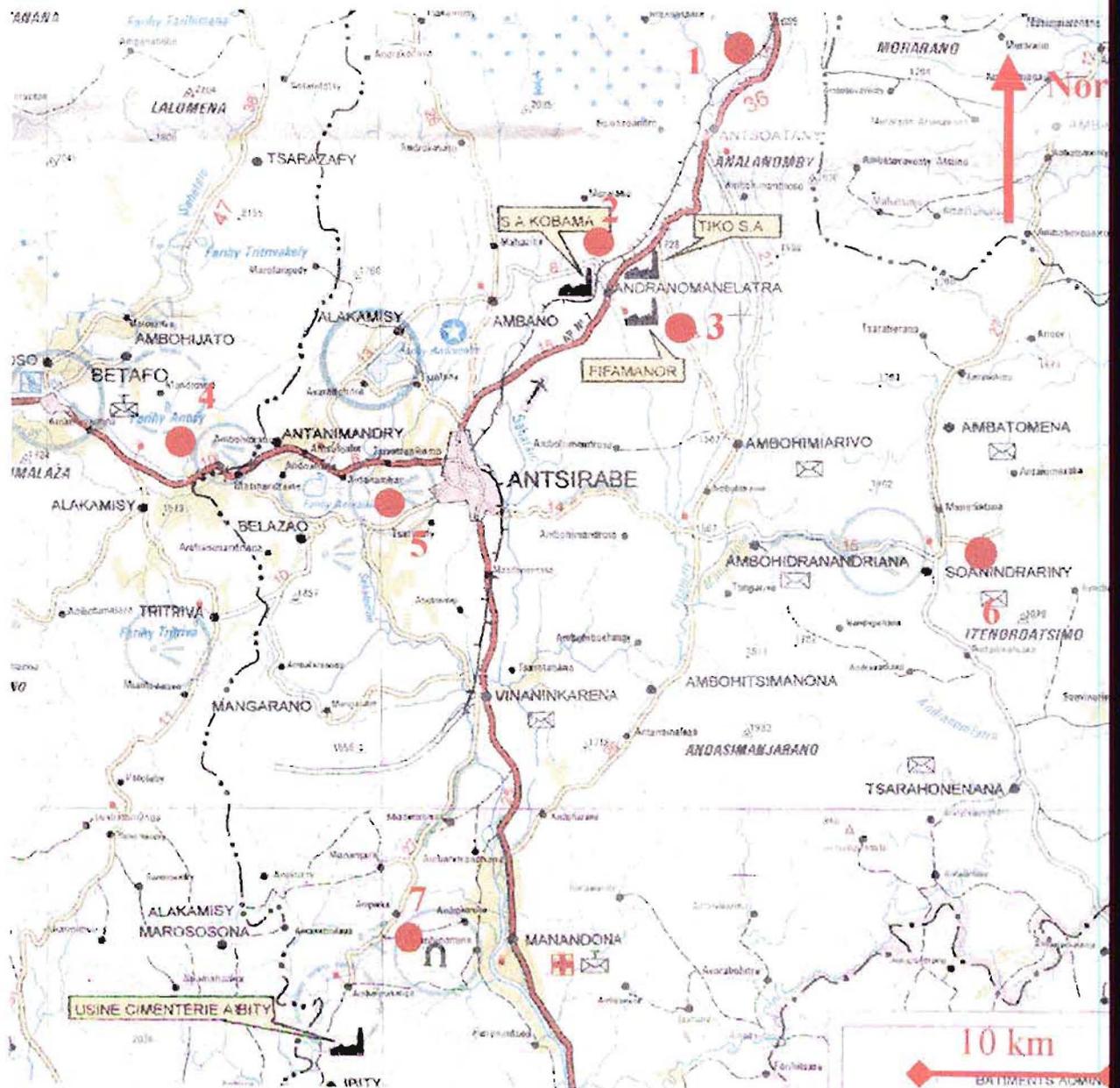
- Une mesure des émissions d'autres gaz à effet de serre (méthane et oxyde nitreux) est aussi envisagée sur le dispositif diachronique afin de bien prendre en compte tous les flux de GES concernés.

Ainsi, la finalité principale de cette proposition est de caractériser la séquestration du carbone dans les sols sous des pratiques alternatives type SCV. Ce résultat majeur sera associé à des éléments de réponse concernant les processus en cause, ce qui devrait orienter les recherches sur de nouvelles pratiques selon leur impact sur l'environnement. Par exemple, pour un système climat-sol-plante donné, si les pertes en carbone sont liées aux processus érosifs plus qu'à la minéralisation (émission de GES), les pratiques à développer devront prendre en compte la conservation des sols plus que l'accroissement du stockage du carbone dans le sol, et inversement.

Dans cette proposition dédiée à Madagascar, la diversité des sites étudiés, climats-sols-modes de gestion, est grande et devrait permettre de qualifier certains facteurs limitant à la séquestration du carbone dans les sols. Ainsi des domaines de recommandations pourront être formulés afin de cibler les zones agroclimatiques dans lesquelles un bénéfice global (la séquestration du carbone) peut être associé à un bénéfice pour le paysan (amélioration du niveau de vie grâce aux pratiques SCV).

La qualité et la quantité des résultats obtenus lors de ce projet seront également valorisées en termes de production scientifique. La publication d'articles dans des revues internationales est un des produits attendus de ce projet, avec l'ensemble des partenaires comme co-signataires des articles proposés.

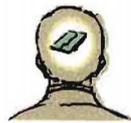
CARTE n° 4 : Sites d'intervention Pôle « PCP SCRID & TAFA »  
région du VAKINANKARATRA



1. Antsapanimahazo : TAFA, CIRAD, parc. paysannes; 1600 m, sols ferrallitiques sur sédiments
  2. Andranomanelatra : TAFA, PCP, mise au point, dispositif recherche principal; 1650 m, sols ferrallitiques sur sédiments
  3. Andranomanelatra : FIFAMANOR, PCP, dispositif recherche; 1600 m, sols ferrallitiques sur sédiments
  4. Betafo : TAFA, PCP, mise au point, dispositif recherche; 1300 m, sols volcaniques
  5. Talata : PCP, dispositif recherche; 1450 m, sols ferrallitiques sur sédiments
  6. Soanindrarinny : PCP, recherche sur parc.paysannes; 1800 m. sols ferrallitiques sur substrat cristallin
  7. Ibity : TAFA, PCP, mise au point, dispositif recherche; 1550 m, sols ferrallitiques sur substrat cristallin
8. Ivory : 70 Km plein ouest, 900 m : TAFA, PCP, mise au point, dispositif recherche, parc. paysannes, sols ferrallitiques sur colluvions

*Partie III:*

**MATERIELS ET METHODES**



### 3 MATERIEL ET METHODES

#### 3.1 Les caractéristiques physiques du sol : présentation et mesure

Le sol est le milieu situé en surface de la croûte terrestre et sur lequel, dans des conditions climatiques convenables, peuvent se développer les espèces végétales très diverses qui recouvrent les terres émergées. Comme tous les milieux, le sol est doté de différentes propriétés mais nous nous consacrons surtout aux propriétés physiques.

##### 3.1.1 Texture et granulométrie

Les expressions granulométrie, composition granulométrique et texture sont synonymes et se réfèrent à la répartition des particules minérales en fonction de leurs grosseurs (dimensions), et cela indépendamment de leur nature chimique. Elle est exprimée en pourcentage à base du poids de chacune des fractions du sol. Cette proportion se détermine après destruction des agrégats.

Différentes échelles de classement ont existé, suivant les époques et pays. A l'heure actuelle on doit se référer à l'échelle internationale suivante :

Tableau n°4 : Echelle de classement des textures du sol

Fraction du sol	Diamètres des particules
Cailloux et graviers	> 2 mm
Ils sont en dehors de la granulométrie	
Ci-dessous les fractions prises en compte dans la granulométrie et/ou structure :	
Sables grossiers	0.2 mm - 2 mm
Sables fins	0.050 mm - 0.2 mm
Limons grossiers	0.020 mm - 0.050 mm
Limons fins	0.002 mm - 0.020 mm
Argiles au sens large, ou « particules fines »	< 0.002 mm

SOURCE : DUCHAUFOR, 1988.

La présentation graphique des résultats de l'analyse granulométrique peut se faire par plusieurs méthodes. La plus connue et la plus utilisée est la représentation en coordonnées trinéaires : *le triangle textural*. Les constituants sont regroupés en trois fractions principales et chaque zone obtenue sur le triangle (diagramme granulométrique) sert à déterminer l'unité texturale correspondante d'après la proportion de chacune de ces trois fractions. Le point caractéristique d'un sol donné est le point de concours de trois droites parallèles aux côtés, obtenues en portant sur chaque côté les valeurs en % de l'argile, des limons et des sables.

##### 3.1.2 Structure

La structure d'un sol se définit comme la façon dont sont assemblées les particules. Ces particules se présentent en général sous forme d'agrégats qui doivent leur cohésion essentiellement aux argiles et aux colloïdes humiques. La structure d'un sol est l'arrangement

spatial des particules minérales et leur éventuelle liaison par la matière organique, des hydroxydes de fer et/ou d'alumine à un moment donné de la vie du sol.

L'arrangement des particules, qui définit la structure, implique des espaces entre les particules qui sont des pores, des fentes, et qui constituent dans leur ensemble « la porosité du sol » ou « espace poral ».

On distingue plusieurs structures dont les principales sont :

- structure particulaire : les particules ne sont pas soudées entre elles soit par insuffisance de colloïdes (structure meuble), soit par dispersion des colloïdes (structure massive) (sol argilo limoneux).
- structure pelliculaire : les colloïdes forment une pellicule autour de grains de sables qui peuvent être soudés entre eux pour donner des éléments plus ou moins durcis.
- structure construite : elle peut former de petits grumeaux irréguliers ou de grumeaux arrondis.
- structure par fragmentation : les éléments présentent des arrêtes anguleuses. Sur cette classe on distingue :
  - structure en plaquette ;
  - structure prismatique : perçue sous l'aspect de piliers verticaux, à pans plus ou moins marqués, pouvant atteindre 10 à 15 cm de diamètre ;
  - structure polyédrique ou cubique, formée de masses anguleuses de plusieurs centimètres de diamètre, sans direction privilégiée.

Notons que certains facteurs détruisent la structure, d'autres la régénèrent : un travail du sol excessif diminue la stabilité de la structure de même qu'une hydratation trop brutale des agrégats, suivie d'une dessiccation rapide. Certains éléments interviennent sur la stabilité de la structure et ont des interactions positives comme par exemple le calcium, l'humus et le fer. D'une manière générale, les principaux facteurs de dégradation de la structure sont :

- acidification du sol par lessivage des ions calcium  $Ca^{++}$
- dispersion de la matière organique
- destruction des agrégats par une pluie violente ou excès d'humidité, eau salée d'irrigation, engrais sodiques
- labour profond qui ramène en surface des couches sans matières organiques.

Par contre, d'autres facteurs maintiennent la structure d'un sol comme la présence d'humus (matière organique), ions  $Ca^{++}$ , végétation, humidité du sol à un degré voulu et le drainage lorsqu'il est nécessaire.

### 3.1.3 Densité réelle

#### **Présentation:**

La densité réelle ou poids spécifiques réel des particules (PSR), est le poids sec par unité de volume des particules du sol: il oscille autour de  $2.6g/cm^3$ . La densité réelle ne dépend que des natures chimiques des particules du sol. La présence de matières organiques réduit cette valeur. La densité réelle est parfois dénommé aussi « densité sèche ».

La densité réelle du sol est donnée par la formule suivante :

$$PSR = P_s / V_s$$

Avec  $P_s$  : poids sec des particules du sol,

$V_s$  : volume occupé par les particules solides du même échantillon

#### Mesure :

Une des méthodes pour déterminer le PSR consiste à peser un échantillon de sol qui a été desséché préalablement à l'étuve à 105°C (pendant 48 heures et/ou jusqu'à poids constant) et à l'introduire ensuite dans un pycnomètre, qui est une éprouvette graduée particulière et adaptée à l'opération, qui contient un volume d'eau connu. On agite cette solution du sol soigneusement pour chasser les bulbes d'air et on lit l'ascension de l'eau équivalente au volume total du sol.

Cette méthode du pycnomètre a été appliquée à certains de nos échantillons au laboratoire MOST du CIRAD à Montpellier.

### 3.1.4 Densité apparente

#### Présentation :

La densité apparente ou poids spécifique apparent du sol ( $D_{app}$  ou PSA), est le poids sec par unité du volume total du sol en place non remanié, autrement dit "tel qu'on le trouve sur le terrain". Il inclut donc le volume occupé par les particules du sol et les volumes des pores et fentes.

La densité apparente est l'un des variables de position et des variables dimensionnelles qui sont liés à la nature des constituants du sol, s'ajoute le fait qu'elles sont liées à l'organisation de ces constituants entre eux qui laisse des vides formant la porosité.

On l'obtient par la formule suivante :

$$PSA = P / V_a$$

Avec  $P$  = poids sec de l'échantillon prélevé

Et  $V_a$  = volume en place et non remanié ("tel qu'il se trouve") de l'échantillon de terre considéré

Tableau n°5 : valeurs représentatives de densité apparente

Substrat (ou sol)	PSA (g/cm <sup>3</sup> )
Scories	0.80 -0.90
Sol argileux	1.10 -1.30
Sols francs	1.30 -1.45
Sols sableux	1.50 -1.70

### Mesure :

La difficulté est de déterminer le volume en place. Plusieurs mesures existent. Une des méthodes les plus simples et connues pour déterminer les densités apparentes est celle dite "du cylindre de densité", que nous avons mises en œuvre, qui consiste à prélever des échantillons de sol non remaniés à l'aide de cylindres métalliques de volume parfaitement connus que l'on enfonce dans le sol et à déterminer ensuite les poids secs des échantillons prélevés.

On obtiendra des résultats différents suivant la dimension des échantillons prélevés: en effet par exemple si on considère de trop petits volumes on risque de ne pas considérer toute la macroporosité, en particulier les fentes. La localisation joue également : par exemple sur les lignes de culture au niveau des racines principales, ou entre les lignes.

Note : la densité apparente est nécessaire en calcul des humidités volumiques, au travers des formules suivantes :

Humidité pondérale :

$$HP\% = (Ph - Ps) / Ps$$

Humidité volumique :

$$HV\% = (Ph - Ps) / Va$$

Avec, Ph= poids humide de l'échantillon

Ps= poids sec de l'échantillon

Et,  $HV\% = HP\% \times D_{app}$

En règle générale, il n'est pas nécessaire de conserver les échantillons dans leurs cylindres pour les ramener au laboratoire. Lorsque le prélèvement a été réalisé, les faces supérieures et inférieures parfaitement arasées de façon à ce que le sol occupe parfaitement et exactement le volume du cylindre, le sol contenu dans le cylindre peut être extrait, sans en perdre, pour être stocké pour le transport dans un sachet (plastique et fermé de façon étanche si on veut également déterminer l'humidité pondérale).

### 3.1.5 Porosités, macroporosité et microporosité

#### Présentation :

C'est le volume des espaces lacunaires du sol remplis d'eau ou d'air et est exprimée en pourcentage du volume total du sol. On peut distinguer différents types de porosité, en fonction des espaces lacunaires auxquels on se réfère.

La porosité globale (totale) se déduit de la densité apparente et de la densité réelle par la formule suivante :

$$P\% = \frac{(PSR - PSA)}{PSR} \times 100$$

### Maroporosité, mésoporosité et microporosité :

On divise l'espace poral en différentes fractions qui correspondent à des diamètres de pores différents. Il existe des différences entre les auteurs en ce qui concerne les noms des différentes composantes de la porosité, mais heureusement il y a des points communs, en particulier les limites des classes sont les mêmes. Nous avons fait une synthèse que nous présentons au tableau n°6.

Tableau n°6 : Typologies des porosités et états et disponibilités de l'eau du sol

tailles des pores	> 50 µm	10 – 50 µm	0,2 – 10 µm	< 0,2 µm
types de pores	grossiers	moyens	fins	très fins
types de porosité	non capillaire		capillaire	
dénominations 1 (a)	macroporosité		microporosité	
dénominations 2 (b)	macroporosité	mésoporosité		microporosité
dénominations 3 (c)	macroporosité	6 – 50 µm mésoporosité pénétrée par les racines	0,2–6 µm microporosité non pénétrée par les racines	porosité matricielle
état de l'eau dans le sol	drainage très rapide (en quelques heures)	drainage lent (plusieurs jours voire semaines)	retenue	retenue très fortement
absorbabilité de l'eau par les racines	oui mais elle disparaît très vite	oui	oui	non
types d'eau	eau de gravité	eau de gravité	eau capillaire absorbable	eau liée ou eau capillaire non absorbable ou encore « eau d'absorption »
<b>Considérations agronomiques en ce qui concerne l'alimentation en eau des plantes</b>				
types d'eau 1 (d)	eau non utile	eau utile	eau utile	eau non utile
réserve utile 1 (d)	non	oui (en partie)	oui	non
types d'eau 2 (e)	eau non utile	eau non utile	eau utile	eau non utile
réserve utile 2 (e)	non	non	oui	non
Limites de la réserve utile		capacité au champ		point de flétrissement permanent
pF aux limites		pF 1,8 (d)	à pF 2,5 (e)	pF 4,2
succions correspondantes		0,06 bars	0,3 bars	16 bars

(a) et (e) d'après DUCHAUFOR, 1988. (e) correspond au standard classique (ancien) pratiqué en France pour déterminer la capacité au champ.

(b) et (d) d'après GOBAT et al., 1998.

(c) d'après CALLOT et al., 1982, cités dans GOBAT et al., 1998. La valeur de 6 µm étant considérée comme le diamètre inférieur des pores accessibles aux racelles.

Il existe encore d'autres façons de caractériser la porosité, comme par exemple celle proposée par Guéris (1987):

- la porosité structurale, au dessus de 10  $\mu\text{m}$ , représente l'espace poreux correspondant aux fissures délimitant les éléments structuraux, et aux cavernes canalisantes... d'origine biologique ou parfois liés à des processus pédologiques.
- et la porosité dite mottière (< 10  $\mu\text{m}$ ) qui est propre aux éléments structuraux ou groupements d'éléments structuraux.

Cette porosité mottière se subdivise elle-même en deux :

- une porosité propre aux éléments structuraux élémentaires, dite porosité texturale ou porosité lacunaire, correspondant aux pores de 50 nm à 10  $\mu\text{m}$  : cette porosité est caractéristique du matériau et se trouve liée à sa composition granulométrique. Elle représente le volume des vides entre les particules élémentaires d'argile et le squelette, à l'état humide ou à l'état sec. Fies et al. (1981) divisent cette classe en deux sous-classes:
  - o porosité lacunaire due aux particules de sables
  - o porosité lacunaire due aux particules de limons.
- enfin, la porosité correspondant aux pores < 50 nm, il s'agit de pores ménagés par l'assemblage élémentaire des particules d'argiles (porosité liée à la teneur en argile). Elle n'est pas totalement mesurable par la porosité au mercure (limitée aux pores > 6 nm).

Lorsque les mottes proviennent d'une structure continue ou massive ou si elles sont des éléments structuraux simples et non compactes, la porosité de fissures intra mottière est alors nulle et la porosité mottière fond avec la porosité texturale

Les différentes classes de porosité sont liées par les relations suivantes :

$$\mathbf{Vg = Vf + Vm} \text{ (relation 1)}$$

et

$$\mathbf{Vm = Vt + Vfim} \text{ (relation 2)}$$

Avec,

- Vg = Volume total en global des vides
- Vf = Volume des fissures entre les mottes
- Vm = Volume des vides à l'intérieur des mottes
- Vt = Volume des vides dans les éléments structuraux élémentaires
- Vfim = Volume des fissures intra mottière.

Pour évaluer les différentes classes de porosité il est nécessaire de procéder aux mesures suivantes : densité réelle du sol ; densité apparente texturale ; densité apparente mottière ; densité apparente globale du sol.

Remarque :

Si par exemple on considère 100cm<sup>3</sup> de sol en place et si la porosité de fissure ou porosité structurale est égale à Ps%, le volume total des mottes dans 100cm<sup>3</sup> est égal à 100-Ps. Si la porosité des mottes est Pm%, le volume des vides situés à l'intérieur des mottes contenues dans 100cm<sup>3</sup> est égal à :

$$\frac{(100-Ps)Pm}{100} \text{ (relation 3)}$$

Le volume total des vides dans 100cm<sup>3</sup> de sol en place, c'est à dire la porosité globale Pg% est donc :

$$Pg = Ps + \frac{(100 - Ps) Pm}{100} = Pm + \frac{(100 - Pm) Ps}{100}$$

Le même raisonnement s'applique à la relation entre porosité mottière et porosité texturale et l'on obtient ainsi la relation suivante :

$$P_m = P_{fim} + \frac{(100 - P_{fim}) P_t}{100}$$

dans la quelle :

$P_m$  = porosité des mottes

$P_{fim}$  = porosité des fissures intra mottière

$P_t$  = porosité texturale.

### **Caractérisation de la porosité par porosimétrie au mercure**

Comme dit, on peut déterminer la porosité globale sur la base des densités réelles et apparentes. Mais seule la méthode dite porosimétrie au mercure permet d'avoir une description de l'espace poral.

#### Objectif.

La porosimétrie au mercure a pour but de déterminer, sur de petits volumes de sol, la porosité de l'échantillon ainsi que la distribution de la taille des pores appelée spectre poral.

#### Principe de la méthode.

La porosimétrie au mercure est une méthode proposée en 1921 par E.W. Washburn pour déterminer la distribution de la taille des pores dans des matériaux poreux, développée sur divers types de matériaux solides (Ritter et Drake, 1945), puis appliquée à des échantillons de sol de petite taille (Diamond, 1970; Nagpal et al, 1972; Lawrence, 1978; Pellerin, 1980; Fiés, 1984).

La méthode consiste à mesurer, dans un échantillon de sol préalablement séché et dégazé, le volume cumulatif de mercure introduit dans la porosité, lorsque des pressions croissantes lui sont appliquées. Le mercure étant un fluide non mouillant, son intrusion dans la porosité ne peut se faire que par application d'une pression, d'autant plus importante que les pores sont fins. Considérant des pores cylindriques, la pression appliquée peut être reliée au diamètre équivalent des pores par l'équation de capillarité dont l'expression est :

$$P = -4\gamma \cos\theta / D$$

Avec  $\gamma$  tension superficielle du mercure ( $\text{Nm}^{-1}$ ),  $\theta$  angle de raccordement du ménisque à l'interface mercure-solide,  $D$  diamètre (m), et  $P$  pression appliquée (Pa).

Cette relation permet de représenter la courbe cumulée d'intrusion de mercure en fonction du diamètre d'entrée des pores, soit  $V_p = f(D)$ , avec  $V_p$  = volume poreux. Le spectre poral correspond à la dérivation de cette courbe sous la forme  $dV_p/d \log D = f(\log D)$ .

#### Apport de la méthode décrite.

Comparativement aux autres méthodes, la porosimétrie au mercure est une méthode facile à mettre en oeuvre permettant une obtention rapide du spectre poral et ne nécessitant qu'un faible échantillonnage de sol. Le spectre poral est défini pour une gamme très étendue de diamètre (0.006 $\mu\text{m}$  à 400 $\mu\text{m}$ ) à partir d'un nombre important de points de mesure et la méthode permet en outre d'appréhender l'effet d'hystérèse.

La mesure est effectuée sur des petits échantillons (mottes).

La méthode consiste à trouver la porosité et la distribution de la taille des pores. Pour cela, on verse le mercure (fluide non mouillant) et on mesure les pressions entre le liquide et les pores de l'échantillon. Les résultats donneront « le spectre poral ».

Dans le cas de notre étude, nous avons utilisé un porosimètre qui ne permettant cependant pas d'explorer l'espace poral inférieur 0,006  $\mu\text{m}$ .

### 3.1.6 Compacité, dureté et pénétrométrie

Nous avons vu que la porosité d'un sol est en relation inverse avec sa *compacité et/ou degré de compaction*: **plus le sol sera compacté, "tassé", plus sa densité apparente augmentera et sa porosité diminuera**. La notion de compaction (et/ou degré de compacité) doit donc avant tout se comprendre, s'analyser, de façon comparative, en référence à un autre état, passé, présent ou à venir, ou sur un autre site, qui sera jugé "plus compact" si la densité apparente est plus forte (porosité totale plus petite) et/ou au contraire "moins compact" (densité apparente plus faible, porosité plus importante).

Le passage d'engins agricoles relativement lourds sur un sol humide va par exemple entraîner une compaction du sol (augmentation de la densité apparente). C'est en premier lieu la macro-porosité qui est affectée, puis ensuite, si la compaction est très forte, la micro-porosité (la micro-porosité inter-agrégats).

La "dureté" et/ou résistance d'un sol à la pénétration (des racines ou d'un outil), est une notion plus complexe que celle de « la compaction » car elle dépend de divers aspects:

- de la porosité (donc de la texture et de la structure) ;
- de l'humidité du sol ;
- enfin, elle peut être également affectée par la présence de racines qui font obstacle à la pénétration.

Contrairement à la densité apparente et/ou à la porosité, la « dureté » n'est donc pas une donnée "absolue" puisqu'elle peut donc varier d'un jour à l'autre, après une pluie par exemple, alors que la densité apparente et la porosité ne sont pas affectées par l'humidité (sauf dans le cas très particulier des argiles gonflantes), et n'évoluent que lors des interventions humaines et/ou lentement du fait des cultures, activités biologiques et conditions climatiques.

On a essayé de standardiser la détermination de la "dureté" d'un sol: la mesure consiste à déterminer l'énergie nécessaire pour faire pénétrer dans le sol une tige à extrémité conique de caractéristiques déterminées.

On utilise un appareil dit "pénétromètre" qui est constitué, (a) d'une tige à extrémité conique, que l'on va enfoncer dans le sol (verticalement ou horizontalement), qui est montée sur (b) un "dynamomètre" sur lequel l'utilisateur appuie. On lit sur le cadran du dynamomètre la force que l'on exerce pour enfoncer la pointe conique dans le sol (sur une petite distance: de 0,5 cm à quelques centimètres).

L'appareil que nous avons utilisé dispose d'un jeu de 4 cônes différents. On doit veiller à rester dans la gamme de bon fonctionnement du dynamomètre. Pour cela on choisit la taille

du cône en fonction de la dureté du sol: plus le sol est dur, plus on réduit la taille du cône, et inversement.

La mesure pénétrométrique permet de mettre en évidence la structure du sol dans diverses situations culturales :

- action des outils de travail du sol : profondeur, ameublissement.
- mesures fines dans un lit de semence : effet de tassement et de lissage du sol par divers matériels de semis (exemple : effet du soc du semoir sous la zone de placement de la graine, modelé de la surface du sol sur la ligne de semis.)
- action de tassement du sol : effet des pneumatiques, profondeur, type, semelle...
- évolution des horizons cultivés : phénomène de prise en masse, reprise en masse, croûte de battance.

### 3.1.7 Caractéristiques hydriques

#### L'eau dans le sol :

La phase liquide du sol est une solution très diluée d'éléments ou composés minéraux, généralement sous forme ionique, et de substances organiques en très faibles quantités. Cette phase assure dans un sol cultivé l'alimentation en eau du végétal, au bénéfice duquel elle assume également le transfert des éléments nutritifs.

Dans le sol, l'eau peut se trouver sous différents états (se référer au tableau n°6):

- l'eau de gravité :

C'est l'eau qui circule dans les pores les plus grossiers du sol sous l'effet de la pesanteur. Elle s'écoule à travers le sol jusqu'au point de ressuyage (ou capacité de rétention, notion introduite par Briggs et Mac Lane dès 1907) et cela d'autant plus vite que le volume des pores grossiers est plus élevé. Cette eau est très peu utilisable par les plantes.

- l'eau capillaire absorbable :

Elle remplit les pores les plus fins (la microporosité). Cette eau est retenue plus ou moins énergiquement par le sol suivant la finesse des canaux capillaires dans lesquels elle se trouve. L'eau capillaire est l'eau retenue par un sol déjà ressuyé. Cette eau absorbable par les racines est appelée l'eau de la réserve utile. Elle peut constituer un apport d'eau important en période sèche.

Elle est susceptible de se mouvoir par diffusion capillaire. Lorsque toute cette eau est consommée par les plantes, on atteint le stade de « *point de flétrissement permanent* ».

- l'eau hygroscopique :

C'est l'eau absorbée par le sol à partir de l'humidité atmosphérique, elle est retenue sous forme de films très minces autour de particules de sol. Elle est trop fortement retenue par celui-ci pour être absorbé par les plantes.

Dans la pratique, deux états caractéristiques de l'eau sont retenus :

- le point de ressuyage ou capacité de rétention (CR) ou capacité au champ (CC) ;
- le point de flétrissement permanent (pFp).

La différence des quantités d'eau retenue dans ces deux états est la quantité d'eau réellement utilisable par la plupart des plantes : c'est la réserve utile.

## Les humidités caractéristiques

### *Saturation :*

L'eau emplit tous les espaces lacunaires, vides d'air ; une partie de cette eau va s'écouler rapidement par gravité (eau de drainage) pour atteindre la capacité au champ.

### *Capacité au champ ou capacité de rétention :*

C'est la quantité maximale d'eau retenue par le sol après son ressuyage. En effet, c'est la teneur maximale en eau non mobilisable par la seule force de gravité. Ainsi, il est évident que la capacité de rétention ne peut être déterminée que sur le sol en place.

### *Point de flétrissement permanent :*

C'est le taux d'humidité minimale d'un sol à partir duquel les plantes ne peuvent plus extraire l'eau du sol et se fanent. Il correspond à la limite inférieure d'humidité au delà de laquelle l'eau ne peut être absorbée par les plantes car elle est fortement retenue par le sol.

Sa valeur admise par les auteurs et les spécialistes est de pF 4.2 (voir plus loin).

## Etats énergétiques de l'eau dans le sol

### *Le potentiel matriciel :*

L'eau retenue dans le sol, dans la matrice poreuse, dans les capillaires, aux points de contact entre grains et autour des particules échappe à l'action de la gravité, cela signifie que son énergie libre a diminué par rapport à celle de l'eau libre. Cette diminution d'énergie est appelée *potentiel matriciel*, dû ainsi à l'ensemble des forces de capillarité et d'absorption de la matière solide encore appelée forces de succion. Le potentiel matriciel est ainsi *le travail qui doit être accompli pour transférer de façon réversible et isotherme l'unité de masse d'eau libre (état standard) en une unité de masse d'eau fixée par le sol.* (Robert MOREL, 1989).

Le potentiel matriciel, qui à nos jours, remplace le potentiel capillaire est mesuré sous forme de *pression*. On écrit :

$$S = -hm$$

avec  $S$  = succion exercée par le sol (toujours  $>0$ )

$hm$  = la hauteur capillaire représentative de *la pression effective* :  $(P_e - P_a)$

En pratique on considère le plus souvent une échelle de mesure différente des suctions : leur logarithme. Cette échelle est dite « pF ». On écrit :

$$pF = \log(S) = \log(-hm)$$

## Courbes des pF ou courbes de rétention en eau, courbes d'humidité

La courbe de rétention en eau du sol consiste à mesurer, à partir de la saturation, la quantité d'eau retenue par le sol en fonction de la succion appliquée. La réalisation des courbes de pF est l'une des méthodes permettant de caractériser les propriétés physiques, en particulier hydriques, du sol. En effet les courbes de pF sont fonction de l'organisation structurale qui définit l'espace poral qui influence l'énergie de l'eau qui circule entre les pores.

La teneur en eau est déterminée en continu, en mesurant à chaque pas de succion et après le temps d'équilibre correspondant, le poids ou le volume d'eau retenu par le sol. On aura en particulier (cf. tableau 6):

- la capacité au champ au pF 2,5 , soit environ 300 mbar (0,3 bar) ;
- le point de flétrissement permanent au pF 4,2 , soit 16000 mbar (16 bars).

Remarque : on observe des différences selon que le pF est déterminé au cours de l'humectation ou du dessèchement : cette particularité est le phénomène de l'hystérésis.

### 3.2 Quelques références concernant les effets des systèmes SCV sur les caractéristiques physiques des sols

#### 3.2.1 Effets escomptés des SCV et facteurs influençant l'état structural du sol :

De façon générale, les SCV améliorent non seulement l'état structural du sol mais le protègent également contre les facteurs climatiques de dégradation (vent, pluie...). Ils limitent de plus les actions anthropiques qui entraînent une dégradation du sol : lutte efficace contre l'érosion. Leurs effets sont présentées au tableau numéro 7.

Tableau n°7 : Facteurs défavorables influençant l'état structural du sol et effets des SCV.

Facteurs défavorables	Effets escomptés
<b>1. Effets sur les caractéristiques physiques du sol</b>	
Texture limoneuse ou argileuse de type Kaolinite+ in faible taux de matière organique	Améliorer la stabilité structurale. Enrichissement en matière organique par décomposition de la couverture végétale
	<b>Régénérer une structure dégradée :</b> Actions des racines des plantes de couverture et augmentation des activités biologiques dans le sol, d'où augmentation de la porosité des sols
<b>2. Effets sur les facteurs de dégradation des sols et sur l'érosion</b>	
<b>Actions anthropiques :</b> -passage de machines lourdes en conditions humides : création d'une semelle de labour limitant l'infiltration et favorisant les glissements de terrain -sol pulvérisé en surface	-limitation du nombre de passage des machines en cours de culture -Sol non travaillé avant le semis
<b>Vent et érosion éolienne :</b> -Vents violents -Sol nu pulvérisé	-Protection par couverture végétale
<b>Pluie et érosion hydrique :</b> -Pluies violentes (densité et répartition) -Pentes fortes ou pentes faibles mais longues -Sol nu	-Réduction de l'impact (effet splash) par couverture végétale, donc diminution du ruissellement et de son énergie cinétique

SOURCE : DOUNIAS, 2001.

3.2.2 Quelques références chiffrées concernant les effets des SCV sur les propriétés physiques des sols :

a) densités apparentes des sols sur trois systèmes de culture (Offset, labour, Semis direct) à Goiânia, état de Goiás, Brésil :

Tableau n°8: Valeurs de densités apparentes par type de travail du sol à Goiás, Brésil

	Offset A	Offset C	Labour profond	Semi-direct
Densité cylindre de 8 cm (g/cc)	1.27	1.29	1.19	1.23
Densité cylindre de 5 cm (g/cc)	1.34	1.38	1.27	1.30
Densité sur motte (g/cc)	1.51	1.51	1.43	1.41

SOURCE : Claire Lagaye, 1999.

On remarque que les densités apparentes sont plus faibles en semis direct, ce qui indique une amélioration de la porosité.

On note par ailleurs que les densités augmentent si l'on diminue le volume de l'échantillon : c'est normal car plus l'échantillon se réduit, plus on perd une partie de la macroporosité.

b) porosité totale de sols étudiés à Santa Helena, Goiás, Brésil :

Tableau n° 9: Porosité totale des situations étudiées à Santa Helena de Goiás, Brésil

	SD1	SD8	LR	Lab.conv	SD4	SD10	Forêt
0-10 cm	56.7%	60.5%	64.3%	65.0%	60.5%	61.0%	74.4%
10-20cm	57.4%	58.4%	62.6%	61.7%	59.0%	57.6%	
20-30cm	55.1%	61.4%	64.6%	63.2%	60.2%	56.4%	65.6%
30-40cm	60.7%	64.4%	67.0%	65.8%	62.2%	62.0%	
40-50cm	62.5%	64.8%	66.7%	65.8%	62.6%	63.1%	
50-60cm	62.0%	62.9%	66.1%	65.3%	62.6%	62.9%	68.2%

SOURCE : Sébastien Minette, 2000.

La porosité totale des sols varie ici de 55 à 65 % pour les parcelles cultivées et atteint la valeur de 74% en surface sous forêt. Ces valeurs montrent une dégradation après la disparition de la forêt, mais également une influence limitée des pratiques agricoles sur ce type de sol qui est un sol ferrallitique dégradé très argileux : il conserve une porosité élevée quelque soit la technique utilisée. On remarque en particulier que les situations labourées possèdent des valeurs de porosité plus élevées que celles en semis direct.

c) vitesses d'infiltration de l'eau dans des parcelles expérimentales à Goiânia, Brésil:

Tableau n°10: Infiltration moyennes et corrigées à Goiânia, Brésil

	Infiltration moyenne (mm/h)	Infiltration corrigée (mm/h)
Offset	303.10	60.38
SD	513.63	168.55
Labour	423.90	95.03
Forêt	3361.80	3237.20

SOURCE : Claire Lagaye, 1999.

### 3.3 Les mesures mises en œuvre

#### 3.3.1 Les sites d'étude

Nous avons principalement travaillé sur deux sites situés à Andranomanelatra, à environ 10 Km au Nord d'Antsirabe, où l'on trouve des dispositifs matriciels mis en place par l'ONG Tafa :

- le site dit « ferme Tafa d'Andranomanelatra », dont le sol est un sol ferrallitique argileux développé sur un substrat d'origine fluvio-lacustre ;
- le site Tafa de Bemasoandro, situé deux kilomètres plus au sud, dont le sol est très proche mais dont le substrat d'origine contient des cendres volcaniques, d'où la présence par endroit de couches dures de « cinérites ».

Ces deux sites sont situés à environ 1650 m d'altitude. Ces sols sont moins fertiles que les sols volcaniques que l'on trouve vers Betafo à l'ouest d'Antsirabe).

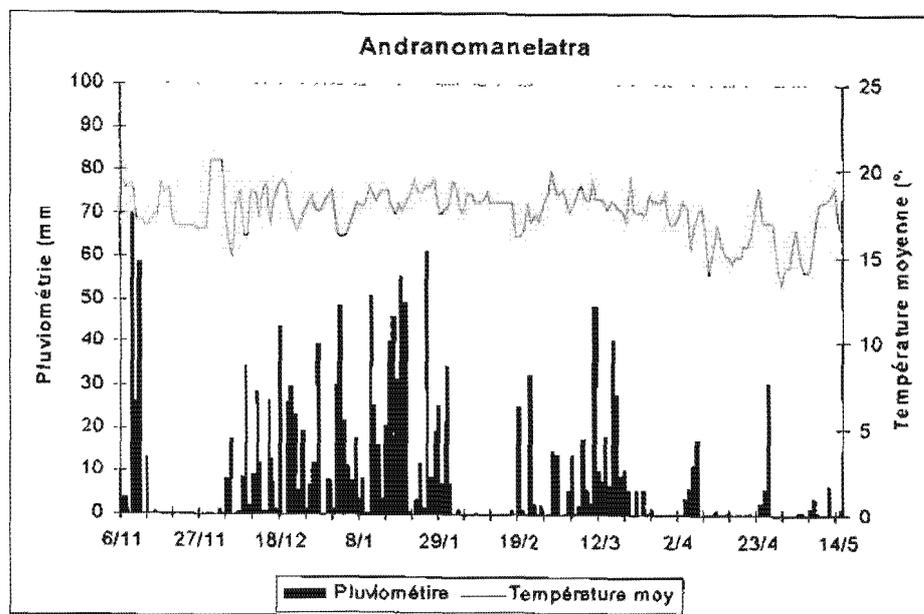


Figure 3 : pluviométrie et températures des sites d'Andranomanelatra au cours de la saison de culture 2002- 2003

Source : station automatique CIMEL appartenant au PCP SCRID

#### 3.3.2 Les systèmes étudiés

Le choix des systèmes a été décidé dans le cadre du projet FFEM séquestration de carbone.

On a choisi de travailler sur les traitements pour lesquels il existait des répétitions, de façon à pouvoir s'affranchir des variations du milieu et mieux caractériser les effets des traitements : en pratique nous n'avons pu trouver que 3 répétitions pour les traitements que nous avons finalement retenus, soit 3 parcelles pour chaque traitement étudié.

Nous avons dû examiner avec attention l'historique des différentes parcelles pour être certains d'avoir des répétitions vraiment identiques avec le même passé cultural depuis plusieurs

années. On présente en annexe n°2 et n° 3 la matrice TAFE d'Andranomanelatra avec l'historique des parcelles : on peut constater le nombre important de traitements et les évolutions des systèmes qui ont eu lieu sur certaines parcelles (cela du fait de la constante recherche d'amélioration et de mise au point des itinéraires techniques). Cela explique qu'il n'a pas été facile de trouver de nombreux traitements avec des répétitions en nombre suffisant.

Les traitements que nous avons pu retenir sont les suivants :

Sur la ferme TAFE d'Andranomanelatra :

- MM Sd : maïs année après année en semis-direct sur couverture permanente de Desmodium ;
- HS Sd : rotation haricot - soja en semis-direct sur couverture permanente de Kikuyu ;
- MS Sd : rotation maïs-soja en semis-direct : système où la protection du sol est assurée par les résidus de culture ;
- MS Lb : rotation maïs-soja en labour : ce sera notre seul traitement labour pour ce site.

Sur le dispositif de Bemasoandro :

- RS Sd : rotation riz-soja en semis-direct, la couverture étant assurée par les résidus ;
- RS Lb : la même rotation en labour ;
- MP Sd : rotation maïs-pomme de terre en semis-direct, la couverture étant assurée par les résidus
- MP Lb : la même rotation en labour.

Cela pour deux modalités de fumures sur les deux sites:

- F1 : fumier seul ;
- F2 : fumier plus fumure minérale minimale recommandée.

La photo numéro 1 permet d'apprécier le mulch présent en surface d'une des parcelles maïs-soja en SCV, avec fumure F2, d'Andranomanelatra après un cycle de maïs (juin 2003).

*Photo n°1 : mulch en surface du traitement maïs-soja SCV F2 à Andranomanelatra*



Dans les deux sites, les dispositifs expérimentaux sont identiques : split-plot avec trois répétitions.

Les détails des sites et dispositifs sont donnés en annexe n°1, 2, 3.

Le maïs est semé à 80 cm entre les lignes et à 40 cm sur les lignes.

La pomme de terre est semée à 40 cm entre les lignes et à 40 cm sur les lignes.

Le soja est semé à 40 cm entre les lignes et à 10 cm sur les lignes.

Le haricot est semé à 40 cm entre les lignes et à 20 cm sur les lignes.

Le riz est semé à 30 cm entre les lignes et à 20 cm sur les lignes.

### 3.3.3 Vue d'ensemble des mesures réalisées

On peut distinguer 3 ensembles de mesures, correspondant à des campagnes de mesures différentes :

- 1. Une première campagne de mesures des densités apparentes et de pénétrométrie (mesures couplées) a été réalisée sur tous les systèmes indiqués jusqu'à 40 cm de profondeur.**

Elle s'est déroulée en avril et mai 2003, soit vers la fin des cycles et en fin de saison des pluies ou après.

Elle permet en premier lieu d'avoir les densités apparentes, et par suite les porosités globales, ainsi que des valeurs de pénétrométrie.

Horizons étudiés : 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm et 30-40 cm.

Les analyses offrent la possibilité de comparer tous les différents traitements entre-eux, de comparer labour et semis-direct, de comparer les niveaux de fertilisation. On peut également s'intéresser aux rangs et inter-rangs car les mesures les ont distingués.

Cette campagne de mesures laisse par ailleurs la possibilité de rechercher d'éventuelles corrélations entre les données de densités apparentes (ou porosités), de pénétrométrie et d'humidités (l'humidité du sol étant déterminée au passage dans la méthodologie conduisant à l'établissement des densités apparentes). Ces corrélations sont étudiées dans le but d'apprécier la pertinence d'utiliser la pénétrométrie comme un indicateur simple de terrain d'appréciation de l'état du sol.

- 2. En second lieu une petite campagne de prélèvements de mottes en surface (0-5 cm) a été effectuée sur les 4 traitements considérés pour la ferme d'Andranomanelatra en fumure F2 de façon à étudier la distribution de la porosité de ces mottes au laboratoire (laboratoire MOST du CIRAD, Montpellier).**
- 3. Enfin, des prélèvements d'échantillons non remaniés ont été réalisés sur des profils complets, soit jusqu'à 80 cm ou 130 cm, pour les traitements maïs-soja en labour et semis-direct, fumure F2, de façon à établir au laboratoire CIRAD MOST, les courbes pF des différents horizons. Par la même occasion des mesures de densités apparentes ont été réalisées sur l'ensemble des profils étudiés. Des échantillons**

remaniés ont également été prélevés, qui ont été utilisées pour la détermination des densités sèches.

Ces informations sont importantes car il n'existe pas, à notre connaissance de référence concernant les caractéristiques de rétention des sols ferrallitiques de la région. Or ces informations sont nécessaires pour les calculs des bilans hydriques et des consommations en eau des cultures.

Par ailleurs ces observations peuvent permettre de détecter d'éventuelles différences en profondeur dues au semis-direct du fait de meilleurs ou moins bons développements racinaires.

On a également prélevé pour chaque horizon un échantillon remanié pour déterminer les densités sèches (au pycnomètre) et également ses caractéristiques de rétention de façon à comparer les données de caractéristiques de rétention provenant d'échantillons remaniés et non remaniés. Cela peut être intéressant car vu qu'il est beaucoup plus contraignant de prélever des échantillons non remaniés, une éventuelle corrélation entre ces types de données pourrait permettre à l'avenir de se contenter de ne prélever dans certains cas que des échantillons non remaniés.

Les horizons étudiés son similaires à ceux des autres campagnes de mesures jusqu'à 40 cm : 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, puis 50-60 cm, 70-80 cm, et pour certaines parcelles 90-100 cm, 120-130 cm.

Avant de poursuivre nous tenons à souligner que toutes les mesures ont été réalisées avec le souci de perturber le moins possible les parcelles : en travaillant au niveau des bordures d'une part, et ensuite en prenant soin lors des mesures de ne pas salir et dégrader les parcelles. Les parcelles de TAFE sont en effet de relatives petites tailles.

**L'inconvénient potentiel de ces précautions est cependant que l'on peut s'interroger sur la représentativité des données obtenues car elles proviennent de la bordure des parcelles.** Nous pensons cependant que les données obtenues sont représentatives.

### 3.3.4 Réalisation de la campagne de mesures de densités et de pénétrométrie

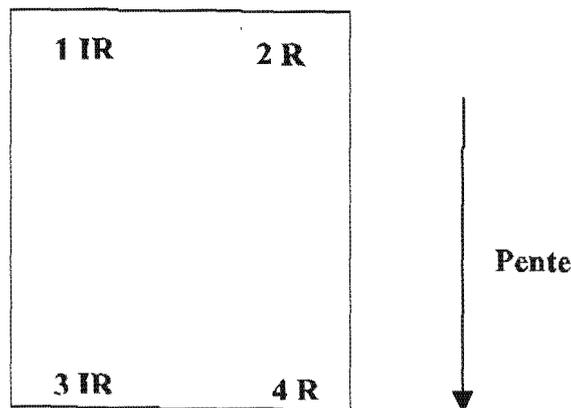
#### Présentation des mesures

- Horizons étudiés : 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm et 30-40 cm.
- 3 parcelles étudiées (a, b, c) pour chaque traitement.
- 4 sites d'étude par parcelle (1, 2, 3, 4), situés aux quatre coins : 2 sites étant sur un rang (numéros 2 et 4) et 2 sur un inter-rang (1 et 3). Sur toutes les parcelles les 4 sites ont toujours été positionnés et identifiés de la même façon( cf figure 1), avec les sites 1 et 2 en amont et les sites 2 et 3 en aval (il y a toujours une légère pente ; à défaut les sites 1 et 2 sont les premiers auxquels on accède.
- **Pour la densité apparente 1 seule mesure par site et horizon.**

- Alors que 4 ont été réalisées pour la pénétrométrie à quelques centimètres les unes des autres : mais les quatre mesures de pénétrométrie ont ensuite été directement moyennées de façon à avoir également pour la pénétrométrie 1 seule donnée par site et horizon.

Pour chaque horizon nous avons donc au final 4 valeurs de densités et 4 valeurs de pénétrométrie par parcelle, et 12 (4x3) par traitement. Les mesures offrent la possibilité de comparer tous les différents traitements entre-eux, de comparer labour et semis-direct, de comparer les niveaux de fertilisation (F1/F2). On peut également s'intéresser aux rangs et inter-rangs puisque nous avons 6 valeurs de chaque par traitement pour chaque horizon.

Figure 4: disposition des sites de prélèvements et mesures sur les parcelles



Positionnement précis des mesures :

Sur soja et haricot les mesures ont été faites, pour 2 et 4 sur le second rang, donc à 40 cm à l'intérieur, et pour 1 et 3 entre le second et le troisième rang, donc à 60 cm à l'intérieur.

Sur maïs les mesures ont été faites, pour 2 et 4 sur le second rang, donc à 1 m à l'intérieur, et pour 1 et 3 entre le premier et le second rang, donc à 50 cm à l'intérieur.

Les petites fosses d'accès nécessaires aux mesures de densités ont été réalisées sur les 4 cotés de chaque parcelle, de façon à rester dans les bordures, en respect de la demande de l'ONG TAFa.

Comme déjà dit, une seule mesure de densité, soit donc un seul prélèvement au cylindre, a été réalisée par horizon sur chacun des 4 sites (4 coins) de chaque parcelle, alors que 4 mesures de pénétrométrie ont par contre été réalisées à quelques centimètres les unes des autres, dont les valeurs ont été moyennées pour ne donner également qu'une valeur par horizon et site. Les positions des mesures de densités et de pénétrométrie au niveau de chaque site sont décrites sur la figure 6.

Figure 5 : positions des mesures sur les profils

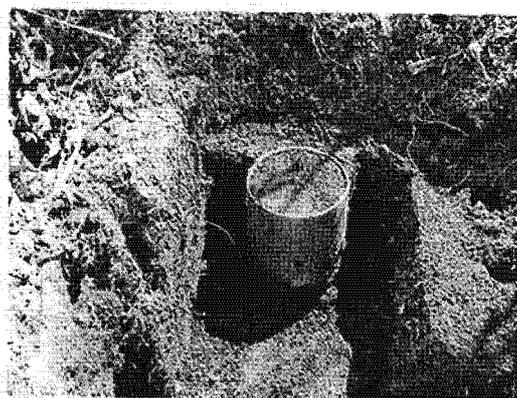
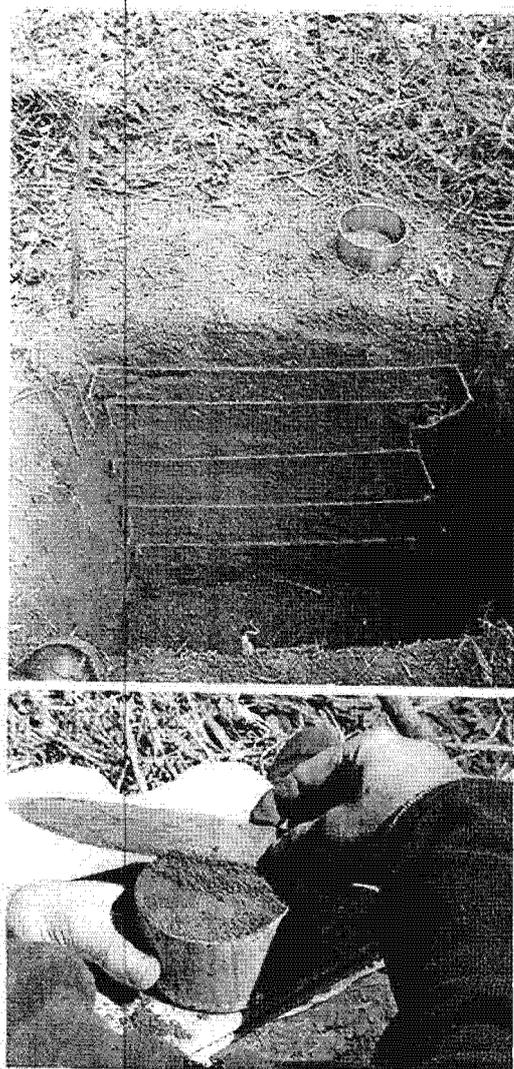
0 – 5 cm	Densité	Pénétrométrie
5 – 10 cm	Pénétrométrie	Densité
10 – 20 cm	Densité	Pénétrométrie
20 – 30 cm	Pénétrométrie	Densité
30 – 40 cm	Densité	Pénétrométrie

### Réalisation pratique sur le terrain des mesures de densités apparentes :

Lors de la campagne générale les mesures de densités apparentes ont été réalisées à l'aide de cylindres de 8,12 cm de diamètre et de 5cm ou 10cm de hauteur, avec respectivement des volumes de 258,92 cc et 512,67 cc. Les cylindres de 5 cm de hauteur ont été utilisés pour les horizons 0-5 cm et 5-10 cm, et les cylindres de 10 cm de hauteur pour les autres horizons.

Les cylindres ont été enfoncés verticalement, à la main si possible et petit à petit au marteau (par l'intermédiaire d'une planche) si le sol devient plus dur. Après avoir enfoncé correctement sur les horizons souhaitables, les cylindres sont dégagés soigneusement, puis retirés et préparés pour avoir les 2 faces (extrémités) bien droites en veillant à ne pas perdre de terre (et on nettoie aussi l'extérieur du cylindre). On transvase ensuite le contenu du cylindre dans des sachets plastiques, en veillant à bien tout transvaser (nettoyage de la terre collée à l'intérieur). Les sacs plastiques ont été mis ensuite à l'abri dans une glacière pour conserver l'humidité du sol.

*Photos n°2 - opérations réalisées pour les mesures de densités apparentes au cylindre*  
a) marquage des profondeurs ; b) enfoncement d'un cylindre ; c) cylindre en place en train d'être dégagé ; d) arasement des faces



Remarque : on a transvasé la terre dans des sacs plastiques étanches car l'on voulait également connaître les humidités. Mais en fait pour la seule détermination des densités apparentes il n'est pas nécessaire de déterminer les humidités, et donc il n'est pas obligatoire de mettre la terre dans des boîtes ou sacs étanches.

Au niveau pratique nous avons utilisé : de l'angady, pelles, sacs de jute pour débarrasser la terre et ne pas salir les sites et parcelles, règles de précision, ficelles pour marquer les différentes profondeurs, des couteaux, spatules, brosses métalliques, glacière pour éviter des pertes d'humidités.

#### Opérations réalisées au laboratoire :

Comme nous voulions également déterminer les humidités nous avons pesé la totalité de l'échantillon humide (avec les sachets de prélèvements). Puis on l'a emmotté avant de prendre un aliquote d'environ 20g qu'on a mis dans un sachet plastique thermorésistant pour la sécher à l'étuve (48 heures à 105°) pour avoir l'humidité. Après avoir obtenu l'humidité de l'aliquote, on a extrapolé le résultat obtenu pour avoir l'humidité totale de l'échantillon initial. De là on détermine le poids sec de l'échantillon, et ensuite sa densité apparente en tenant compte du volume.

Nous avons utilisé : balance de précision, pinceaux, étiquettes, sachets thermorésistants en polyéthylène, étuve pour le séchage.

#### Traitements des données :

Nous avons utilisé le logiciel « Statistica.6 » pour les traitements statistiques des données. (densité apparente) (traitement élémentaire). Les données sont en nombre de 12 pour chaque mesure. Les moyennes ont été calculées, ainsi que les écart-types, puis les intervalles de confiance (IC) ont été déterminés au seuil de 10% (table de Student).

**Les comparaisons des valeurs ont été faites sur la base des IC de 10%.**

**Nous avons procédé de la même façon avec les données de pénétrométrie.**

### 3.3.5 Réalisation des mesures de pénétrométrie

#### Matériel utilisé:

Nous avons utilisé un pénétromètre manuel de marque Eijkelkamp permettant des mesures jusqu'à 1 mètre de profondeur (voir photos n°3). L'appareil est livré avec 4 cônes différents, un instrument de jauge de pression, un certificat de calibration et un manuel d'utilisation. Il est présenté dans une mallette compacte en aluminium.

La force (kN) nécessaire pour faire pénétrer la pointe conique est lue sur la jauge de pression : il y a une aiguille qui donne la force en valeur instantanée, et une aiguille « traînante » qui donne la valeur maximale pendant la poussée. C'est cette valeur maximale que l'on retient en principe. La résistance à la pénétration (kN/cm<sup>2</sup>) du sol est déterminée en divisant la valeur de force (kN) lue au niveau de la jauge de pression, par la surface du cône. En réalité une petite correction de la valeur force lue (kN) est nécessaire avant de calculer la résistance à la

pénétration (kN/cm<sup>2</sup>) car l'appareil n'est pas parfait et il faut tenir compte de son étalonnage. Cela est expliqué plus avant.

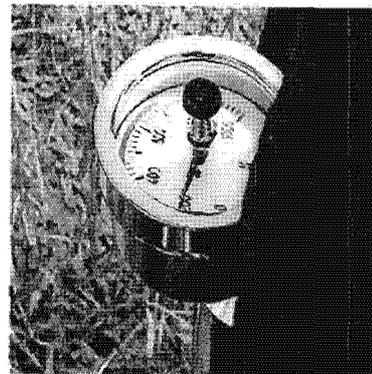
$$\text{Résistance (N/cm}^2\text{)} = \text{valeur force corrigée (N)} / \text{surface du cône (cm}^2\text{)}$$

La difficulté de la pénétration détermine la surface du cône à utiliser. Pour avoir une plus grande précision il faut en effet essayer d'avoir la valeur de force lue (kN) la plus grande dans la gamme optimale de fonctionnement de l'appareil. Si on dépasse cette gamme, on doit réduire le cône. A l'opposé, si l'on obtient en lecture des valeurs trop faibles, il faut prendre un cône plus grand permettant de lire des valeurs plus importantes et d'avoir plus de précision. En définitive, plus le sol est dur, plus il faut réduire le cône, et inversement.

On donne ci-dessous les surfaces des cônes utilisées :

- pointes n°1 : 1 cm<sup>2</sup> de surface ;
- pointes n°2 : 2 cm<sup>2</sup> de surface ;
- pointes n°3 : 3,33 cm<sup>2</sup> de surface ;
- pointes n°4 : 5 cm<sup>2</sup> de surface.

*Photos n°3 : mesure de la dureté au pénétromètre et détail de la jauge de pression*



La pointe conique de l'appareil doit être introduite bien perpendiculairement dans le sol à une vitesse régulière approximative de 2 cm par seconde et en poussant avec une pression égale à chaque poignée. Une pénétration de la pointe par saccades, donne des valeurs trop élevées et non représentatives de la résistance du sol.

L'appareil est livré avec un certificat d'étalonnage : il indique pour certaines valeurs de contrainte précisément contrôlées au laboratoire quelles sont les valeurs que donne l'appareil, c'est-à-dire les valeurs que va lire l'utilisateur sur la jauge de pression de l'appareil. Il convient de prendre cela en compte afin d'augmenter la précision des mesures. Concrètement cela veut dire qu'il faut corriger les valeurs lues. Sur la base des informations d'étalonnage nous avons établi une relation polynomiale d'étalonnage qui permet de corriger légèrement les données obtenues (cf figure 7 et tableau n°11).

Figure 6: étalonnage des valeurs pénétrométriques :

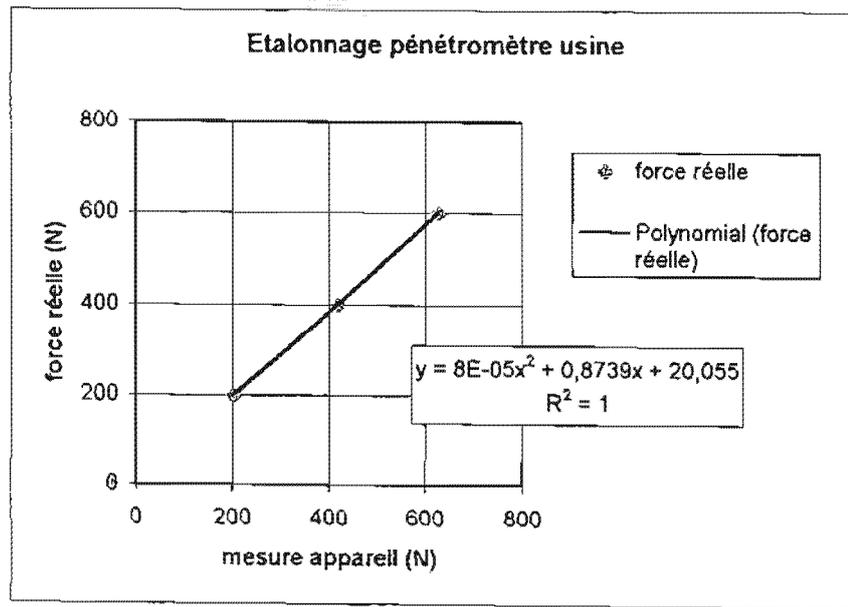


Tableau n°11 : Pénétrömètre : correspondances entre forces lues et résistances

Valeurs lues au pénétromètre (N)	Valeurs corrigées (N)	Résistances (N/cm <sup>2</sup> ) en relation aux surfaces de base des cônes			
		1cm <sup>2</sup>	2cm <sup>2</sup>	3.33cm <sup>2</sup>	5cm <sup>2</sup>
100 N	108	108	54	33	22
150 N	153	153	76	46	31
200 N	198	198	99	60	40
250 N	244	244	122	74	49
300 N	289	289	145	88	58
350 N	336	336	168	102	67
400 N	382	382	191	116	76
450 N	430	430	215	130	86
500 N	477	477	239	145	95

Sur le terrain nous avons réalisé, pour chaque point de mesure, 4 mesures successives (4 répétitions) à quelques centimètres les unes à côtés des autres, qui ont été moyennées pour fournir la donnée correspondant au point de mesure.

La suite complète des opérations pour obtenir une donnée ponctuelle de pénétrométrie (« résistance à la pénétration ») a donc été la suivante :

- 4 mesures sur le terrain les unes à côtés des autres, en utilisant le cône le plus adapté ; pour chaque mesure la donnée de force lue sur la jauge (kN) et les références du cône sont notées ; le même cône est utilisé pour les 4 mesures ;
- moyenne des 4 valeurs pour obtenir la données de force (kN) correspondant au point de mesure ;
- correction de cette valeur de force (kN) en tenant compte de l'étalonnage de l'appareil ;
- détermination de la donnée de résistance (kN/cm<sup>2</sup>) en tenant compte du cône utilisé : c'est cette valeur qui est ensuite prise en compte dans les analyses.

### 3.3.6 Seconde campagne : prélèvements de mottes pour étude des classes de porosités par la méthode du porosimètre au mercure

#### Echantillonnage sur terrain :

Les mottes ont été prélevées de façon au hasard pour tous les 4 traitements retenus d'Andranomanelatra (MMD, HSK, MS SD et MS Lb), dans les 3 parcelles de chaque traitement. Dans chaque parcelle nous avons prélevé environ une dizaine de mottes de 2 à 3 cm de longueur et/ou largeur, dans l'horizon 0-5 cm, prises de façon aléatoire sur la parcelle. Au final nous n'avons gardé que 5 ou 6 mottes pour chaque parcelle, en réduisant un peu leur taille. Ce nombre permet d'être certain que l'analyse au laboratoire pourra au moins porter sur 3 mottes par parcelle. La taille de chaque motte « préparée » est environ 1.5 à 2cc. Les mottes ont été conservées dans des petites boîtes en plastique à l'intérieur desquelles on a mis des cotons pour éviter les cassures lors du transport.

Nous avons donc pour l'analyse :

- 5 ou 6 mottes par parcelle, qui garantissent de pouvoir travailler au moins sur 3 mottes ;
- 3 parcelles (répétitions) par traitement ;
- 4 traitements considérés.

Cela permettra d'avoir au final au minimum 9 courbes (3\*3) et caractéristiques de porosités pour chaque traitement.

#### Méthodologie au laboratoire :

L'appareil qui a été utilisé au laboratoire MOST du CIRAD est le Pore Sizer 9310 de Micromeritics. C'est un appareil semi-automatique permettant des mesures dans une gamme de pression de  $10^{-3}$  à 206 MPa, correspondant à des diamètres équivalents de pores de 400 à 0.006  $\mu\text{m}$ . Il ne peut explorer les pores inférieurs à 0.006  $\mu\text{m}$ .

La méthodologie d'utilisation de l'appareil est détaillée en annexe V. Retenons simplement ici que l'appareil enregistre en continue les valeurs de quantités de mercure introduites dans la porosité, donc les volumes occupés, et les valeurs de forces nécessaires pour introduire ces quantités, donc les diamètres des pores explorés (d'après les équations de capillarité). La courbe obtenue pour chaque échantillon est son spectre poral. L'échantillon est déshydraté (étuvage, échange eau-acétone, dessiccateur à point critique,...) et introduit dans la cellule de mesure de l'appareil.

Un programme informatique permet d'obtenir :

#### - d'une part les résultats généraux :

- volume total de mercure introduit, exprimé en  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ,
- surface totale des pores, exprimée en  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
- diamètre médian par rapport au volume, exprimé en  $\mu\text{m}$ ,
- diamètre médian par rapport à la surface, exprimé en  $\mu\text{m}$ ,
- diamètre moyen des pores (4V/A), exprimé en  $\mu\text{m}$ ,
- densité apparente de l'échantillon, exprimée en  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (\*),
- densité (apparente) des solides, exprimée en  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (\*),

#### - d'autre part, selon l'objectif, les courbes spécifiques :

- courbe cumulée d'intrusion de mercure en fonction du diamètre d'entrée des pores,
- courbe cumulée de la surface spécifique en fonction du diamètre d'entrée des pores,
- courbe incrémentale d'intrusion de mercure en fonction du diamètre d'entrée des pores,

- courbe incrémentale de la surface spécifique en fonction du diamètre d'entrée des pores,
- courbes dérivées d'intrusion de mercure en fonction du diamètre d'entrée des pores.

### 3 3.7 Troisième campagne : prélèvements d'échantillons sur fosses pour études des caractéristiques de rétention (courbes pF)

Les prélèvements ont été faits le long de fosses sur 2 parcelles (1 fosse par parcelle) des 2 traitements suivants : MS LB F2 et MS SD F2 : 4 fosses au total.

Les horizons étudiés sont ceux des autres campagnes de mesures jusqu'à 40 cm : 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm.

Puis 50-60 cm et 70-80 cm sur les 4 fosses.

Et pour les parcelles en SD : 90-100 cm et 120-130 cm.

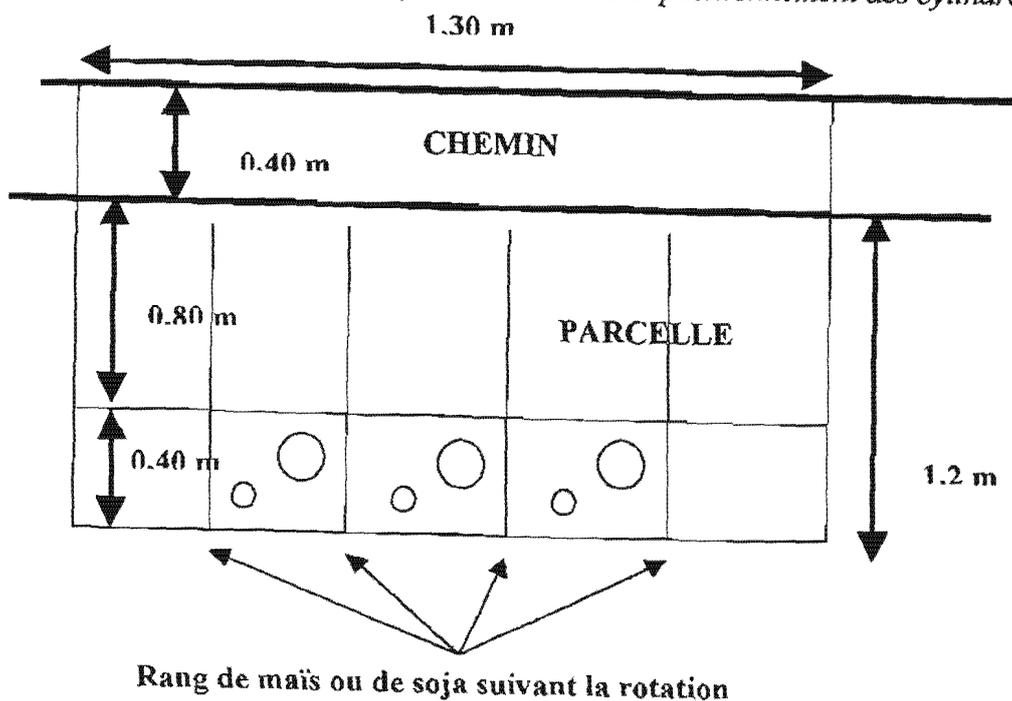
Pour chaque horizon (sur les 4 fosses):

- 3 échantillons non remaniés pris à l'aide de petits cylindres (4,8 cm de diamètre x 5 cm de hauteur ; d'où 100cc de volume) pour les courbes pF (et également densités apparentes). Les cylindres sont envoyés au laboratoire MOST du Cirad en France.
- 3 mesures de densités apparentes à l'aide de cylindres de 8 cm de diamètre x 5 cm de hauteur (250 cc de volume). Détermination de la densité apparente à Antsirabe.
- Egalement prélèvement d'un gros échantillon remanié, mis dans un sac plastique.

Nous avons procédé ainsi (cf. photos 4 et 5 et figure 7) :

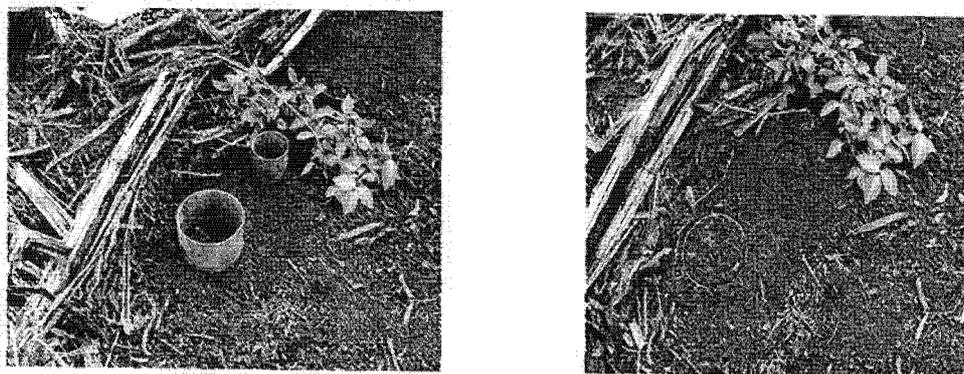
- Nettoyer la surface du sol à l'endroit du prélèvement,
- Faire une fosse d'accès de 1,30 (longueur) x 1,20 (largeur) x 1,50 m (profondeur), où 80 cm sont creusés dans la parcelle et 40 cm sur l'allée séparant deux parcelles,
- Positionner les cylindres sur les interlignes (de maïs et soja) dans une zone de 40 cm de large environ située entre 80 cm et 1,2 m à l'intérieur de la parcelle (cf. figure 7) : la parcelle est donc perturbée jusqu'à environ 1,20 m à l'intérieur.

Figure 7 : emplacement des fosses profondes et positionnement des cylindres

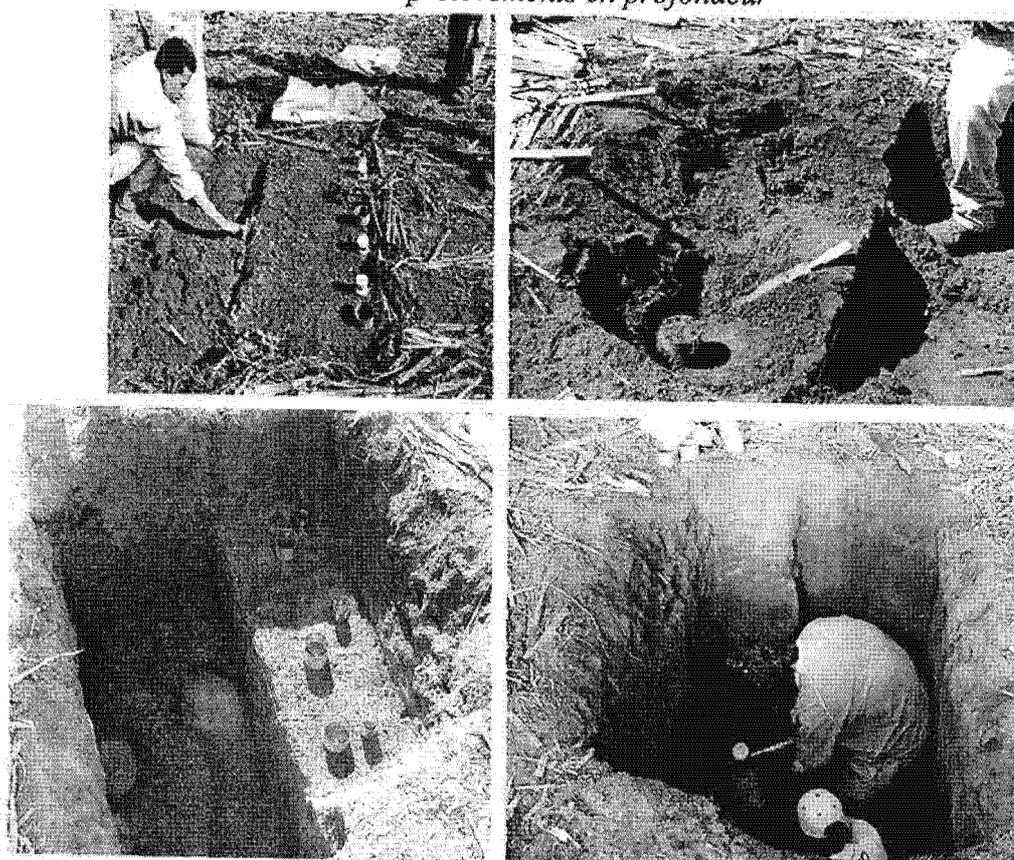


- Enfoncer les cylindres le plus droit possible pour éviter de casser la structure du sol. Pour cela l'enfoncer à la main, si le sol devient trop dur, utiliser une planche et marteau pour l'enfoncer, en donnant des coups secs.
- Après avoir enfoncé les cylindres, les dégager sur le côté, en utilisant couteaux, spatules, à 2 cm de la base du cylindre, puis préparer avec un couteau une des faces du cylindre tout en laissant 0,5 mm de terre en plus, fermer avec un couvercle.
- Pour la deuxième face du cylindre : afin de retourner convenablement le cylindre passer un couteau en dessous de celui-ci et soulever le tout. Procéder à l'arasement de cette face comme précédemment.
- Reboucher le cylindre et l'envelopper d'un film plastique étanche car pour la réalisation des courbes pF il faut que les échantillons arrivent à l'état humide.

*Photos n°4 : études sur fosses profondes à Andranomanelatra : prélèvements 0-5cm*

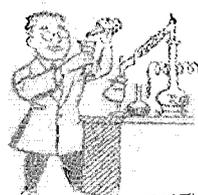


*Photos n°5 : études sur fosses profondes à Andranomanelatra : préparation du profil et prélèvements en profondeur*



*Partie IV:*

**RESULTATS ET ANALYSES**



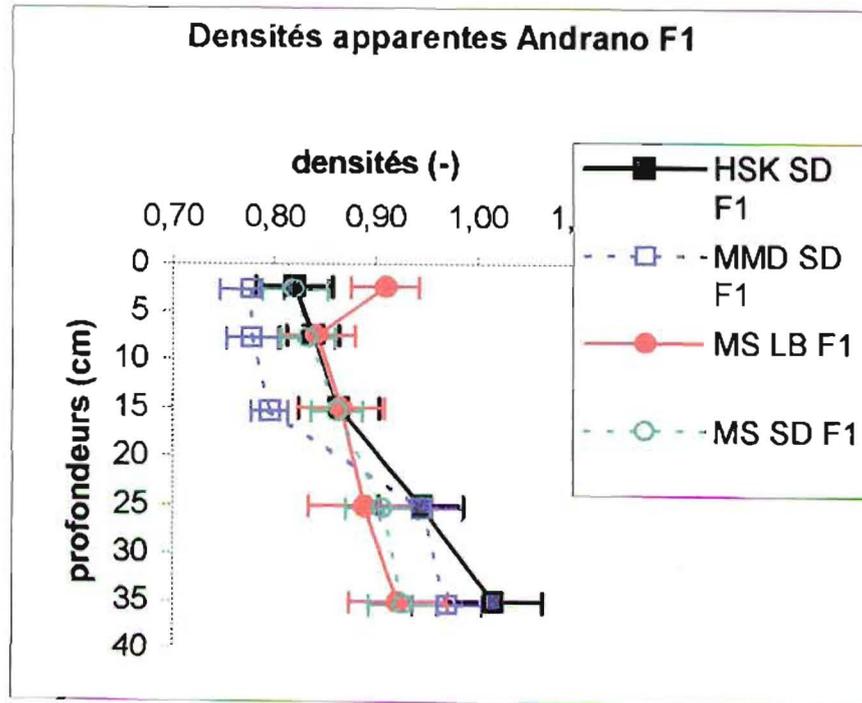
## 4 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

### 4.1 Densités apparentes

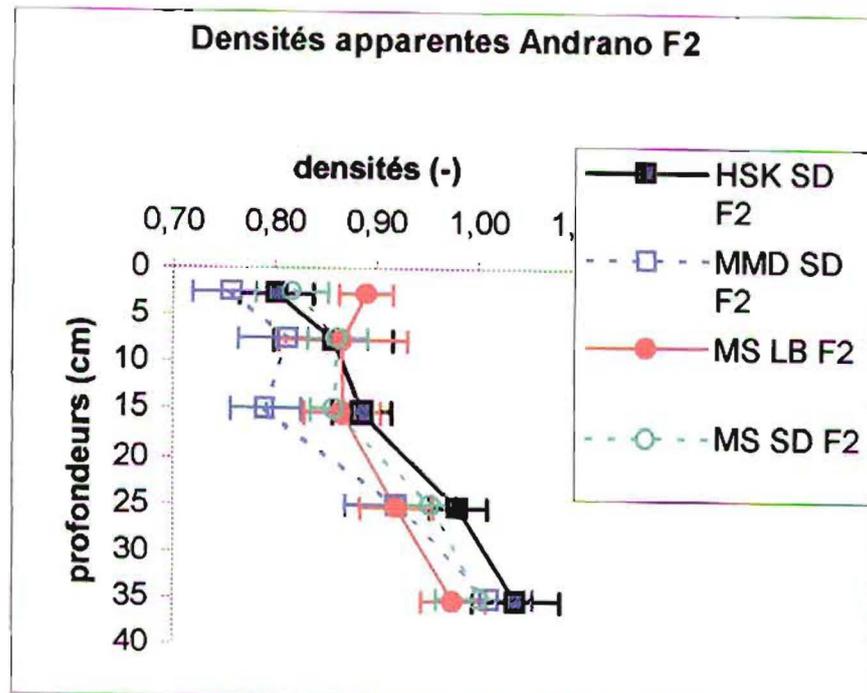
#### 4.1.1 Densités apparentes sur le site d'ANDRANOMANELATRA

L'ensemble des données obtenues lors de la première campagne sur 0-40 cm (4 sites aux 4 coins des parcelles) à Andranomanelatra est présenté en figure 8.

Figures 8: densités apparentes 0 -40 cm à Andranomanelatra selon les systèmes  
a) en F1 :



b) en F2 :

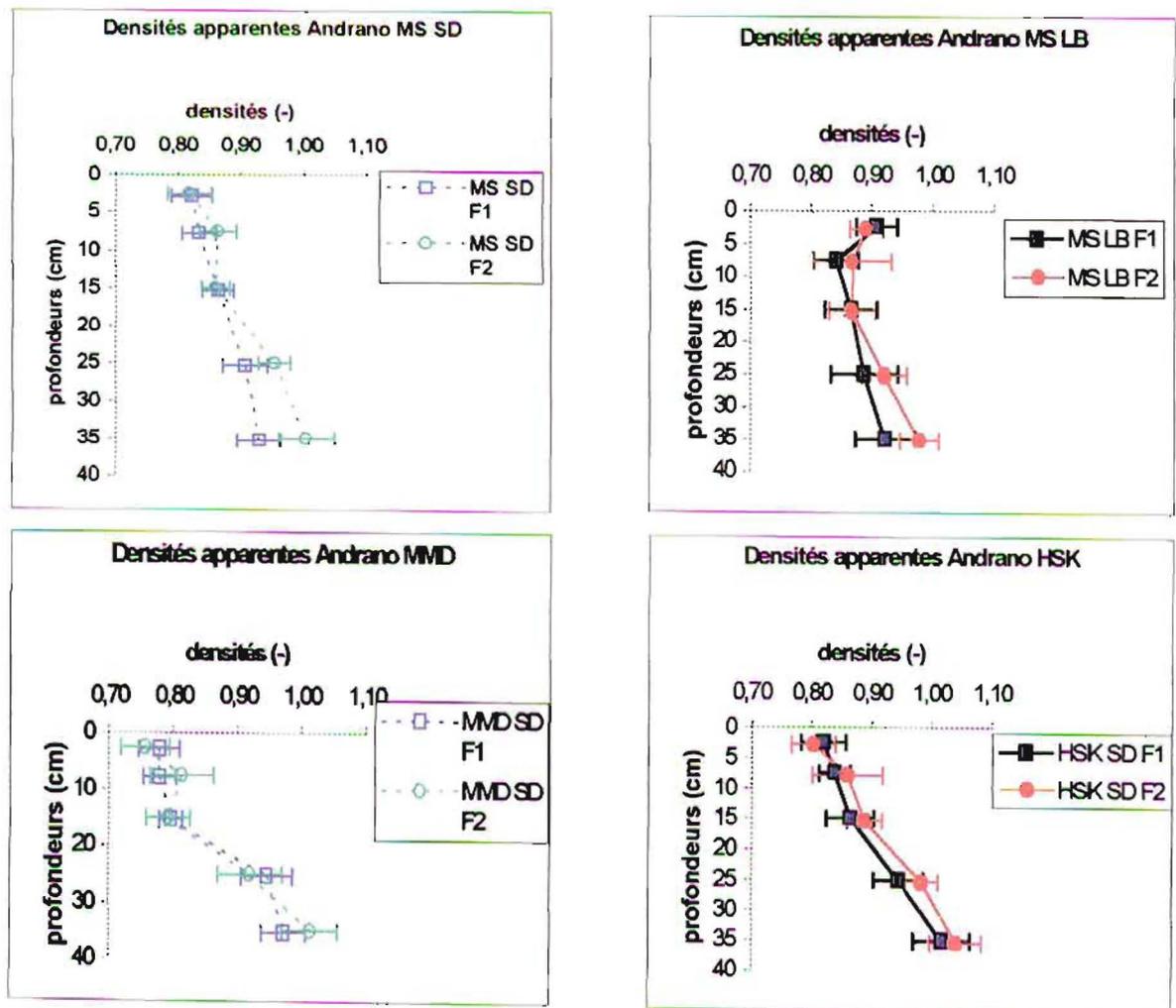


Les intervalles de confiance présentés sont au seuil de 10%. L'analyse n'a pas été faite au seuil de 5% car les données sont peu nombreuses et de plus les données provenant du sol sont par nature assez hétérogènes. Dans ces conditions l'analyse à 5% n'aurait rien donné. On analysera également les données de pénétrométrie à 10%

En F1, généralement les densités sont faibles. Pas de différences significatives en surface sauf pour MS en LB. On note ici que le traitement MMD a des valeurs de densités plus faibles que les autres

On retrouve le même cas pour F2 : le traitement MMD améliore plus la porosité que les autres systèmes.

Figures 9: densités apparentes 0 -40 cm à Andranomanelatra selon les fumures



Généralement, il n'y a pas de différences significatives entre F1 et F2 pour les systèmes. On peut donc considérer qu'il n'y a pas d'effet de fumure sur les parcelles étudiées à Andranomanelatra, et donc pas d'effet des biomasses

Les tableaux des résultats et analyses statistiques sont en annexe VII.

On présente enfin en figures 10 et 11 les résultats de densité apparentes mesurées sur les 4 fosses profondes des traitements MS F2 (3<sup>ème</sup> campagne : lors des prélèvements d'échantillons non remaniés pour courbes pF). Les données des fosses sont présentées sans intervalle de confiance (IC) car on n'a que 3 données/fosse/horizon.

Figure 10 : densités apparentes en profondeur(Andranomanelatra)

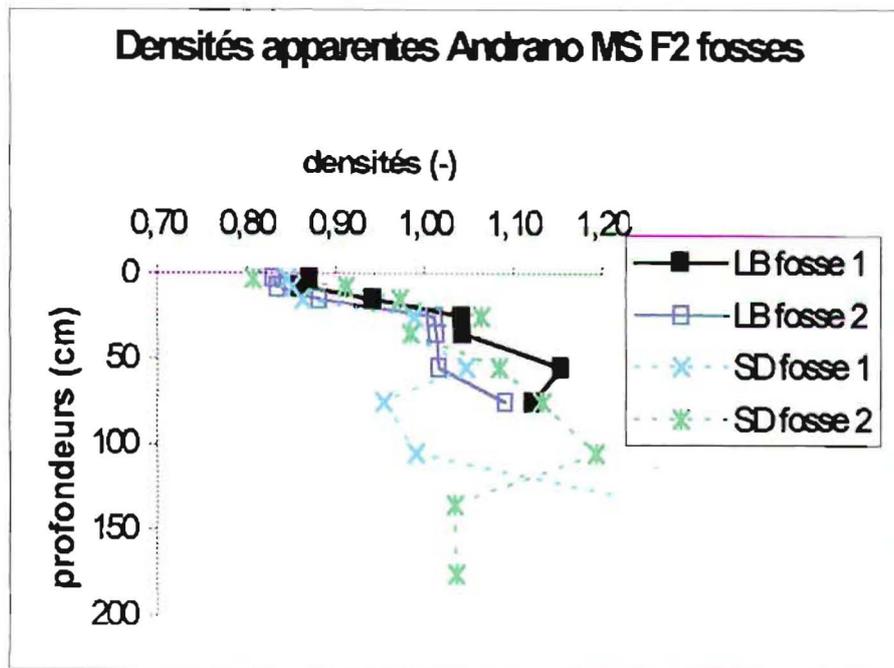
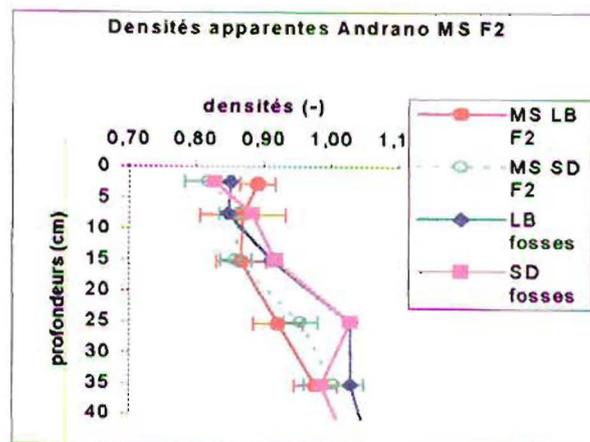


Figure 11 : comparaison des densités apparentes mesurées sur les fosses profondes avec celles mesurées lors de la première campagne aux 4 coins des parcelles



Nous pouvons dire que :

Pour les fosses ;

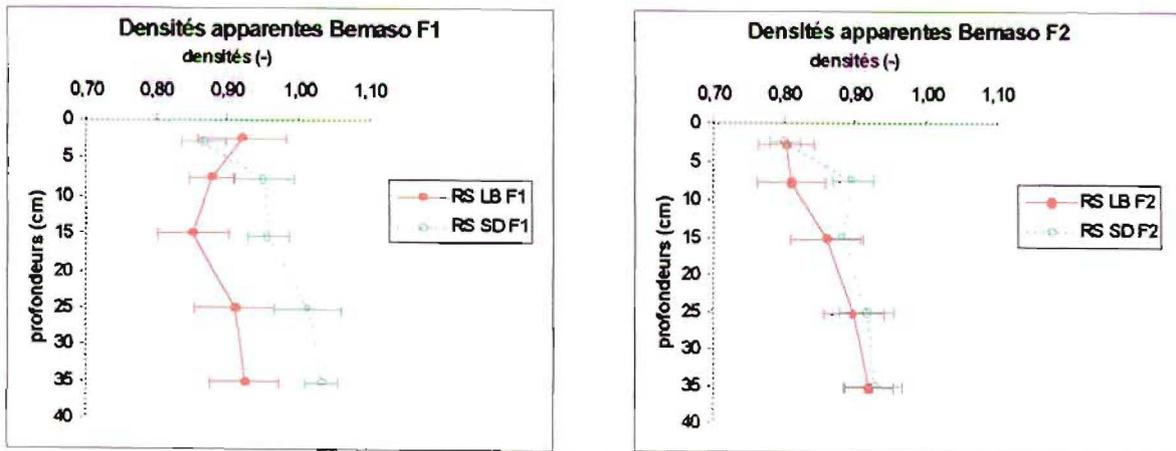
- il n'y a pas de différence significative entre les données des fosses et celles des parcelles : ce qui est logique et rassurant.

- à partir de 60 cm, on trouve des différences importantes entre les deux fosses faites en SD : cela peut résulter d'erreurs ou plutôt d'hétérogénéité naturelle du milieu.

Notons ici que ces données servent d'acquisition d'informations car il n'y avait pas de références précédentes à notre connaissance pour ces sols.

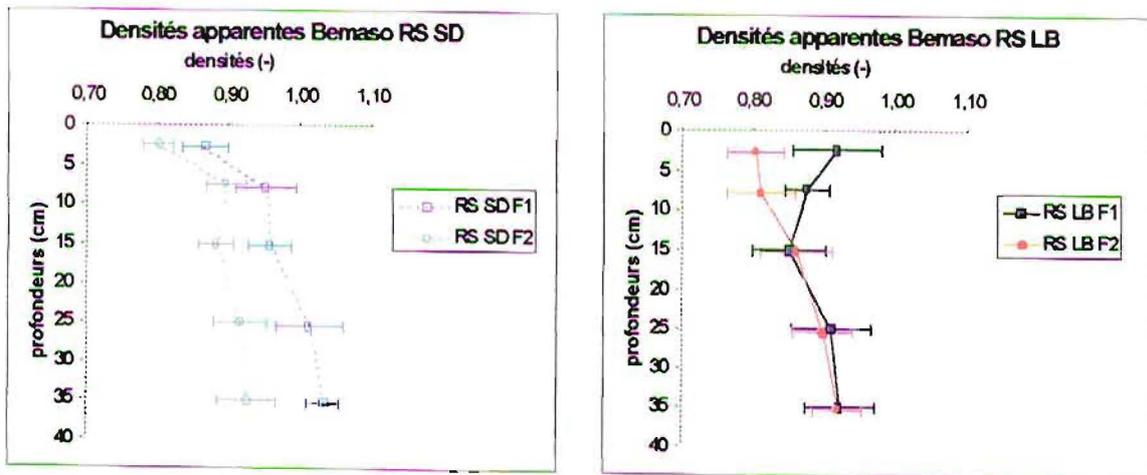
#### 4.1.2 Densités apparentes sur le site de BEMASOANDRO

Résultats obtenus sur riz-soja (RS) :



Figures 12: densités apparentes RS 0 -40 cm Bemasoandro selon travail du sol

En F1, on constate que SD est plus dense que LB, donc on peut considérer que le système RS est peu performant en SD et fumure F1 pour entretenir l'espace poral.  
En F2, nous ne trouvons pas de différences nettes entre SD et LB.

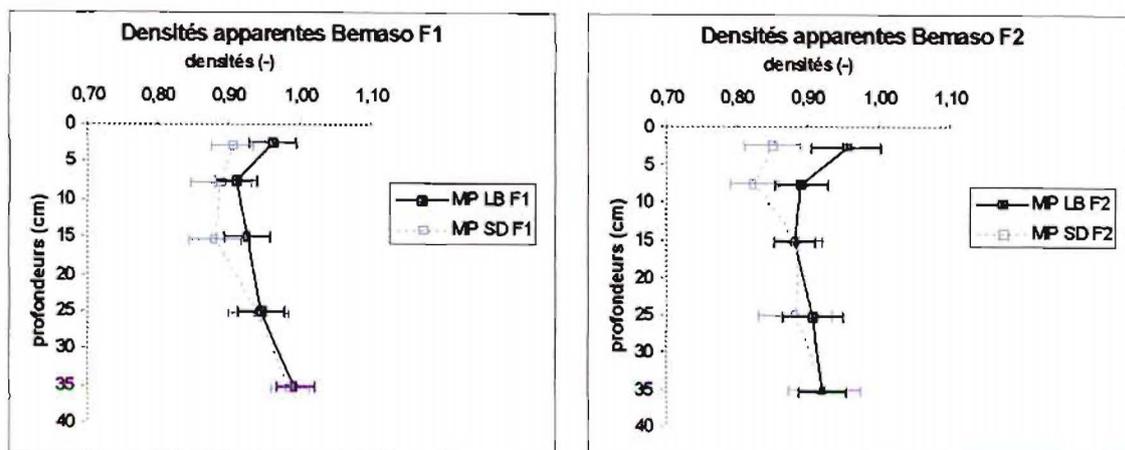


Figures 13: densités apparentes RS 0 -40 cm Bemasoandro selon les fumures

Les valeurs en F2 sont globalement faibles par rapport à celles de F1, surtout en SD.  
On constate ici qu'en labour F2 est bonne en surface c'est à dire moins dense. Pourtant, en SD F2 meilleur que F1 sur tous les profils.

Il nous faudrait des observations racinaires pour approfondir l'étude.

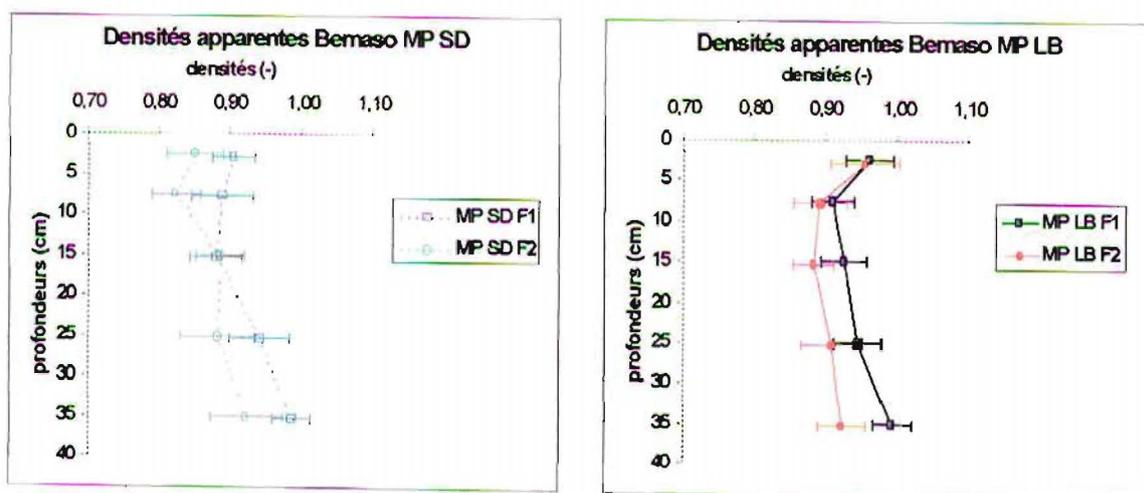
## Système Mais-Pomme de terre (MP)



Figures 14 : densités apparentes MP 0-40 cm Bemasoandro selon travail du sol

Les valeurs en SD sont inférieures à celles du LB, mais il n'y a pas de différences significatives sauf en surface pour F2.

Le système MP apparaît donc suffisamment performant en SD après 6 années, même en F1 (fumier seul), pour maintenir et même améliorer un peu l'espace poral, en comparaison des labours qui se répètent annuellement.



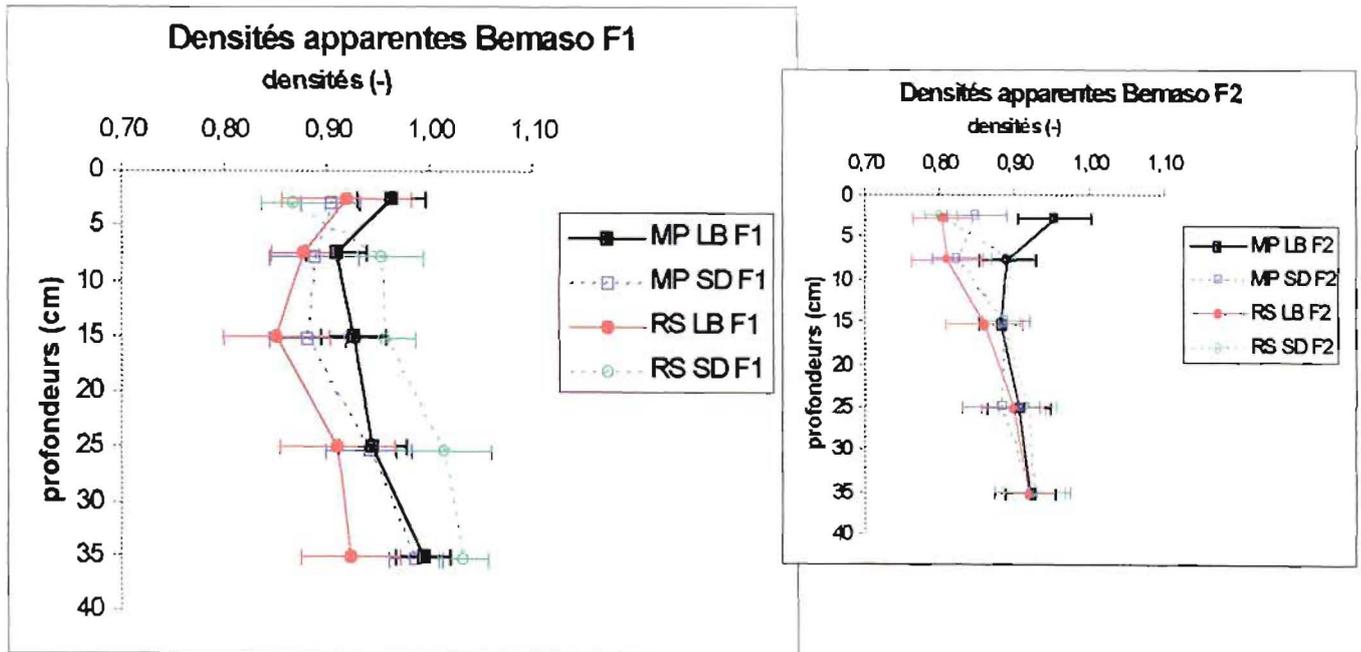
Figures 15 : densités apparentes MP 0-40 cm Bemasoandro selon les fumures

Il n'y a pas de différence, même si les tendances montrent des densités plus faibles en F2.

Il nous faudrait des observations racinaires pour approfondir l'étude.

## Comparaison entre MP et RS

Figures 16 : densités apparentes 0-40 cm Bemasoandro tous traitements



On remarque que en SD avec F1 les densités sont plus faibles sous MP que sous RS qui présentent les densités les plus élevées (en particulier comme nous l'avons déjà dit plus élevées que sous labour). Par contre en labour la tendance est inverse avec des densités sous RS plus faibles que sous MP, un peu comme si avec l'aide du labour les racines du riz et du soja arrivaient à mieux explorer et travailler la porosité que celles du maïs et de la pomme de terre. Cependant ce ne sont que des tendances.

Sous une faible fumure (F1) le système MP en SD est donc plus performant que RS en SD qui arrive à peine à maintenir la porosité.

En F2 les différences entre les deux systèmes sont très faibles mais on observe cependant les mêmes tendances : RS moins performant que MP en SD, et par contre l'inverse sous labour, où l'on constate même que les densités en surface (0-5 cm) sont significativement différentes (à 10%) et supérieures sous MP.

### 4.1.3 Synthèse des résultats de densités apparentes

Globalement les valeurs de densités apparentes sont particulièrement faibles sur les 40 premiers centimètres, et ce sous tous les traitements : 0,8 – 0,9 sur 0-20 cm, puis 0,8 – 1 sur 20-40 cm. Elles augmentent un peu au delà, entre 1 et 1,1, mais cela reste encore peu élevé. Cela est certainement due en premier lieu aux taux d'argile élevés (environ 50%), voire à la présence de matériaux volcaniques (charriés dans les dépôts fluvio-lacustres), et bien entendu, en ce qui concerne les horizons de surface, aux activités racinaires.

En général on constate que les densités sont plus faibles sous semis direct (SD) que sous labour, même s'il y a rarement de différence significative (même à 10%). Il y a cependant une

exception avec le système RS en SD sous F1 qui montre des densités plus élevées que sous labour.

Cela démontre bien que de façon général le SD est tout à fait capable de maintenir, voire même d'améliorer la porosité du sol, par le seul fait de la protection du sol, des activités racinaires et des activités biologiques. Et même dans le cas du système riz-soja sous fumure F1, qui semble le moins performant, après 6 années de SD la porosité se maintient cependant pratiquement égale à celle constatée sous labour.

Le système MMD apparaît comme le plus performant de ceux que nous avons étudiés en ce qui concerne l'amélioration de la porosité.

On constate par ailleurs peu de différence en général entre les niveaux de fumure F1 et F2 même si la porosité est toujours supérieure (densités plus faibles) en F2 qu'en F1. Cette tendance à l'amélioration avec F2 est certainement à relier à des biomasses racinaires un peu plus développées ou actives. Mais nous ne pouvons aller plus loin dans notre analyse faute d'avoir réalisé des observations racinaires et faute également de données de biomasse.

Pour la prochaine étude, il faudrait des observations racinaires et des informations sur les biomasses produites pour mieux comprendre les situations.

En conclusion on retiendra :

- pas de différence significative entre labour et semis direct, mais en tendance des porosités plus développées sous semis direct ;
- pas de différence significative entre fumures, mais en tendance des porosités plus développées sous F2 ;
- le système riz-soja avec F1 en SD apparaît comme le moins performant pour améliorer la porosité mais il la maintient tout de même au niveau de celle sous labour ;
- le système maïs sus desmodium (couverture vive permanente) apparaît comme le plus performant pour maintenir, voire améliorer la porosité.

#### 4.2 Densités sèches (Densités réelles)

Des densités sèches ont été déterminées au laboratoire (MOST CIRAD) par la méthode du pycnomètre sur les échantillons remaniés prélevés sur une des fosses profondes faites à Andranomanelatra. Le sol est tout d'abord séché à l'air, puis tamisé à 2 mm.

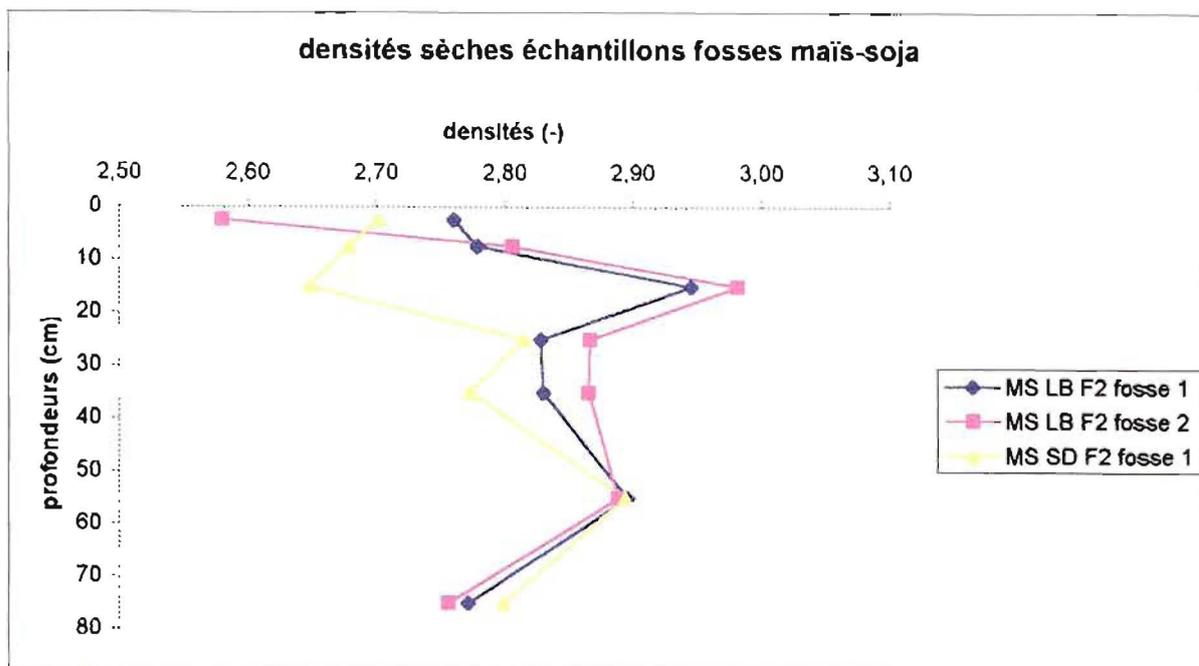
4 répétitions de la détermination de la densité sèche ont été faites pour chaque échantillon (chaque échantillon correspond à un horizon), de façon à éliminer les erreurs et incertitudes de manipulation.

Les CV sont faibles, de 1 à 3% : les données établies sont donc de bonne qualité a priori. Elle sont présentées en figure 17.

On constate que les valeurs de densités sèches sont globalement exceptionnellement élevées car naturellement la valeur de la densité sèche doit se trouver aux environs de 2,65. Or les valeurs sont fiables puisque issues de 4 répétitions (avec CV faibles). De telles valeurs ne peuvent s'expliquer que par la présence d'éléments très lourds, par exemple des cristaux métalliques ou particuliers ? Faute d'analyse chimique fine on ne peut aller plus loin.

Il faudrait déterminer les densités sèches sur d'autres échantillons de sol de la zone, et par ailleurs procéder à des analyses fines pour tenter de trouver qu'elle est la cause de ces valeurs : quels minéraux lourds se trouvent dans les sols ?

Figure 17: densités sèches déterminées au pycnomètre



### 4.3 Porosités

#### 4.3.1 Porosités déterminées à partir des mesures de densités apparentes et sèches

Le tableau n°12 présente les gammes des valeurs de porosité totale des sols étudiés établies d'après les valeurs de densités apparentes déterminées au cylindre et en tenant compte des valeurs de densités sèches établies au pycnomètre. Pour nos sols il faut considérer des valeurs de densités sèches comprises entre 2,65 et 2,9.

Tableau n°12 : Porosité totales d'après densités au cylindre et au pycnomètre

Densité apparente	Densité sèche		
	2.65	2.9	2.5
0.7	0.74	0.76	0.72
0.8	0.70	0.72	0.68
0.9	0.66	0.69	0.64
1	0.62	0.66	0.60
1.1	0.58	0.62	0.56
1.2	0.55	0.59	0.52

On note donc que les porosités totales sont élevées :

- Sur 0-20 cm : porosité de 65%-75% (car densités apparentes de 0,7 à 0,9) ;
- Sur 20-40 cm : porosité de 60%-70% ;
- Au delà : porosité de 55%-65%.

#### 4.3.2 Etude de la porosité par porosimétrie au mercure

On rappelle que cette technique à été appliquée uniquement sur des mottes provenant de l'horizon de surface (0-5 cm) des parcelles d'Andranomanelatra, ce pour tous les 4 traitements.

Mais faute de temps il n'a pas été possible pour l'instant d'obtenir des résultats valables sur trois répétitions de chaque traitement. Nous n'avons que des résultats partiels correspondant aux traitements MS SD et MS LB.

Les figures 18 et 19 décrivent les spectres poraux et les répartitions des porosités en classes.

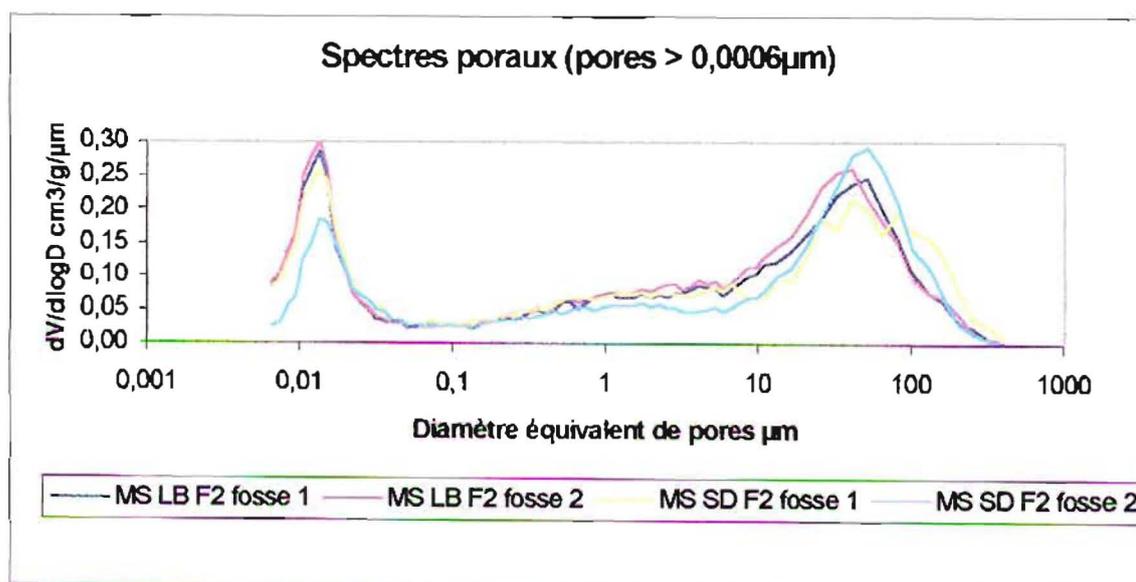


Figure 18 : spectres poraux des mottes

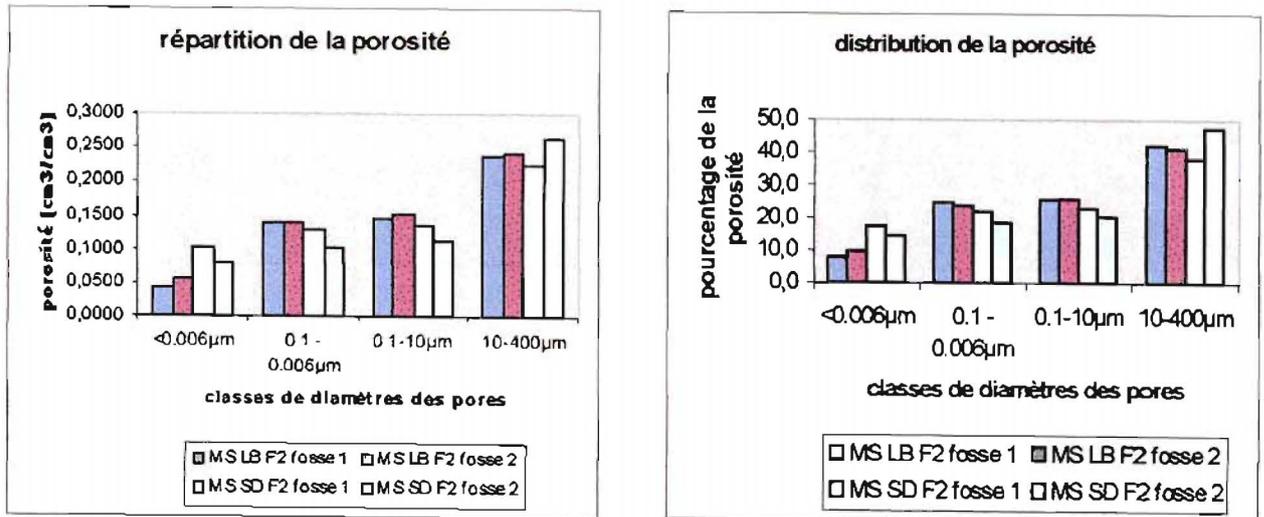
Les spectres poraux montrent une distribution de *type bimodale (deux pics)* sans que l'on puisse différencier les échantillons. Les deux pics correspondent à des diamètres moyens de l'ordre de 70 µm et 0,01 µm :

- le pic à 0,01 µm est situé dans la microporosité (ou porosité matricielle) (limite supérieure = 0,2 µm ; cf. tableau 6). Cette porosité retient trop fortement l'eau pour qu'elle soit absorbée par les racines.
- le 2<sup>nd</sup> pic, centré sur 70 µm et allant de 10 µm à 100 µm, correspond en partie à de la mésoporosité (jusqu'à 50 µm) (eau à drainage lent), et surtout à de la macroporosité (eau à drainage très rapide).

On rappelle pour mémoire que l'eau utilisable par les plantes est retenue dans le sol principalement par les pores de 0,2 µm à 10 µm, et également par ceux de 10 à 50 µm (zone à drainage lent).

Une distribution de la porosité en quatre classes de diamètre de pore (figure 19) montre une relative homogénéité des prélèvements sous labour tandis que ceux en semis direct sont plus variables, cependant globalement la porosité totale moyenne n'est pas différente.

On rappelle cependant que pour l'instant on manque de répétition.



Figures 19 : répartition et distribution de la porosité

Les résultats synthétiques de porosimétrie au mercure sont présentés ci-dessous au tableau numéro 20.

Tableau n° 13 : porosités sur mottes par porosimétrie au mercure

Porosité / Traitement	MS LB F2 Parcelle 1	MS LB F2 Parcelle 2	MS SD F2 Parcelle 1	MS SD F2 Parcelle 2
Nombre de mottes étudiées	1	3	2	3
<b>Densité apparente sur motte</b>	1,16	1,11	1,08	1,17
Densité sèche sur motte	2,41	2,34	2,12	2,25
Porosité > 0,006 µm	0,52	0,52	0,49	0,48
<b>Porosité totale (ds 2,65)</b>	<b>0,56</b>	<b>0,58</b>	<b>0,59</b>	<b>0,56</b>
Porosité < 0,006 µm	0,04	0,06	0,10	0,08
Porosité totale d'après densité apparente au cylindre	0,68	0,68	0,70	0,70
Porosité > 400 µm (0,4 mm)	0,12	0,10	0,11	0,14

Les densités apparentes sur mottes sont plus élevées que les densités au cylindre, ce qui est normal puisqu'une part de la macroporosité n'existe plus au niveau des mottes.

Les densités des solides (densité réelle) sont très faibles : de 2,12 à 2,41. Cela indique qu'il reste une partie importante de la microporosité (<0,006µm) non accessible au porosimètre. La porosité déterminée sur la base des densités sèches et apparentes ne comprend donc pas cette fraction inférieure à 0,006 µm.

Pour déterminer la porosité totale des mottes on utilise donc non pas la valeur de densité sèche déterminée au porosimètre mais une valeur de 2.65. Ensuite, par différence on peut estimer les porosités inférieures à 0,006  $\mu\text{m}$ .

On peut également estimer la porosité supérieure à 400  $\mu\text{m}$  par différence entre les porosités totale sur mottes et les porosités totales établies d'après les mesures au cylindre.

#### 4.3.3 Conclusions sur les porosités

Les résultats partiels de porosimétrie au mercure n'apportent pour l'instant que peu d'information : ils semblent indiquer cependant qu'il y a peu de différence entre MS SD et MS LB en ce qui concerne la porosité inférieure à 400  $\mu\text{m}$  (0,4 mm). Il y avait cependant une différence significative de densité apparente au cylindre (cf. figure 8). Cette différence concerne donc surtout la porosité supérieure à 400  $\mu\text{m}$ .

On rappelle par ailleurs que les porosités totales sont élevées :

- Sur 0-20 cm : porosité de 65%-75% (car densités apparentes de 0,7 à 0,9) ;
- Sur 20-40 cm : porosité de 60%-70% ;
- Au delà : porosité de 55%-65%.

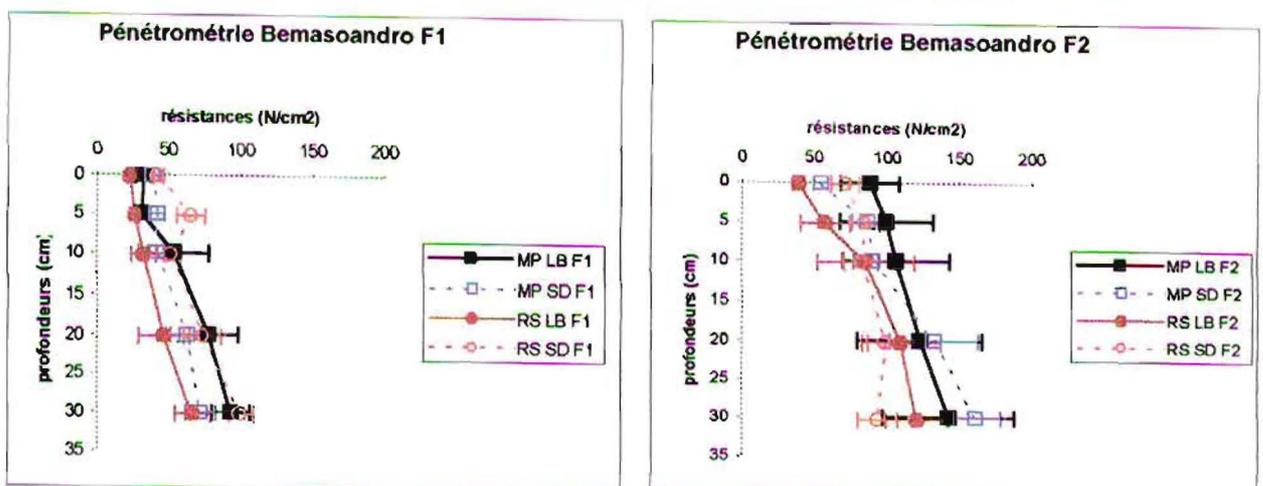
#### 4.4 Pénétrométrie

Les résultats obtenus sont difficiles à interpréter. On les présente tous aux figures 20, 21 et 22.

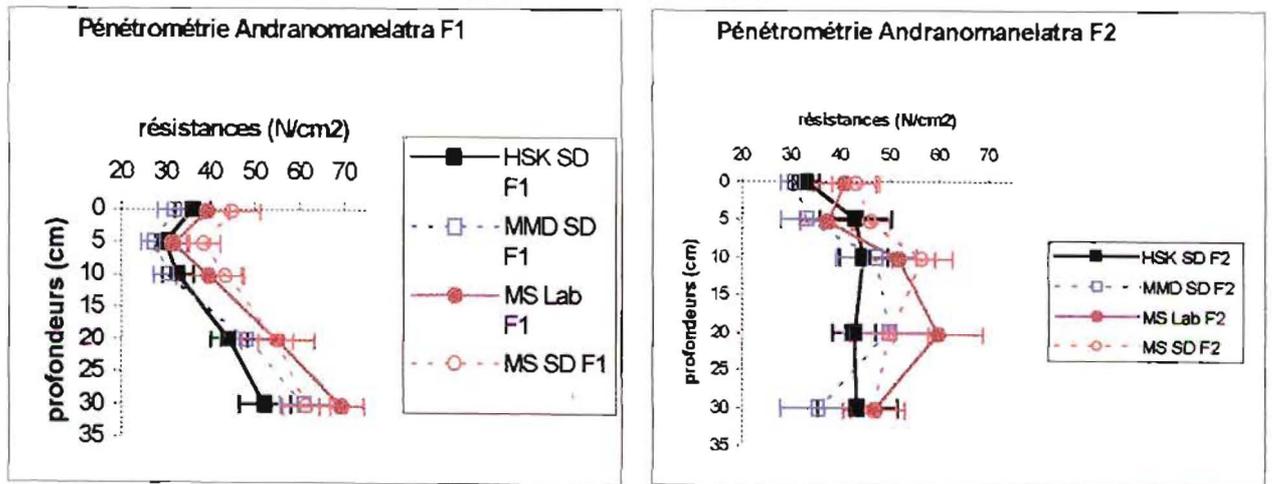
Ils sont particulièrement hétérogènes puisque les coefficients de variation (CV) sont élevés (de 40 à 50 %, sur des jeux de 12 données / horizon / traitement) alors que chaque donnée élémentaire considérée est pourtant la moyenne de 4 mesures réalisées les unes à côté des autres, ce qui devrait avoir tendance à diminuer la variabilité.

Nous pensons que cela traduit le fait que la mesure est délicate à réaliser de façon bien standardisée: problèmes de la poussée, choix du cône. Cela peut traduire aussi la présence locale de racines ou d'éléments grossiers, ou d'autres sources d'hétérogénéité.

Figures 20 : résistances au pénétromètre tous traitements à Bemasoandro



Figures 21 : résistances au pénétromètre tous traitements à Andranomanelatra

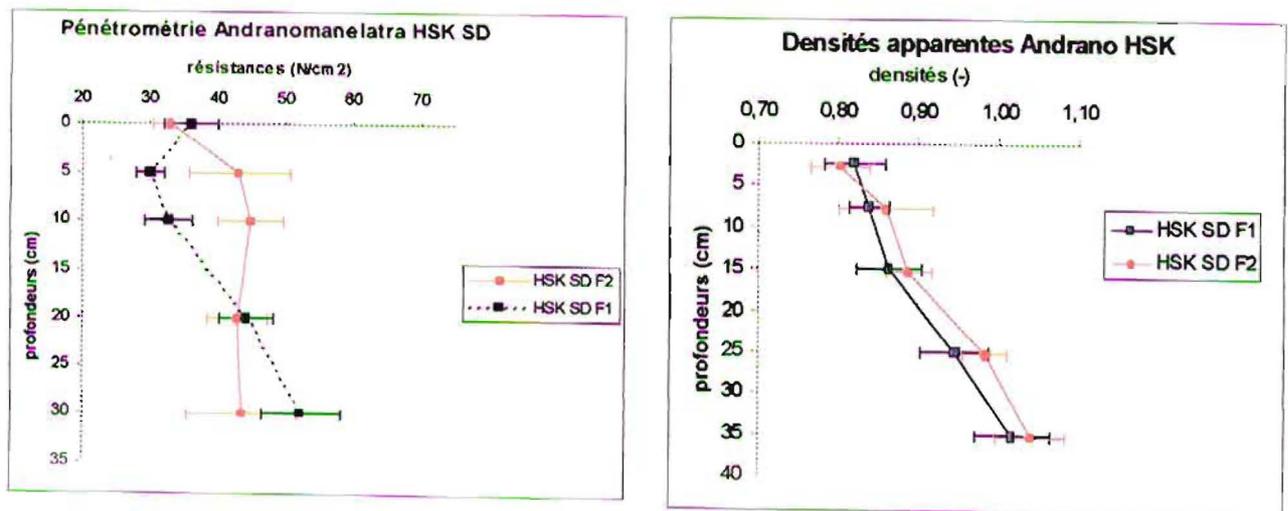


On n'observe pas de tendance générale et encore moins de différences significatives entre les traitements.

On constate que les valeurs augmentent progressivement en profondeur. Parfois les valeurs obtenues à 5 cm (couche 5-7 cm) sont cependant légèrement inférieures à celles obtenues en surface (0-2 cm). Cela traduit un effet de croûte.

Par ailleurs les résultats ne vont pas toujours dans le même sens que les densités apparentes. C'est la cas par exemple pour les données relevées sous le système haricot-soja sur kikuyu, comme l'indique la figure 22.

Figures 22 : résistances et densités apparentes sous HSK SD à Andranomanelatra



En fait il nous semble que dans de nombreux cas les valeurs sont particulièrement dépendantes de l'humidité. Il faudrait procéder à une analyse tenant compte des humidités.

En conclusion on retiendra que les informations de pénétrométrie sont peu claires et difficiles à interpréter. Elles ont apporté peu de chose.

## 4.5 Courbes pF et réserve utile

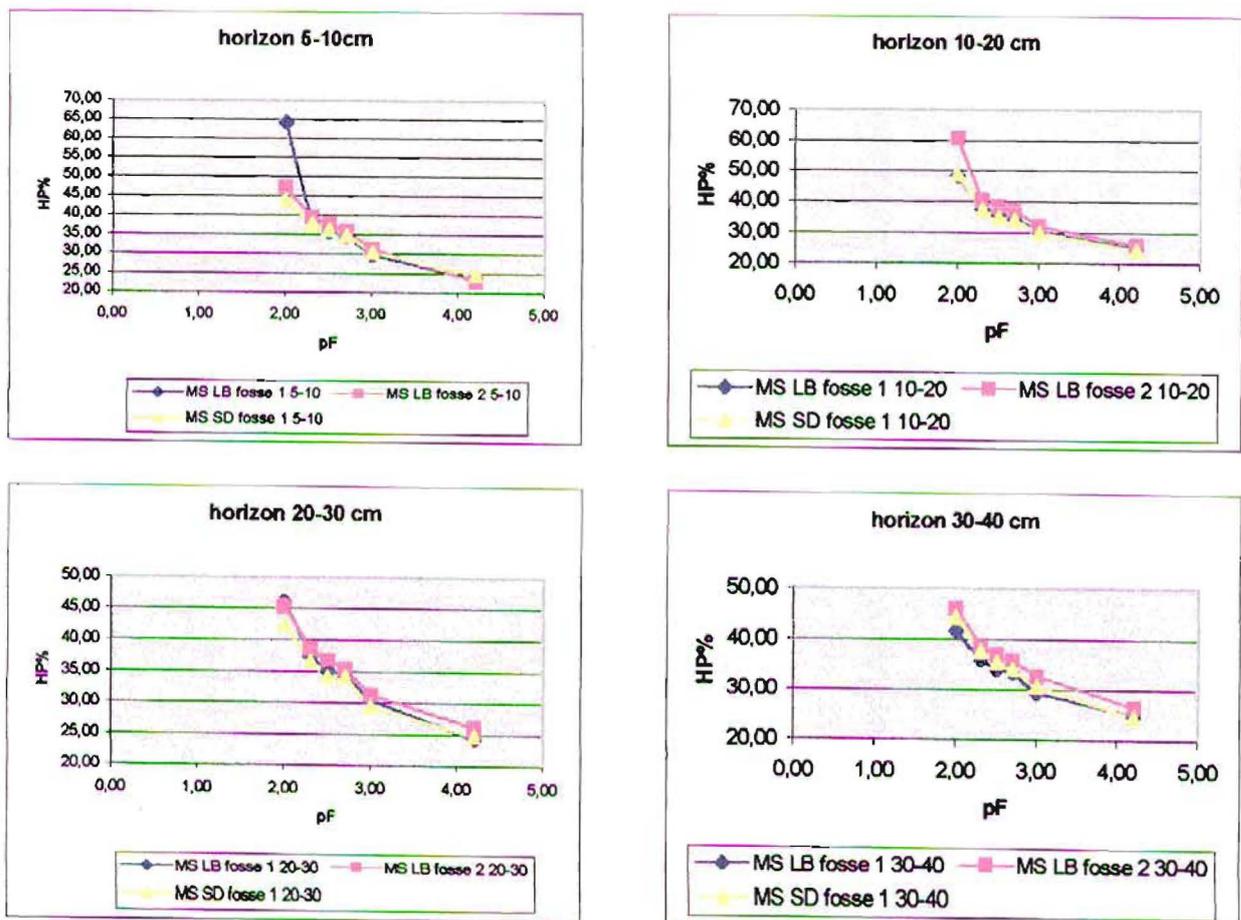
### 4.5.1 Courbes pF

De même que pour la porosimétrie au mercure nous n'avons que quelques résultats partiels.

Ces résultats proviennent uniquement des échantillons remaniés (un échantillon par horizon) recueillis au niveau des deux fosses en MS LB F2 et d'une seule fosse en MS SD F2. Il faudra attendre les résultats obtenus sur échantillons non remaniés (recueillis au moyen des petits cylindres de 5 cm de diamètre) pour pouvoir analyser les résultats car ce sont ces derniers qui sont la référence

On présente cependant certains des résultats disponibles à titre d'information en figure 23.

Figures 23 : exemples de courbes pF sur échantillons remaniés

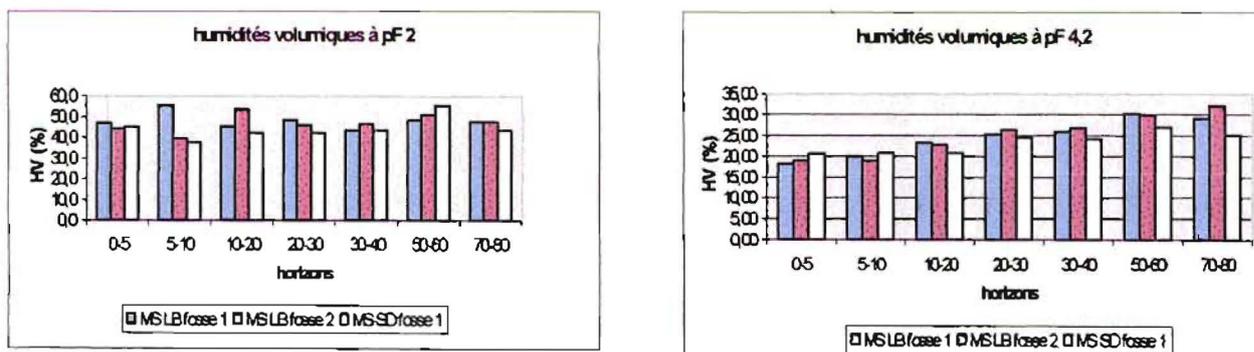


On n'observe pas de différence notable.

#### 4.5.2 Réserves utiles

La figure 24 présente les humidités volumiques au pF 2, correspondant environ à la capacité au champ, et au pF 4,2 correspondant au point de flétrissement permanent.

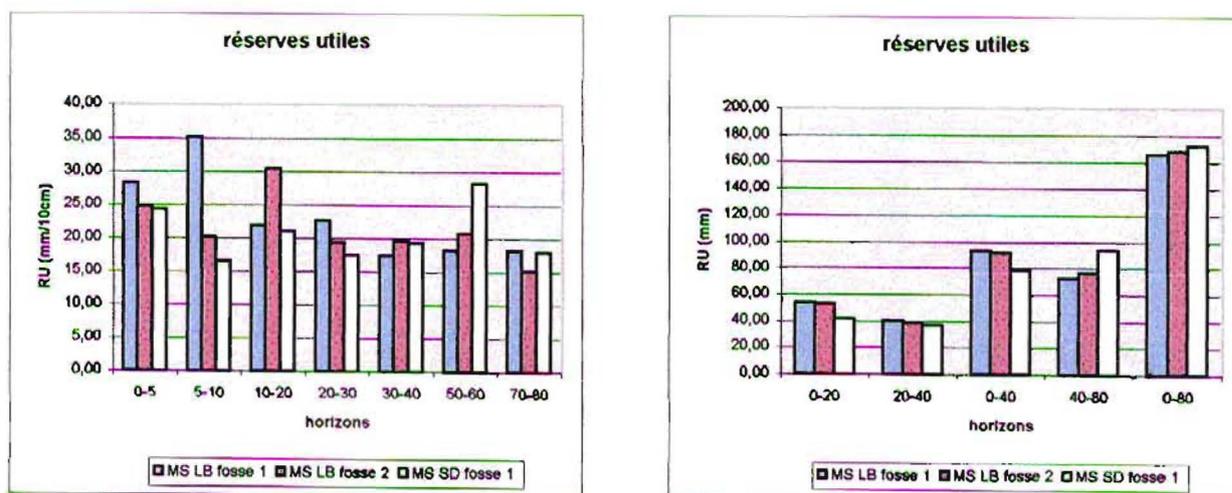
Figures 24 : humidités volumiques aux pF 2 et pF 4,2 (échantillons remaniés)



On ne décèle pas de tendance particulière. Les humidités à pF 2 sont relativement élevées.

La différence entre les humidités volumiques à pF 4.2 et à pF 2 permet une estimation de la réserve utile du sol. On peut donc déterminer les réserves utiles pour chaque horizon étudié et ensuite pour les profondeurs de sol que l'on veut. On les présente en figure 25.

Figures 25 : réserves utiles (échantillons remaniés)



Les réserves utiles sont élevées : de 80 à 100 mm sur 40 cm, et de 160 à 180 mm sur 80 cm.

On observe que sur 0-40 cm la réserve utile sous MS SD est très légèrement inférieure à celle sous labour. Mais il ne s'agit que de quelques mesures et sur échantillons remaniés.

On ne peut donc en fait rien conclure pour l'instant. Mais vraisemblablement on n'aura pas de différences significatives entre les traitements lorsque l'on aura les résultats obtenus sur échantillons non remaniés.

## CONCLUSION

Nous avons employé des méthodes très classiques (densités au cylindre, densités sèches, courbes pF) et moins classiques (pénétrométrie, porosité au mercure) pour l'étude des caractéristiques physiques des sols sous différents systèmes en semis-direct sur couverture végétale (SCV) et en labour, dans les sols ferrallitiques de la région d'Andranomanelatra.

Faute de temps les résultats sont encore incomplets pour pouvoir avoir une vision d'ensemble et cohérente : il manque en particulier de très nombreux résultats de porosimétrie et pF. Par ailleurs il faudrait analyser plus finement les données de pénétrométrie, certainement en tenant compte des humidités, car pour le moment cela ne semble pas être un bon outil de caractérisation.

Il faudrait surtout pouvoir mettre en relation les résultats obtenus avec des données de rendements (elles existent), de biomasses (n'existent pas) et des profils racinaires (n'existent pas). Il faudrait aussi procéder à des analyses chimiques (en particulier pour expliquer les valeurs élevées de densités sèches) et granulométriques.

**Cependant, nos résultats permettent déjà de constater des choses importantes en ce qui concerne la porosité : d'après l'analyse des résultats disponibles nous pouvons ainsi dire qu'il n'y a pas de différences nettes entre le SD et le système labouré, pas de différences nette non plus entre les niveaux de fumures, et enfin peu de différences entre traitements en SD même si cependant les couvertures vives se distinguent un peu. Enfin, au delà de 40 cm de profondeur, on ne constate pas d'effet des systèmes sur la porosité.**

**Ainsi les résultats de densités apparentes sont très intéressants car ils indiquent la capacité des systèmes en SD à maintenir ou améliorer la porosité, par la protection du sol, et les activités racinaires et biologiques. Nos résultats révèlent la force de certains systèmes (cas de maïs sur Desmodium) ou la relative faiblesse d'autres (cas de riz-soja avec F1).**

Ces résultats sont un peu surprenant car on s'attendait à des différences plus marquées entre traitements et fumures. Cela s'explique sans doute par la nature très argileuse des sols. Il nous faudra des analyses complémentaires (matière organique, Fer...) pour bien approfondir.

**Quoi qu'il en soit, cette étude a permis d'acquérir des informations précises qui n'existaient pas encore sur les sols de la région, et qui seront en particulier utiles (lorsqu'elles seront complètes) pour la compréhension des performances agronomiques des systèmes, de leur bilan hydrique, des phénomènes de ruissellement et d'érosion.**

On peut donc suggérer que pour les prochaines études il faut terminer les analyses en cours et les compléter : granulométrie, analyses chimiques, observations racinaires, biomasses, etc.

Il faudrait aussi poursuivre les études sur d'autres systèmes et les coupler avec l'étude d'autres propriétés physiques non encore étudiées, comme les caractéristiques d'infiltration ou les tests de stabilité structurale.

Pour la pénétrométrie, il faudra réaliser des mesures sous différentes conditions d'humidité.

## LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

- ALBRECHT A., FELLER C. & BARTHES B., 2002.** Séquestration du carbone dans les sols selon des pratiques alternatives (semi-direct associé à une gestion de la couverture du sol) à Madagascar. Projet FFEM madagascar.
- BAIZE D., 1988.** Guide des analyses courantes en pédologie. INRA, Paris.
- CALLOT G., CHAMAILLOU H. & MAERTENS C. & SALSAC L., 1982.** Les interactions sol-racine. Incidence sur la nutrition minérale. INRA, Paris.
- DECHANET R. & RAZAFINDRAKOTO J. & VALES M., 1997.** Résultats de l'amélioration variétale du riz d'altitude malgache. Pages 43-48 in Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture : actes de l'atelier international ANAE, CIRAD, Fafiala, Fifamanor, Fofifa, Tafa (Rasolo, F. & Raunet, M. eds.), 23-28 Mar 1998, Antsirabe, Madagascar. Montpellier, France, CIRAD, Collection Colloques.
- DOUNIAS I., 2001.** Les systèmes de culture à base de couverture végétale et semi-direct en zones tropicales, études et travaux n° 19.
- DUCHAUFOR P., 1988.** Abrégé de pédologie, 2<sup>nd</sup> édition. Masson, Paris, 1988, 224 p.
- ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE., COURS DE PHYSIQUE DU SOL, :** Régime de l'eau au champ, SL DGR13.4.93
- FIES J.C., 1992,** Analysis of Soil Textural Porosity Relative to skeleton particle size, using mercury porosimetry, Soil. Sci. Soc. Am
- FIES J.C. & BRUAND A., 1998.** Particle packing and organization of the textural porosity in clay-silt-sand mixtures, European Journal of soil Science
- FIES J.C. & STENGEL P., 1981.** Densité texturale de sols naturels. I. Méthode de mesure, agronomie.
- FIES J.C. & STENGEL P., 1981,** Densité texturale de sols naturels II. Eléments d'interprétation, agronomie.
- GOBAT J.M. & ARAGNO M. & MATTHEY W., 1998.** Le sol vivant, Bases de pédologie, Biologie des sols
- GALTIER A. & GUIMERA., 2000.** Diffusion de la riziculture pluviale d'altitude et ses perspectives dans la région du Vakinankaratra, Madagascar. Rapport ESITPA-PRA FOFIFA-CIRAD.
- GUERIF J., 1987.** Influence des variations de teneurs en matières organiques sur quelques propriétés physiques des sols agricoles, rapport d'ATP « Matière organique dans les sols »
- HARRIVEL V., 2001.** Le semis direct et l'élevage : concurrence ou complémentarité. Etude des relations agriculture-élevage à Miamamindra (Betafo), Andranomanelatra Centre (Andranomanelatra), Tsaramandroso Soamahavoky (Andranomanelatra), Ambolotsararano (Andranomanelatra), Madagascar. CIRAD-FOFIFA. Mémoire d'Ingénieur INH & DAT ESAT. Montpellier, France, CNEARC.
- LAGAYE C., 1999.** Caractérisation de parcelles expérimentales à Goiânia, état de Goiás, Brésil, INAPG, CIRAD.

**MATHIEU C. & PIELTAIN F. & ASSELINE. J. & CHOSSAT J.C & VALENTIN CH., 1998.** ANALYSE PHYSIQUE DES SOLS : Méthodes choisies.

**MEMENTO DE L'AGRONOME., 2002.** CIRAD, GRET, Ministères des affaires étrangères.

**MINETTE. S., 2000.** Mémoire de fin d'étude à l'ENSA Rennes. Etude de l'impact des techniques de semi-direct sur les caractéristiques physiques et biologiques des sols des Cerrados brésiliens.

**MOREL. J., 2001.** Diffusion et adoption des techniques de semis direct sur couverture végétale en périphérie d'Antananarivo, Madagascar; impacts sur le milieu paysan. Laboratoire de Radio-isotopes (LRI) Antananarivo, Université de Bourgogne.

**MOREL. R., 1999.** Les sols cultivés.

**PLEINES T & RASAMOELINA E., 1993.** Etude des systèmes agroforestiers et des pratiques paysannes en lutte anti-érosive sur Tanety dans la région du Vakinankaratra. Centre FAFIALA avec la coopération de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich/Génie forestier.

**PROJET CORUS., 2002.** Riziculture pluviale en semi-direct sur couverture végétale sur les hautes terres de Madagascar. Recherche et formation pour son amélioration et son développement

**RABEZANDRINA R., décembre 2000.** Manuel de pédologie malagasy

**RABEZANDRINA R., janvier 2002.** Manuel d'agriculture générale malagasy

**RAVELOJAONA H., 1992.** ATLAS CIRVA ANTSIRABE.

**ROOSE. E., 1994.** Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. ORSTOM, BCEOM, CNEARC, GCES.

**SEGUY L. BOUZNIAC., 1999.** Cultiver durablement et proprement les sols de la planète, en semi-direct, CIRAD-CA/GEC)

**SOLTNER D., 2000.** Guide d'agriculture intégrée (Agronomie-écologie-économie) : Les techniques culturales simplifiées, COMMENT ? Collection sciences et techniques.

**SOLTNER D., 2000.** Guide d'agriculture intégrée (Agronomie-écologie-économie) : Les techniques culturales simplifiées, POURQUOI ? Collection sciences et techniques.

**Référence trouvée sur l'internet :**

**PHYSIQUE DU SOL. PROJETS.,** Effet of soil amendements on colloid stability and contaminant transport in soils. [www.ulval.ca/vrr/rech/Proj/int\\_3791.html](http://www.ulval.ca/vrr/rech/Proj/int_3791.html).

## ANNEXE I : Généralités sur les sites d'études

### -la ferme d'Andranomanelatra centre

La ferme d'Andranomanelatra appartenant à la KOBAMA a été au début un centre d'essais de la culture de Blé sur tanety gérée par l'opération Blé de cette société.

A partir de 1991, grâce à l'appui technique de M. Séguy Lucien, la ferme a commencé à entreprendre des essais sur les systèmes de culture avec couverture permanente du sol et la technique du semi-direct. Ces essais ont été menés par la division Fermes mécanisée de l'opération Blé.

Après l'arrêt de l'activité de l'opération Blé, la KOBAMA a mis à la disposition (en location) de l'ONG Tafa la portion de terrain (3ha) sur laquelle elle a entrepris ses études.

Les dispositifs d'étude occupent un topo séquence complète de 2.78 ha

Le sol est ferrallitique argileux, moyennement dégradé, formé par des dépôts fluviolacustres (l'évolution du sol est le résultat de dépôt des sédiments mais directement lié à la roche mère).

### -site de Bemasoandro

Le site de Bemasoandro (fokontany de Bemololo, commune Andranomanelatra), se trouve à 1km, environ, au sud du centre ville du Fokontany d'Andranomanelatra centre longeant la RN7, avec une bifurcation à l'Est de la route.

Le sol est ferrallitique argileux, fortement dégradé, formé par des dépôts fluviolacustres.

#### Remarques :

a)-Notons que la situation générale de départ pour les sites se présente comme suit

-faible développement racinaire de presque toutes les cultures (sur sols ferrallitiques) dû à la présence d'une couche compacte à 20 à 25 cm de profondeur (dans ce cas il est difficile de maîtriser les risques climatiques : cas de sécheresses).

-présence d'horizon humide après la couche compacte (à partir de 30-40cm) : la remontée de l'humidité est bloquée par cette couche.

-carence généralisée en phosphore des sols (caractérisée par une couleur violacée des feuilles de Maïs.)

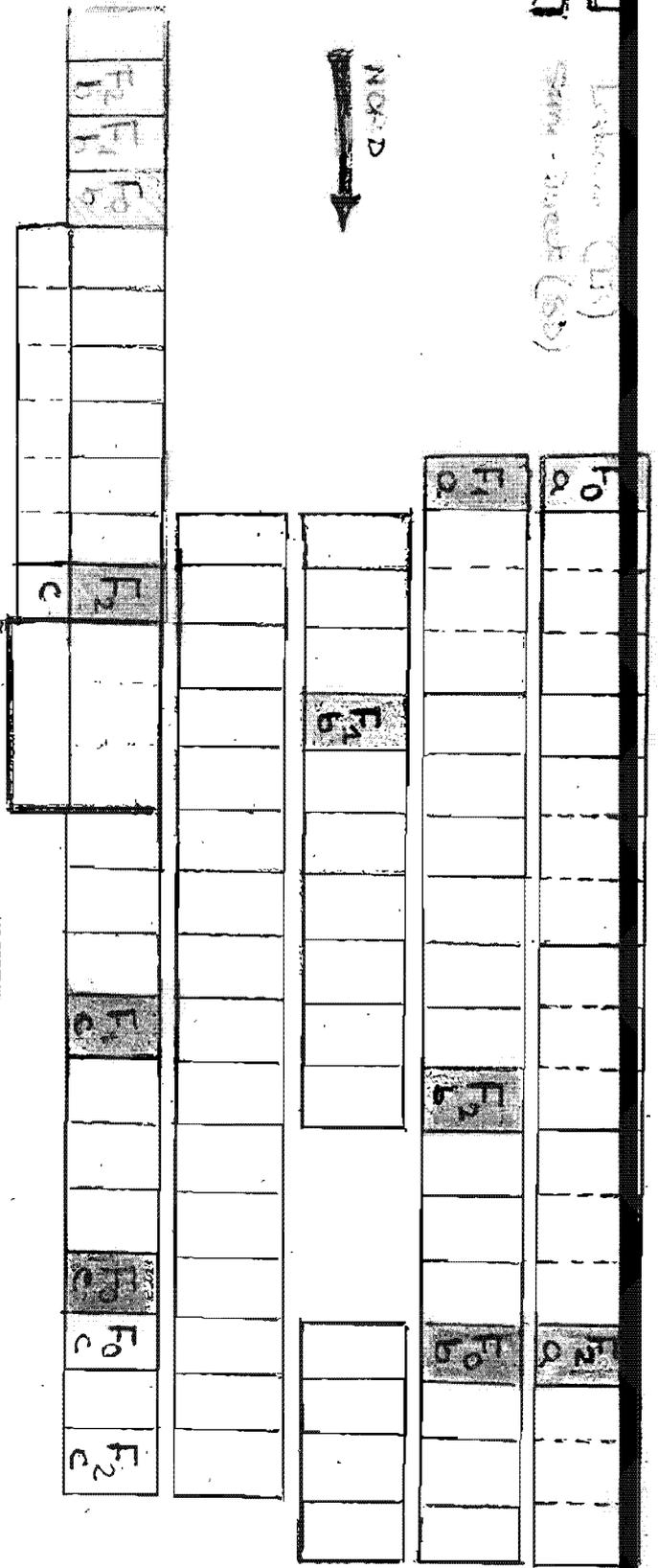
-érosion en des parcelles où la pente est supérieure à 5%.

b)- types de sol :

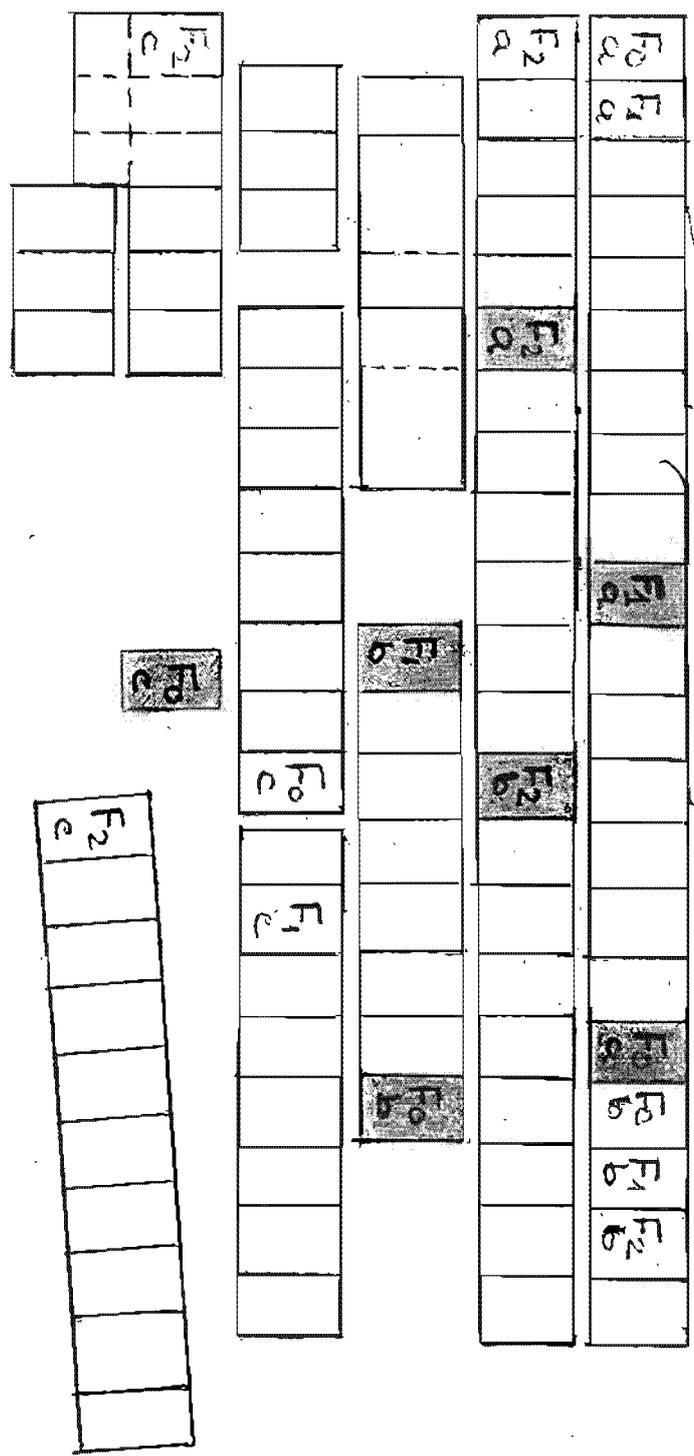
Le sol d'origine est acide (pH eau = 4,9 à 5,1), pauvre en matière organique (MO = 4 à 8%, Nt = 1,2 à 2,3 pour mille, Ct = 2,2 à 3,9%, C/N = 17 à 18), pauvre en phosphore (P Olsen = 1,2 ppm sur un P total = 630 ppm), Mg (0,1 à 0,2 me/100g), K (0,07 à 0,3 me/100g) avec une CEC de 4 à 6 me/100g

**ANNEXE II : Plan du site de BEMASOANDRO**

NOU-D



SYSTEME RIZ SUSA



SYSTEME  
 MAIS-PAT

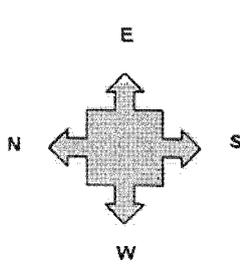
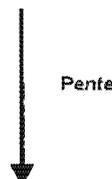
PENITE

**ANNEXE III : Plan du site d'ANDRANOMANELATRA**



ANDRANOMANELATRA 2

		A			B			C			D			E		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
1	2002-2003	Av-Har, R	Av-Soj, R	Soj, K	Mais, D											
	2001-2002	Av-Har, R	Riz, K	Har, K	Mais, D											
	2000-2001	Av-Har, R	Av-Soj, R	Soj, K	Mais, D											
	1999-2000	Av-Har, R	Av-Soj, R	Har, K	Mais, D											
	1998-1999	Av-Har, R	Av-Soj, R	Soj, K	Mais, D											
	1997-1998	Har, R	Soj, R	Har, K	Mais, D											
	1996-1997	Har, R	Soj, R	Soj, K	Mais, D											
	1995-1996	Av-Har, R	Av-Soj, R	Har, K	Mais, D											
	1994-1995	Av-Har, R	Av-Soj, R	Soj, K	Mais, D											
2	2002-2003				Mais, D											
	2001-2002				Mais, D											
	2000-2001				Mais, D											
	1999-2000				Mais, D											
	1998-1999				Mais, D											
	1997-1998				Mais, D											
	1996-1997				Mais, D											
	1995-1996				Mais, D											
	1994-1995				Mais, D											
3	2002-2003				Mais, R											
	2001-2002				Soj, R											
	2000-2001				Mais, R											
	1999-2000				Mais, R											
	1998-1999				Soj, R											
	1997-1998				Har, R											
	1996-1997				Har, R											
	1995-1996				Har, R											
	1994-1995				Mais, R											
4	2002-2003	Av-Har, R	Riz-Av, R	Har, K	Mais, A											
	2001-2002	Av-Har, R	Av-Soj, R	Soj, K	Mais, A											
	2000-2001	?	?	?	Mais, A											
	1999-2000	Av-Har, R	Av-Soj, R	Soj, K	Soj, R											
	1998-1999	Av-Har, R	Av-Soj, R	Har, K	Mais, R											
	1997-1998	Har, R	Soj, R	Soj, K	Soj, R											
	1996-1997	Har, R	Soj, R	Har, K	Mais, R											
	1995-1996	Mil-Har, R	Av-Soj, R	Soj, K	Soj, R											
	1994-1995	Av-Har, R	Av-Soj, R	Har, K	Mais, R											
5	2002-2003				A	Mais, D										
	2001-2002				Mais, A											
	2000-2001				Av-Har, R											
	1999-2000				Av-Har, R											
	1998-1999				Av-Har, R											
	1997-1998				Mais, R											
	1996-1997				Soj, R											
	1995-1996				Mais, R											
	1994-1995				Mais, R											



**Plantes**  
 Soj : Soja  
 Har : Haricot  
 Av : Avoine  
 Riz : Riz  
 Blé : Blé

... association  
 ? 1er et 2ème cycle  
 Har 1ère saison : 26 au 28/11/01  
 Har 2ème saison :

**Couvertures**  
 L : Labour  
 A : Arachis  
 Ca : Cassia  
 Cy : Cynodon  
 D : Desmodium  
 E : Ecobuee  
 K : Kikuyu  
 Lo : Lotier  
 Lo : Lotier  
 Mu : Mucuna  
 R : Résidus de récolte + couverture morte  
 Tr : Trèfle  
 V : vesce

**Fumure**  
 F1 : Fumier 5 t/ha  
 F2 : Fumier 5 t/ha + dolomie 500kg/ha + 30 N-70 P2O5-50 K2O pour soja et haricot  
 ou 70 N-70 P2O5- 25 K2O pour maïs et blé  
 F3 : Fumier 5 t/ha + dolomie 2t/ha + 50 N-145 P2O5-85 K2O pour soja et haricot  
 ou 180 N-145 P2O5- 95 K2O pour maïs et blé



**ANNEXE IV: Tableau des données brutes « météorologie de la commune  
d'Andranomaneetra (valeurs décadaires)**

	Tmin	Tmax	Tmoy	HRmin	HRmax	HRmoy24	Pluie	Intensité	Vent	Vent	Intensité	Rapport
			$(Tn+Tx)/2$				24H	max pluie	total 24H	moyen	max vent	Glob 24
	°C	°C	°C	%	%	%	mm	mm/h	Km	m/s	m/s	J/m <sup>2</sup>
Novembre déc.1	13,9	26,5	20,2	40,6	95,8	76,7	105,0	115,0	190,2	2,2	15	985
Novembre déc.2	13,6	24,9	19,3	44,3	96,2	78,3	72,0	80,0	200,0	2,3	12	286
Novembre déc.3	11,8	25,5	18,3	39,0	92,6	69,0	0,0	0,0	255,5	3,0	12	418
Décembre déc.1	12,9	23,5	18,1	50,7	96,4	80,8	71,5	60,0	245,5	2,8	12	367
Décembre déc.2	14,7	24,7	19,7	51,3	97,6	83,0	159,0	95,0	188,9	2,2	10	092
Décembre déc.3	14,6	24,2	19,4	55,9	97,6	85,7	144,0	80,0	189,5	2,2	11	377
Janvier déc.1	14,7	22,6	18,7	65,8	97,7	88,6	150,0	50,0	189,8	2,2	9	096
Janvier déc.2	15,3	24,4	19,9	59,9	98,5	88,9	338,5	75,0	157,6	1,8	10	701
Janvier déc.3	15,7	24,3	20,0	60,7	97,5	86,2	171,5	110,0	187,5	2,2	10	741
Février déc.1	14,7	24,2	19,4	58,2	96,5	82,8	8,5	20,0	189,7	2,2	9	380
Février déc.2	12,2	25,3	18,7	51,0	97,5	83,8	27,0	30,0	157,7	1,8	10	961
Février déc.3	14,4	23,9	19,2	56,3	98,8	84,6	51,5	90,0	165,3	1,9	13	390
Mars déc.1	14,5	25,1	19,8	53,7	98,7	84,9	60,5	40,0	172,5	2,0	11	111
Mars déc.2	14,8	24,2	20,0	61,8	99,1	89,9	184,0	100,0	139,6	1,6	9	425
Mars déc.3	14,0	24,4	19,2	54,3	97,8	84,0	13,0	35,0	179,8	2,1	9	319
Avril déc.1	12,4	24,6	18,5	46,1	99,4	80,0	39,0	105,0	168,7	2,0	12	389
Avril déc.2	8,0	24,0	16,0	34,3	99,0	74,2	1,5	5,0	154,7	1,7	9	246
Avril déc.3	10,5	24,8	17,7	42,6	99,6	80,8	39,5	85,0	154,8	1,8	10	338
Mai déc.1	10,6	22,7	16,6	49,1	99,8	83,4	7,0	10,0	134,7	1,6	8	520
Mai déc.2	12,6	23,2	17,9	54,9	99,6	85,6	16,5	25,0	135,3	1,6	9	947
Mai déc.3	9,4	23,1	16,2	42,0	99,8	79,3	2,0	5,0	181,5	2,1	11	699
Juin déc.1	7,2	22,4	14,8	36,4	98,8	73,8	1,0	5,0	151,4	1,8	10	354
Juin déc.2	4,7	20,1	12,4	36,0	100,7	77,0	0,5	5,0	175,4	2,0	8	449

## ANNEXE V : Fonctionnement du porosimètre

L'appareil qui a été utilisé au laboratoire MOST du CIRAD est le Pore Sizer 9310 de Micromeritics. C'est un appareil semi-automatique permettant des mesures dans une gamme de pression de  $10^{-3}$  à 206 MPa, correspondant à des diamètres équivalents de pores de 400 à  $0.006\mu\text{m}$ . Il ne peut explorer les pores inférieurs à  $0.006\mu\text{m}$ .

L'appareil enregistre en continue les valeurs de quantités de mercure introduites dans la porosité, donc les volumes occupés, et les valeurs de forces nécessaires pour introduire ces quantités, donc les diamètres des pores explorés (d'après les équations de capillarité). La courbe obtenue pour chaque échantillon est son spectre poral.

Il est constitué de deux postes, un poste dit "basse pression" pour les pressions inférieures à la pression atmosphérique (mesures en manuel), un poste dit "haute pression" pour les pressions supérieures à la pression atmosphérique (mesures en manuel ou en automatique). Pour les mesures en haute pression, la vitesse d'intrusion, le pas de pression et le temps d'équilibrage de celle-ci, peuvent être programmés dans une table et le pilotage être automatique. Deux cellules de mesures peuvent être traitées simultanément en basse pression tandis que le poste haute pression ne permet de traiter qu'une seule cellule. Divers types de cellules existent selon la nature des échantillons (poudreux ou agrégés), leur volume et le volume poral suspecté. Une cellule de mesure est constituée d'une chambre cylindrique en verre de 16 mm de diamètre et de 26 mm de profondeur, prolongée par un capillaire d'une longueur de 200 mm, le choix du diamètre interne dépendant de la nature de l'échantillon. Le capillaire est métallisé à sa périphérie et constitue donc un condensateur quand sa lumière intérieure est occupée par le mercure. La mesure de la capacité de ce condensateur permet donc d'avoir accès au volume de mercure introduit dans l'échantillon par l'intermédiaire d'un facteur de conversion propre à chaque type de capillaire.

L'échantillon déshydraté (étuvage, échange eau-acétone, dessiccateur à point critique,...) est introduit dans la cellule de mesure préalablement tarée, et l'ensemble est pesé. La cellule est alors transférée dans le poste "basse pression" et soumise à un vide de l'ordre de  $1.10^{-6}$  MPa avant son remplissage par le mercure. En "basse pression", 25 points de mesures peuvent être effectués pour des pressions comprises entre  $3.10^{-3}$  et  $10^{-1}$  MPa. Entre chaque mesure, le pas de temps varie en fonction de l'obtention de l'équilibre que l'on considère atteint lorsque la variation de capacité est inférieure ou égale à 0.01 pF. Lorsque la pression atmosphérique est atteinte, la cellule de mesure est repesée puis introduite dans le poste "haute pression" où la pression est transmise au mercure par l'intermédiaire d'une huile spéciale.

En procédure automatique, la vitesse de montée en pression, le pas de pression et le temps d'équilibre peuvent être programmés. Jusqu'à 206 MPa, pression maximale autorisée, **soixante-quinze points de mesures sont réalisables** permettant d'avoir une courbe continue, et offrant de plus la possibilité de tester l'effet d'hystérésis. La table de pression utilisée comporte 49 points de mesure pour la montée en pression, le pas de pression utilisé étant de 1.2589 (série de Renard), et 18 points pour le retour à la pression atmosphérique. Avec  $\gamma = 0.484\text{Nm}^{-1}$ ,  $\theta = 130^\circ$ , D en  $\mu\text{m}$  et P en Mpa, la relation de capillarité devient:  $P = 1.244 / D$ .

Un programme informatique permet d'obtenir ;

d'une part les résultats généraux :

- volume total de mercure introduit, exprimé en  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ,
- surface totale des pores, exprimée en  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
- diamètre médian par rapport au volume, exprimé en  $\mu\text{m}$ ,
- diamètre médian par rapport à la surface, exprimé en  $\mu\text{m}$ ,
- diamètre moyen des pores ( $4V/A$ ), exprimé en  $\mu\text{m}$ ,
- densité apparente de l'échantillon, exprimée en  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (\*),
- densité (apparente) des solides, exprimée en  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (\*),

d'autre part, selon l'objectif, les courbes spécifiques :

- courbe cumulée d'intrusion de mercure en fonction du diamètre d'entrée des pores,
- courbe cumulée de la surface spécifique en fonction du diamètre d'entrée des pores,
- courbe incrémentale d'intrusion de mercure en fonction du diamètre d'entrée des pores,
- courbe incrémentale de la surface spécifique en fonction du diamètre d'entrée des pores,
- courbes dérivées d'intrusion de mercure en fonction du diamètre d'entrée des pores,  
( $\Delta V / \Delta \log D$  vs  $\log D$  ==> spectre poral, ou  $\log (\Delta V / \Delta P)$  vs  $\log P$  ==> approche fractale).

Les densités apparente du sol et densité des solides permettent de calculer la porosité accessible au porosimètre soit jusqu'à des pores de  $0.006\text{m}$ , la porosité résiduelle relative aux pores plus fins ne peut être obtenue que par détermination de la densité réelle des solides par la méthode pycnométrique. Cette porosité résiduelle peut devenir importante dans le cas des sols argileux dont la matrice n'est en général remplie qu'à 50% (Fiés, 1984).

**ANNEXE VI: Données brutes et données statistiques des valeurs pénétrométriques de Bemasoandro**

Parcelle	L/IN	0-5cm	5-10cm	10-20cm	20-30cm	30-40cm
		0-2	5-7	10-12	20-22	30-32
		RESISTANCE DE COMPACTION				
RS lb F1 a1	IN	21,2149	20,7607	19,43105	16,77255	62,05475
RS lb F1 a2	L	21,2077	27,0108	18,9929	53,75445	64,89965
RS lb F1 a3	IN	18,546	22,112	18,53955	19,8724	65,77995
RS lb F1 a4	L	27,9023	19,8796	19,8716	24,76885	45,54215
RS lb F1 b1	IN	22,5413	27,0108	70,43345	63,4452	57,43725
RS lb F1 b2	L	17,6609	22,5405	36,49435	31,5003	54,69075
RS lb F1 b3	IN	17,2179	28,8002	22,5405	14,5562	48,27425
RS lb F1 b4	L	15,4429	18,9873	20,7639	12,7924	23,4584
RS lb F1 c1	IN	27,9023	40,5273	61,15365	104,3236486	103,6261261
RS lb F1 c2	L	25,6748	27,4514	28,797	114,15503	112,0372372
RS lb F1 c3	IN	30,1499	31,5003	34,64255	60,8555	80,72475
RS lb F1 c4	L	29,7069	25,2182	37,8048	41,4308	77,4833
RS lb F2 a1	IN	40,5145	77,8919	162,135125	179,53375	137,81825
RS lb F2 a2	L	54,207	83,4618	126,3945	170,19675	166,760625
RS lb F2 a3	IN	40,0604	39,607	44,1477	128,64525	157,531625
RS lb F2 a4	L	39,607	40,5145	39,607	110,6842342	142,52975
RS lb F2 b1	IN	42,3447	43,2938	156,32025	121,9503003	102,419625
RS lb F2 b2	L	41,8818	121,907	207,80075	145,885875	108,1165
RS lb F2 b3	IN	44,6027	34,6394	23,00665	29,7037	84,88430931
RS lb F2 b4	L	30,1555	22,9955	21,20445	26,1321	31,07175
RS lb F2 c1	IN	29,6989	60,6843	87,9722973	144,7825	119,61225
RS lb F2 c2	L	30,1403	102,238	94,66283784	120,741625	169,205375
RS lb F2 c3	IN	40,5329	36,4632	32,4014	93,19331832	145,957875
RS lb F2 c4	L	27,0132	18,5484	28,8026	40,97585	78,84735
RS sd F1 a1	IN	53,3475	48,7332	43,2786	46,8894	56,0604
RS sd F1 a2	L	40,5273	66,2285	48,8164	46,899	95,26786787
RS sd F1 a3	IN	42,3519	93,8812	77,28963964	78,378	116,2692192
RS sd F1 a4	L	37,8048	46,8894	47,8001	67,1488	105,0223724
RS sd F1 b1	IN	43,2594	65,3018	38,7443	73,6805	92,46576577
RS sd F1 b2	L	39,6358	112,056	40,5145	58,11696697	109,2495495
RS sd F1 b3	IN	57,9138	52,376	54,2198	106,433033	105,0271772
RS sd F1 b4	L	38,7027	70,9164	59,8024	114,8441441	102,2442943
RS sd F1 c1	IN	36,8973	55,1785	64,4359	52,3728	88,33468488
RS sd F1 c2	L	31,5035	57,933	50,08845	51,94905	117,6798799
RS sd F1 c3	IN	42,3423	55,5967	56,9935	110,7130631	104,3452703
RS sd F1 c4	L	43,2498	56,5378	47,39715	73,20875	107,8292793
RS sd F2 a1	IN	116,602	102,214	61,85228979	61,85349099	69,03828829
RS sd F2 a2	L	xxxxxxxx	xxxxxxxx	xxxxxxxx	xxxxxxxx	xxxxxxxx
RS sd F2 a3	IN	59,8102	60,8314	59,81017267	87,80683183	100,1301051
RS sd F2 a4	L	60,1504	61,1722	68,69478228	97,33400901	67,65645646
RS sd F2 b1	IN	66,2866	115,548	83,85589339	82,78333333	110,6794294
RS sd F2 b2	L	65,2618	80,0305	77,27522523	102,2394895	111,349024
RS sd F2 b3	IN	68,681	105,723	93,8524024	64,92522523	66,29264264
RS sd F2 b4	L	82,0798	73,8273	66,97094595	109,2735736	106,4318318
RS sd F2 c1	IN	76,5885	97,3436	79,32094595	131,004	76,038
RS sd F2 c2	L	75,5391	75,2067	99,43618619	101,6416667	119,49225
RS sd F2 c3	IN	60,267	73,8309	134,366125	124,08575	63,4324
RS sd F2 c4	L	47,3476	82,1098	77,30405405	122,618994	134,384125
MP sd F1 a1	IN	43,7256	57,4533	71,18095	92,48498498	95,9774024

MP sd F1 a2	L	41,4358	52,8566	60,20935	102,925	112,729955
MP sd F1 a3	IN	23,879	22,5405	42,3615	46,0171	62,98785
MP sd F1 a4	L	34,6746	36,0034	29,24555	33,2897	84,84106607
MP sd F1 b1	IN	58,8149	44,1509	38,7027	65,76795	62,98785
MP sd F1 b2	L	45,9819	39,6168	36,0186	61,17285	51,94265
MP sd F1 b3	IN	40,5273	43,7096	54,207	69,9409	64,3591
MP sd F1 b4	L	37,3491	39,1713	27,9119	68,56885	70,9036
MP sd F1 c1	IN	39,6454	35,9994	64,86365	67,148	76,4926
MP sd F1 c2	L	36,005	53,8633	52,4464	67,64055	80,2626
MP sd F1 c3	IN	28,3557	35,5437	32,3942	37,38745	40,5169
MP sd F1 c4	L	32,8436	43,74	26,1153	34,198	54,2806
MP sd F2 a1	IN	48,8292	84,2192	60,24917417	97,41448949	134,390125
MP sd F2 a2	L	68,3648	77,2656	89,73573574	110,1008258	160,95575
MP sd F2 a3	IN	56,0772	106,481	77,29924925	226,63075	135,6135
MP sd F2 a4	L	35,0951	58,165	108,1325	219,4945	160,95375
MP sd F2 b1	IN	60,7483	78,6811	155,148875	48,0243	89,23040541
MP sd F2 b2	L	66,2637	59,47	78,06644144	177,243	172,6835
MP sd F2 b3	IN	52,4264	94,5788	105,1220721	198,25575	145,939875
MP sd F2 b4	L	45,084	67,6937	77,30885886	100,8372372	160,99375
MP sd F2 c1	IN	59,3555	102,939	89,74174174	117,6882883	225,439375
MP sd F2 c2	L	45,0744	73,1502	74,52237237	73,7133	190,142125
MP sd F2 c3	IN	49,6239	119,891	85,58261261	113,4490991	190,064125
MP sd F2 c4	L	56,581	113,5	75,92582583	105,0211712	159,786375
MP lb F1 a1	IN	25,2222	31,0422	137,81225	149,328	147,02925
MP lb F1 a2	L	33,7407	49,3258	155,118875	137,82825	128,64125
MP lb F1 a3	IN	22,9875	22,9859	23,87815	42,3447	67,1592
MP lb F1 a4	L	25,223	22,5405	52,4112	68,69825	114,95275
MP lb F1 b1	IN	28,6026	29,6941	35,0919	80,01966967	93,1753003
MP lb F1 b2	L	38,2614	36,4448	25,2174	88,30585586	89,70690691
MP lb F1 b3	IN	33,2929	25,6636	18,1174	25,2182	68,0851
MP lb F1 b4	L	22,5405	28,797	15,4429	29,25195	89,00818318
MP lb F1 c1	IN	44,6123	44,8123	38,7123	68,2477	84,16996997
MP lb F1 c2	L	38,2502	34,2132	77,99917417	116,3028529	98,05075075
MP lb F1 c3	IN	57,0319	27,457	31,04935	71,79594595	67,67447447
MP lb F1 c4	L	24,3267	25,2182	40,09235	62,88791291	79,34977477
MP lb F2 a1	IN	56,0892	205,334	192,384875	128,63325	82,78453453
MP lb F2 a2	L	51,5317	183,038	185,366825	147,14925	111,538625
MP lb F2 a3	IN	59,3675	34,1876	32,84275	61,5886	105,05
MP lb F2 a4	L	51,4693	43,8952	30,5968	34,64495	51,08155
MP lb F2 b1	IN	187,731	98,8264	114,854955	317,514	148,250625
MP lb F2 b2	L	114,857	102,915	185,502625	199,533125	389,48725
MP lb F2 b3	IN	109,236	68,3528	41,90415	77,41096096	192,418875
MP lb F2 b4	L	81,4123	73,1562	70,40930931	75,9954955	119,7784535
MP lb F2 c1	IN	114,867	122,632	158,609	166,848625	163,2525
MP lb F2 c2	L	80,71	186,546	188,88475	172,5875	160,93975
MP lb F2 c3	IN	82,0918	49,6527	51,4621	63,4332	104,3344595
MP lb F2 c4	L	74,5484	30,596	26,1121	31,4883	88,31066066

Tableaux statistiques :

	moy	écart	N	CV%	IC 10%	dif.sign. 10%
MP SD F2	54	10	12	18	5	OUI
MP SD F2	86	21	12	24	11	non
MP SD F2	90	25	12	27	13	non
MP SD F2	132	59	12	44	30	non
MP SD F2	161	34	12	21	18	non
RS SD F2	71	18	11	25	10	OUI
RS SD F2	84	18	11	22	10	OUI
RS SD F2	82	21	11	26	12	non
RS SD F2	99	23	11	23	13	non
RS SD F2	93	25	11	27	14	non
MP SD F1	39	9	12	23	5	oui
MP SD F1	42	10	12	23	5	OUI
MP SD F1	42	13	12	31	7	non
MP SD F1	62	22	12	35	11	non
MP SD F1	72	20	12	28	10	non
RS SD F1	42	7	12	17	4	OUI
RS SD F1	65	19	12	30	10	OUI
RS SD F1	52	11	12	21	6	OUI
RS SD F1	73	25	12	34	13	non
RS SD F1	100	16	12	16	8	OUI
MP SD F0	39	7	12	18	4	non
MP SD F0	37	9	12	25	5	non
MP SD F0	46	18	12	38	9	non
MP SD F0	70	25	12	35	13	non
MP SD F0	95	12	12	13	6	OUI
RS SD F0	58	43	12	75	22	oui
RS SD F0	53	13	12	25	7	non
RS SD F0	52	11	12	22	6	non
RS SD F0	117	66	12	56	34	non
RS SD F0	141	14	12	10	7	non

Tableau comparant les niveaux de fumures

	système	prof	fumure	moy	IC 10%		fumure	moy	IC 10%		fumure	moy	IC 10%
Bem	MP LB	0	F2	89	20	b	F1	33	5	a	F0	39	
Bem	MP LB	5	F2	100	32	b	F1	31	4	a	F0	38	
Bem	MP LB	10	F2	107	37	a	F1	54	24	a	F0	55	
Bem	MP LB	20	F2	123	43	a	F1	78	21	a	F0	78	
Bem	MP LB	30	F2	143	45	a	F1	94	13	a	F0	75	
Bem	MP SD	0	F2	54	5	b	F1	39	5	a	F0	39	
Bem	MP SD	5	F2	88	11	b	F1	42	5	a	F0	37	
Bem	MP SD	10	F2	90	13	b	F1	42	7	a	F0	46	
Bem	MP SD	20	F2	132	30	b	F1	62	11	a	F0	70	
Bem	MP SD	30	F2	161	18	b	F1	72	10	c	F0	95	
Bem	RS LB	0	F2	38	4	b	F1	23	3	a	F0	23	
Bem	RS LB	5	F2	57	17	a	F1	26	3	a	F0	35	
Bem	RS LB	10	F2	85	33	a	F1	32	9	a	F0	57	
Bem	RS LB	20	F2	109	27	a	F1	47	18	b	F0	92	
Bem	RS LB	30	F2	120	21	a	F1	66	13	b	F0	122	
Bem	RS SD	0	F2	71	10	a	F1	42	4	a	F0	58	
Bem	RS SD	5	F2	84	10	a	F1	65	10	a	F0	53	
Bem	RS SD	10	F2	82	12	b	F1	52	6	a	F0	52	
Bem	RS SD	20	F2	99	13	a	F1	73	13	a	F0	117	
Bem	RS SD	30	F2	93	14	a	F1	100	8	a	F0	141	

**ANNEXE VII : Données brutes des valeurs pénétrométriques d'Andranomanelatra**

parcelle		Rép	fosse	L\IN	0-5cm	5-10cm	10-20cm	20-30cm	30-40cm
					0-2	5-7	10-12	20-22	30-32
					RESISTANCE DE COMPACITON				
Moyenne HS sd F1 a1	HS SD F1	a	1	IN	44,1485	27,8979	33,2853	44,1465	43,237
Moyenne HS sd F1 a2	HS SD F1	a	2	L	27,0028	31,4863	45,9679	56,9635	40,5133
Moyenne HS sd F1 a3	HS SD F1	a	3	IN	27,0028	25,215	21,649	28,7938	44,1465
Moyenne HS sd F1 a4	HS SD F1	a	4	L	29,6905	35,9898	34,186	43,237	51,4513
Moyenne HS sd F1 b1	HS SD F1	b	1	IN	44,1465	27,0028	27,8979	55,1229	67,144
Moyenne HS sd F1 b2	HS SD F1	b	2	L	35,0875	30,588	38,7015	49,6203	74,6088
Moyenne HS sd F1 b3	HS SD F1	b	3	IN	40,5133	26,1085	25,215	41,4204	67,144
Moyenne HS sd F1 b4	HS SD F1	b	4	L	23,4304	27,0028	27,0028	43,237	52,368
Moyenne HS sd F1 c1	HS SD F1	c	1	IN	41,4204	30,588	39,607	34,186	45,0568
Moyenne HS sd F1 c2	HS SD F1	c	2	L	42,3283	33,2853	35,9898	42,3283	45,0568
Moyenne HS sd F1 c3	HS SD F1	c	3	IN	44,1465	37,7968	30,588	46,8798	51,4513
Moyenne HS sd F1 c4	HS SD F1	c	4	L	35,0875	27,0028	34,186	45,9679	45,9679
Moyenne HS sd F2 a1	HS SD F2	a	1	IN	28,7938	32,3854	35,9898	40,5133	59,7304
Moyenne HS sd F2 a2	HS SD F2	a	2	L	27,8979	32,3854	37,7968	34,186	48,708
Moyenne HS sd F2 a3	HS SD F2	a	3	IN	27,45025	32,3854	37,7968	29,6905	45,0568
Moyenne HS sd F2 a4	HS SD F2	a	4	L	24,3223	36,8929	41,4204	35,9898	54,2038
Moyenne HS sd F2 b1	HS SD F2	b	1	IN	42,78255	37,34475	31,03705	52,82665	68,0743
Moyenne HS sd F2 b2	HS SD F2	b	2	L	35,9898	43,69165	32,3854	66,67915	75,5455
Moyenne HS sd F2 b3	HS SD F2	b	3	IN	43,69165	33,73555	27,0028	62,5045	49,6203
Moyenne HS sd F2 b4	HS SD F2	b	4	L	42,78255	38,7015	29,6905	61,11655	55,1229
Moyenne HS sd F2 c1	HS SD F2	c	1	IN	41,4204	25,215	25,215	47,7925	58,8073
Moyenne HS sd F2 c2	HS SD F2	c	2	L	36,8929	31,4863	41,4204	46,8798	41,4204
Moyenne HS sd F2 c3	HS SD F2	c	3	IN	37,7968	29,6905	37,7968	45,0568	60,6543
Moyenne HS sd F2 c4	HS SD F2	c	4	L	35,0875	35,0875	38,7015	46,8798	45,9679
Moyenne MM sd F1 a1	MM SD F1	a	1	IN	41,4204	27,0028	23,4304	36,8929	77,4213
Moyenne MM sd F1 a2	MM SD F1	a	2	L	36,8929	22,5393	31,4863	45,0568	69,9373
Moyenne MM sd F1 a3	MM SD F1	a	3	IN	35,0875	22,5393	26,1085	23,4304	55,1229
Moyenne MM sd F1 a4	MM SD F1	a	4	L	36,8929	29,24205	35,9898	69,0054	70,40355
Moyenne MM sd F1 b1	MM SD F1	b	1	IN	27,8979	23,4304	22,5393	49,6203	43,237
Moyenne MM sd F1 b2	MM SD F1	b	2	L	28,7938	25,215	33,2853	46,8798	55,1229
Moyenne MM sd F1 b3	MM SD F1	b	3	IN	24,3223	24,3223	35,0875	45,9679	50,5354
Moyenne MM sd F1 b4	MM SD F1	b	4	L	23,4304	22,5393	21,649	51,4513	56,9635
Moyenne MM sd F1 c1	MM SD F1	c	1	IN	42,3283	37,7968	40,5133	54,2038	66,2145
Moyenne MM sd F1 c2	MM SD F1	c	2	L	23,4304	39,607	40,5133	51,4513	53,2855
Moyenne MM sd F1 c3	MM SD F1	c	3	IN	36,8929	26,1085	26,1085	57,885	72,7378
Moyenne MM sd F1 c4	MM SD F1	c	4	L	24,3223	27,8979	29,6905	44,1465	59,7304
Moyenne MM sd F2 a1	MM SD F2	a	1	IN	39,607	24,3223	20,7595	52,368	52,82665
Moyenne MM sd F2 a2	MM SD F2	a	2	L	32,3854	34,186	31,4863	47,7925	62,5045
Moyenne MM sd F2 a3	MM SD F2	a	3	IN	37,7968	31,4863	24,3223	62,5045	68,0743
Moyenne MM sd F2 a4	MM SD F2	a	4	L	27,0028	30,588	32,3854	65,2858	73,20525
Moyenne MM sd F2 b1	MM SD F2	b	1	IN	32,3854	31,4863	24,3223	47,7925	52,368
Moyenne MM sd F2 b2	MM SD F2	b	2	L	27,0028	28,7938	39,607	47,7925	59,7304
Moyenne MM sd F2 b3	MM SD F2	b	3	IN	27,8979	21,20415	24,3223	30,588	52,368
Moyenne MM sd F2 b4	MM SD F2	b	4	L	25,215	24,3223	27,0028	48,708	56,9635
Moyenne MM sd F2 c1	MM SD F2	c	1	IN	28,7938	23,4304	27,8979	41,4204	69,9373
Moyenne MM sd F2 c2	MM SD F2	c	2	L	22,5393	21,649	30,588	39,607	55,1229
Moyenne MM sd F2 c3	MM SD F2	c	3	IN	25,215	24,3223	22,5393	53,2855	66,2145
Moyenne MM sd F2 c4	MM SD F2	c	4	L	26,1085	31,4863	40,5133	53,2855	64,3578
Moyenne MS lb F1 a1	MS Lab F1	a	1	IN	56,9635	31,4863	48,708	64,82175	76,95205

Moyenne MS lb F1 a2	MS Lab F1 a	2L	35,0875	37,7968	73,6729	78,83025	74,14075
Moyenne MS lb F1 a3	MS Lab F1 a	3IN	42,3283	27,8979	45,9679	69,0054	73,6729
Moyenne MS lb F1 a4	MS Lab F1 a	4L	31,93575	31,4863	37,34475	35,9898	57,42415
Moyenne MS lb F1 b1	MS Lab F1 b	1IN	49,6203	37,57075	49,6203	67,60905	81,1825
Moyenne MS lb F1 b2	MS Lab F1 b	2L	46,8798	28,34575	40,96675	65,75005	78,83025
Moyenne MS lb F1 b3	MS Lab F1 b	3IN	30,13915	44,60155	41,87425	57,42415	72,7378
Moyenne MS lb F1 b4	MS Lab F1 b	4L	47,33605	33,2853	27,0028	47,33605	72,7378
Moyenne MS lb F1 c1	MS Lab F1 c	1IN	36,44125	22,5393	24,3223	56,0428	66,2145
Moyenne MS lb F1 c2	MS Lab F1 c	2L	34,186	31,03705	35,9898	56,9635	66,2145
Moyenne MS lb F1 c3	MS Lab F1 c	3IN	25,66165	24,3223	23,87625	30,588	64,82175
Moyenne MS lb F1 c4	MS Lab F1 c	4L	35,9898	28,7938	25,66165	30,588	46,8798
Moyenne MS lb F2 a1	MS Lab F2 a	1IN	47,7925	32,83525	65,2858	59,7304	61,579
Moyenne MS lb F2 a2	MS Lab F2 a	2L	36,44125	30,588	62,5045	79,3003	70,87
Moyenne MS lb F2 a3	MS Lab F2 a	3IN	34,63665	29,24205	41,87425	68,0743	76,483
Moyenne MS lb F2 a4	MS Lab F2 a	4L	30,13915	35,9898	40,96675	75,07705	73,6729
Moyenne MS lb F2 b1	MS Lab F2 b	1IN	34,63665	26,1085	29,6905	52,388	56,9635
Moyenne MS lb F2 b2	MS Lab F2 b	2L	34,186	27,0028	28,7938	47,7925	64,3579
Moyenne MS lb F2 b3	MS Lab F2 b	3IN	37,34475	35,0875	40,06005	59,26875	60,19225
Moyenne MS lb F2 b4	MS Lab F2 b	4L	44,60155	31,93575	35,0875	33,73555	58,8073
Moyenne MS lb F2 c1	MS Lab F2 c	1IN	38,24905	33,2853	36,44125	69,9373	65,2858
Moyenne MS lb F2 c2	MS Lab F2 c	2L	44,60155	35,0875	36,8929	55,1229	68,0743
Moyenne MS lb F2 c3	MS Lab F2 c	3IN	59,28875	36,8929	39,607	51,90955	67,60905
Moyenne MS lb F2 c4	MS Lab F2 c	4L	34,186	37,7968	32,83525	38,7015	58,34605
Moyenne MS sd F1 a1	MS SD F1 a	1IN	41,87425	35,0875	41,4204	48,24915	53,2855
Moyenne MS sd F1 a2	MS SD F1 a	2L	41,87425	28,34575	30,13915	49,6203	58,34605
Moyenne MS sd F1 a3	MS SD F1 a	3IN	60,19225	41,4204	41,87425	60,6543	60,19225
Moyenne MS sd F1 a4	MS SD F1 a	4L	41,4204	32,83525	41,87425	66,87915	63,4308
Moyenne MS sd F1 b1	MS SD F1 b	1IN	31,4863	29,24205	35,9898	44,60155	49,6203
Moyenne MS sd F1 b2	MS SD F1 b	2L	29,6905	47,7925	48,24915	53,2855	64,3579
Moyenne MS sd F1 b3	MS SD F1 b	3IN	25,215	32,3854	41,4204	44,60155	44,60155
Moyenne MS sd F1 b4	MS SD F1 b	4L	48,706	42,3283	43,69165	54,2038	57,42415
Moyenne MS sd F1 c1	MS SD F1 c	1IN	68,0743	44,1465	37,34475	52,82665	76,96205
Moyenne MS sd F1 c2	MS SD F1 c	2L	48,706	39,607	42,78255	52,82665	80,241
Moyenne MS sd F1 c3	MS SD F1 c	3IN	42,3283	43,69165	62,96755	65,2858	61,579
Moyenne MS sd F1 c4	MS SD F1 c	4L	54,66325	45,9679	51,4513	62,04165	66,67915
Moyenne MS sd F2 a1	MS SD F2 a	1IN	54,66325	38,7015	44,60155	60,6543	77,4213
Moyenne MS sd F2 a2	MS SD F2 a	2L	50,07775	28,7938	43,69165	50,5354	59,7304
Moyenne MS sd F2 a3	MS SD F2 a	3IN	60,19225	42,78255	46,42375	59,7304	62,5045
Moyenne MS sd F2 a4	MS SD F2 a	4L	35,53855	38,9278	30,588	49,39165	46,8798
Moyenne MS sd F2 b1	MS SD F2 b	1IN	25,66165	44,1465	48,706	55,1229	56,9635
Moyenne MS sd F2 b2	MS SD F2 b	2L	35,53855	40,5133	43,69165	51,90955	53,74455
Moyenne MS sd F2 b3	MS SD F2 b	3IN	34,186	31,03705	35,9898	52,82665	59,26875
Moyenne MS sd F2 b4	MS SD F2 b	4L	34,186	42,78255	54,2038	50,99325	59,26875
Moyenne MS sd F2 c1	MS SD F2 c	1IN	51,4513	35,53855	34,63665	54,66325	67,144
Moyenne MS sd F2 c2	MS SD F2 c	2L	34,63665	40,5133	44,1465	62,5045	73,20525
Moyenne MS sd F2 c3	MS SD F2 c	3IN	38,7015	45,9679	47,33605	55,1229	58,34605
Moyenne MS sd F2 c4	MS SD F2 c	4L	40,96675	41,87425	46,8798	63,4308	69,9373

**Comparaison des fumures**

	systeme	prof.	fumure	moyenne	IC 10%		fumure	moyenne	IC 10%	
And	HSK SD	0	F2	33	3	a	F1	36	4	a
And	HSK SD	5	F2	43	7	a	F1	30	2	b
And	HSK SD	10	F2	45	5	a	F1	33	4	b
And	HSK SD	20	F2	43	4	a	F1	44	4	a
And	HSK SD	30	F2	43	8	a	F1	52	6	a
And	MMD SD	0	F2	31	3	a	F1	32	4	a
And	MMD SD	5	F2	33	5	a	F1	27	3	a
And	MMD SD	10	F2	47	8	a	F1	31	3	b
And	MMD SD	20	F2	50	9	a	F1	48	6	a
And	MMD SD	30	F2	35	8	a	F1	61	5	b
And	MS Lab	0	F2	41	6	a	F1	39	5	a
And	MS Lab	5	F2	37	6	a	F1	32	3	a
And	MS Lab	10	F2	52	7	a	F1	40	7	a
And	MS Lab	20	F2	60	9	a	F1	55	8	a
And	MS Lab	30	F2	47	6	a	F1	69	5	b
And	MS SD	0	F2	43	5	a	F1	45	7	a
And	MS SD	5	F2	46	4	a	F1	39	3	a
And	MS SD	10	F2	56	6	a	F1	43	4	b
And	MS SD	20	F2	50	8	a	F1	55	4	a
And	MS SD	30	F2	47	5	a	F1	61	5	b

Tableaux statistiques :

syst		moy	écartype	N	CV	IC 10%	syst	moy	écartype	N	CV	
HSK SD F2	0	32,96	5,152	12	15,63	2,67	MS SD F2	42,915	9,259	12	21,58	4,1
HSK SD F2	5	43,06	14,11	12	32,78	7,32	MS SD F2	45,994	7,614	12	16,55	3,5
HSK SD F2	10	44,716	9,338	12	20,88	4,84	MS SD F2	56,446	11,57	12	20,5	6
HSK SD F2	20	42,777	8,536	12	19,95	4,43	MS SD F2	49,702	15,14	12	30,47	7,5
HSK SD F2	30	43,42	15,65	12	36,05	8,11	MS SD F2	46,575	9,157	12	19,66	4,7
MMD SD F2	0	30,527	5,578	12	18,27	2,89	MS SD F2	42,915	9,259	12	21,58	4,1
MMD SD F2	5	32,995	10,25	12	31,05	5,31	MS SD F2	45,994	7,614	12	16,55	3,5
MMD SD F2	10	47,064	15,67	12	33,3	8,13	MS SD F2	56,446	11,57	12	20,5	6
MMD SD F2	20	49,755	17,51	12	35,19	9,08	MS SD F2	49,702	15,14	12	30,47	7,5
MMD SD F2	30	35,415	15,08	12	42,59	7,82	MS SD F2	46,575	9,157	12	19,66	4,7
MS Lab F2	0	40,691	12,12	12	29,78	6,28	MS SD F2	42,915	9,259	12	21,58	4,1
MS Lab F2	5	37,244	10,62	12	28,51	5,51	MS SD F2	45,994	7,614	12	16,55	3,5
MS Lab F2	10	51,73	14,2	12	27,45	7,36	MS SD F2	56,446	11,57	12	20,5	6
MS Lab F2	20	59,63	17,33	12	29,06	8,98	MS SD F2	49,702	15,14	12	30,47	7,5
MS Lab F2	30	46,641	12,16	12	26,07	6,3	MS SD F2	46,575	9,157	12	19,66	4,7
HSK SD F1	0	36,167	7,687	12	21,25	3,99	MS SD F1	44,519	12,54	12	28,16	6,5
HSK SD F1	5	29,997	4,043	12	13,48	2,1	MS SD F1	38,571	6,71	12	17,4	3,5
HSK SD F1	10	32,856	6,83	12	20,79	3,54	MS SD F1	43,267	8,265	12	19,1	4,5
HSK SD F1	20	44,325	7,819	12	17,64	4,05	MS SD F1	54,573	7,54	12	13,82	3,5
HSK SD F1	30	52,345	11,17	12	21,34	5,79	MS SD F1	61,392	10,23	12	16,66	5,5
MMD SD F1	0	31,809	7,187	12	22,59	3,73	MS SD F1	44,519	12,54	12	28,16	6,5
MMD SD F1	5	27,353	5,748	12	21,01	2,98	MS SD F1	38,571	6,71	12	17,4	3,5
MMD SD F1	10	30,533	6,683	12	21,89	3,47	MS SD F1	43,267	8,265	12	19,1	4,5
MMD SD F1	20	47,999	11,12	12	23,16	5,76	MS SD F1	54,573	7,54	12	13,82	3,5
MMD SD F1	30	60,893	10,33	12	16,97	5,36	MS SD F1	61,392	10,23	12	16,66	5,5
MS Lab F1	0	39,381	9,229	12	23,43	4,78	MS SD F1	44,519	12,54	12	28,16	6,5
MS Lab F1	5	31,597	6,131	12	19,4	3,18	MS SD F1	38,571	6,71	12	17,4	3,5
MS Lab F1	10	39,584	14,28	12	36,08	7,4	MS SD F1	43,267	8,265	12	19,1	4,5
MS Lab F1	20	55,079	15,83	12	28,75	8,21	MS SD F1	54,573	7,54	12	13,82	3,5
MS Lab F1	30	69,317	9,721	12	14,02	5,04	MS SD F1	61,392	10,23	12	16,66	5,5
HSK SD F1	0	36,167	7,687	12	21,25	3,99	MMD SD F1	31,809	7,187	12	22,59	3,5
HSK SD F1	5	29,997	4,043	12	13,48	2,1	MMD SD F1	27,353	5,748	12	21,01	3
HSK SD F1	10	32,856	6,83	12	20,79	3,54	MMD SD F1	30,533	6,683	12	21,89	3,5
HSK SD F1	20	44,325	7,819	12	17,64	4,05	MMD SD F1	47,999	11,12	12	23,16	5,5
HSK SD F1	30	52,345	11,17	12	21,34	5,79	MMD SD F1	60,893	10,33	12	16,97	5,5

**ANNEXE VIII : Données brutes et tableaux statistiques des densités apparentes Bemasoandro**

site	syst		prof		moy	écartype		moy	écartype
Bem	MP LB	T	0	F2	0,954	0,094	F1	0,962	0,065
Bem	MP LB	T	5	F2	0,890	0,073	F1	0,909	0,057
Bem	MP LB	T	10	F2	0,882	0,056	F1	0,926	0,061
Bem	MP LB	T	20	F2	0,907	0,083	F1	0,945	0,064
Bem	MP LB	T	30	F2	0,922	0,064	F1	0,994	0,052
Bem	MP SD	T	0	F2	0,848	0,077	F1	0,903	0,056
Bem	MP SD	T	5	F2	0,822	0,063	F1	0,887	0,084
Bem	MP SD	T	10	F2	0,885	0,067	F1	0,861	0,089
Bem	MP SD	T	20	F2	0,881	0,095	F1	0,940	0,081
Bem	MP SD	T	30	F2	0,921	0,098	F1	0,985	0,050
Bem	RS LB	T	0	F2	0,802	0,067	F1	0,893	0,140
Bem	RS LB	T	5	F2	0,810	0,088	F1	0,877	0,060
Bem	RS LB	T	10	F2	0,859	0,098	F1	0,850	0,099
Bem	RS LB	T	20	F2	0,897	0,082	F1	0,891	0,116
Bem	RS LB	T	30	F2	0,918	0,066	F1	0,922	0,093
Bem	RS SD	T	0	F2	0,800	0,040	F1	0,866	0,061
Bem	RS SD	T	5	F2	0,896	0,055	F1	0,884	0,177
Bem	RS SD	T	10	F2	0,881	0,047	F1	0,956	0,058
Bem	RS SD	T	20	F2	0,915	0,074	F1	1,013	0,090
Bem	RS SD	T	30	F2	0,924	0,079	F1	1,031	0,045
Bem	MP LB	L	0	F2	0,903	0,074	F1	0,932	0,060
Bem	MP LB	L	5	F2	0,888	0,062	F1	0,912	0,067
Bem	MP LB	L	10	F2	0,891	0,056	F1	0,938	0,042
Bem	MP LB	L	20	F2	0,869	0,071	F1	0,959	0,059
Bem	MP LB	L	30	F2	0,894	0,057	F1	1,024	0,042
Bem	MP SD	L	0	F2	0,808	0,063	F1	0,920	0,068
Bem	MP SD	L	5	F2	0,803	0,029	F1	0,877	0,049
Bem	MP SD	L	10	F2	0,851	0,072	F1	0,834	0,096
Bem	MP SD	L	20	F2	0,915	0,072	F1	0,935	0,109
Bem	MP SD	L	30	F2	0,913	0,102	F1	0,984	0,065
Bem	RS LB	L	0	F2	0,775	0,043	F1	0,868	0,081
Bem	RS LB	L	5	F2	0,765	0,075	F1	0,851	0,045
Bem	RS LB	L	10	F2	0,841	0,079	F1	0,814	0,020
Bem	RS LB	L	20	F2	0,902	0,062	F1	0,874	0,138
Bem	RS LB	L	30	F2	0,899	0,076	F1	0,906	0,120
Bem	RS SD	L	0	F2	0,805	0,041	F1	0,843	0,068
Bem	RS SD	L	5	F2	0,891	0,038	F1	0,815	0,225
Bem	RS SD	L	10	F2	0,889	0,035	F1	0,944	0,065
Bem	RS SD	L	20	F2	0,942	0,073	F1	0,998	0,081
Bem	RS SD	L	30	F2	0,948	0,074	F1	1,018	0,053
Bem	MP LB	IN	0	F2	1,005	0,087	F1	0,993	0,058
Bem	MP LB	IN	5	F2	0,892	0,088	F1	0,907	0,050
Bem	MP LB	IN	10	F2	0,872	0,060	F1	0,913	0,078
Bem	MP LB	IN	20	F2	0,944	0,082	F1	0,932	0,072
Bem	MP LB	IN	30	F2	0,950	0,061	F1	0,964	0,045

Bem	MP SD	IN	0	F2	0,887	0,074	F1	0,885	0,040
Bem	MP SD	IN	5	F2	0,845	0,087	F1	0,896	0,114
Bem	MP SD	IN	10	F2	0,919	0,043	F1	0,889	0,081
Bem	MP SD	IN	20	F2	0,840	0,111	F1	0,945	0,051
Bem	MP SD	IN	30	F2	0,930	0,103	F1	0,985	0,036
Bem	RS LB	IN	0	F2	0,829	0,081	F1	0,919	0,187
Bem	RS LB	IN	5	F2	0,883	0,076	F1	0,902	0,066
Bem	RS LB	IN	10	F2	0,876	0,119	F1	0,886	0,134
Bem	RS LB	IN	20	F2	0,891	0,104	F1	0,909	0,098
Bem	RS LB	IN	30	F2	0,936	0,054	F1	0,938	0,064
Bem	RS SD	IN	0	F2	0,794	0,041	F1	0,889	0,048
Bem	RS SD	IN	5	F2	0,901	0,071	F1	0,953	0,082
Bem	RS SD	IN	10	F2	0,873	0,060	F1	0,968	0,052
Bem	RS SD	IN	20	F2	0,889	0,070	F1	1,028	0,104
Bem	RS SD	IN	30	F2	0,900	0,084	F1	1,045	0,036

Valeurs moyennes des densités apparentes en RS F1 (après analyses statistiques) par profondeur

Profondeur (cm)/système	RS SD	RS LB
0-5	0,86	0,89 (b)
5-10	0,87	0,88 (b)
10-20	0,95	0,85 (a)
20-30	1,01	0,85 (b)
30-40	1,02	0,92 (a)

Note:

(a) indique que les systèmes des autres colonnes sont significativement différents par rapport à la première colonne.

(b) indique que les systèmes des autres colonnes ne sont pas significativement différents par rapport à la première colonne.

Valeurs moyennes des densités apparentes en RS F2 (après analyses statistiques) par profondeur

Profondeur (cm)/système	RS SD	RS LB
0-5	0,782	0,781 (b)
5-10	0,90	0,79 (a)
10-20	0,88	0,86 (b)
20-30	0,92	0,9 (b)
30-40	0,92	0,92 (b)

Valeurs moyennes des densités apparentes en MP F1 (après analyses statistiques) par profondeur

Profondeur (cm)/système	MP SD	MP LB
0-5	0,9	0,97 (b)
5-10	0,89	0,91 (b)
10-20	0,85	0,93 (b)
20-30	1,7	0,95 (b)
30-40	0,97	0,99 (b)

Valeurs moyennes des densités apparentes en MP F2(après analyses statistiques) par profondeur

Profondeur (cm) système	MP SD	MP LB
0-5	0.85	0.95 (a)
5-10	0.8	0.89 (b)
10-20	0.89	0.88 (b)
20-30	0.86	0.90 (b)
30-40	0.92	0.92 (b)

Comparaison F1/F2, système RS

Profondeur/système	RS SD F2		RS SD F1	
	m	e	m	e
0-5	0.78 a	0.07	0.86 (a)	0.06
5-10	0.90 a	0.05	0.87 (b)	0.17
10-20	0.88 a	0.05	0.95 (a)	0.06
20-30	0.91 a	0.07	1.01 (a)	0.09
30-40	0.92 a	0.07	1.02 (a)	0.05

Profondeur/système	RS LB F2		RS LB F1	
	m	e	m	e
0-5	0.78	0.08	0.89 (a)	0.14
5-10	0.79	0.11	0.88 (b)	0.06
10-20	0.86	0.10	0.85 (b)	0.08
20-30	0.90	0.08	0.90 (b)	0.11
30-40	0.90	0.06	0.90 (b)	1.00

Valeurs moyennes des densités apparentes comparant l'effet de fumure à Bemasoandro (après analyses statistiques) par profondeur

Profondeur/système	MP SD F2		MP SD F1	
	m	e	m	e
0-5	0.80	0.07	0.90 (b)	0.05
5-10	0.80	0.09	0.90 (b)	0.08
10-20	0.90	0.07	0.90 (b)	0.08
20-30	0.90	0.11	1.70 (b)	2.62
30-40	0.90	0.09	0.97 (b)	0.06

Profondeur/système	MP LB F2		MP LB F1	
	m	e	m	e
0-5	0.95	0.09	0.97 (b)	0.07
5-10	0.89	0.07	0.90 (b)	0.05
10-20	0.88	0.06	0.93 (b)	0.06
20-30	0.90	0.08	0.94 (b)	0.07
30-40	0.92	0.06	0.99 (a)	0.06

ANNEXE IX : Données brutes des densités apparentes Andranomanelatra

site	syst			prof	moy	écartype		moy	écartype
And	HSK SD	F1	T	0	0,806	0,082	F2	0,767	0,084
And	HSK SD	F1	T	5	0,812	0,074	F2	0,858	0,112
And	HSK SD	F1	T	10	0,864	0,078	F2	0,886	0,056
And	HSK SD	F1	T	20	0,945	0,080	F2	0,982	0,054
And	HSK SD	F1	T	30	1,018	0,090	F2	1,038	0,083
And	MMD SD	F1	T	0	0,760	0,065	F2	0,714	0,068
And	MMD SD	F1	T	5	0,770	0,051	F2	0,779	0,090
And	MMD SD	F1	T	10	0,795	0,034	F2	0,775	0,080
And	MMD SD	F1	T	20	0,945	0,078	F2	0,919	0,096
And	MMD SD	F1	T	30	0,970	0,066	F2	1,011	0,082
And	MS LB	F1	T	0	0,909	0,065	F2	0,889	0,051
And	MS LB	F1	T	5	0,795	0,100	F2	0,867	0,122
And	MS LB	F1	T	10	0,831	0,106	F2	0,866	0,073
And	MS LB	F1	T	20	0,871	0,112	F2	0,919	0,070
And	MS LB	F1	T	30	0,922	0,094	F2	0,976	0,062
And	MS SD	F1	T	0	0,805	0,076	F2	0,777	0,089
And	MS SD	F1	T	5	0,788	0,089	F2	0,862	0,057
And	MS SD	F1	T	10	0,740	0,224	F2	0,837	0,082
And	MS SD	F1	T	20	0,906	0,069	F2	0,953	0,049
And	MS SD	F1	T	30	0,927	0,066	F2	1,002	0,085
And	HSK SD	F1	L	0	0,791	0,080	F2	0,768	0,098
And	HSK SD	F1	L	5	0,813	0,082	F2	0,918	0,118
And	HSK SD	F1	L	10	0,879	0,095	F2	0,904	0,055
And	HSK SD	F1	L	20	0,956	0,108	F2	0,982	0,022
And	HSK SD	F1	L	30	1,035	0,114	F2	1,049	0,099
And	MMD SD	F1	L	0	0,733	0,055	F2	0,893	0,069
And	MMD SD	F1	L	5	0,770	0,049	F2	0,776	0,096
And	MMD SD	F1	L	10	0,806	0,036	F2	0,792	0,108
And	MMD SD	F1	L	20	0,933	0,027	F2	0,945	0,122
And	MMD SD	F1	L	30	0,969	0,088	F2	1,032	0,090
And	MS LB	F1	L	0	0,910	0,047	F2	0,885	0,067
And	MS LB	F1	L	5	0,806	0,088	F2	0,874	0,121
And	MS LB	F1	L	10	0,850	0,065	F2	0,878	0,075
And	MS LB	F1	L	20	0,843	0,092	F2	0,902	0,092
And	MS LB	F1	L	30	0,916	0,083	F2	1,001	0,057
And	MS SD	F1	L	0	0,813	0,047	F2	0,817	0,071
And	MS SD	F1	L	5	0,800	0,077	F2	0,846	0,054
And	MS SD	F1	L	10	0,783	0,168	F2	0,811	0,111
And	MS SD	F1	L	20	0,915	0,036	F2	0,967	0,045
And	MS SD	F1	L	30	0,914	0,067	F2	1,036	0,102
And	HSK SD	F1	IN	0	0,820	0,090	F2	0,765	0,077
And	HSK SD	F1	IN	5	0,812	0,073	F2	0,799	0,073
And	HSK SD	F1	IN	10	0,850	0,061	F2	0,869	0,055
And	HSK SD	F1	IN	20	0,935	0,046	F2	0,981	0,077
And	HSK SD	F1	IN	30	1,000	0,065	F2	1,028	0,071
And	MMD SD	F1	IN	0	0,786	0,067	F2	0,734	0,068

And	MMD SD	F1	IN	5	0,770	0,058	F2	0,782	0,092
And	MMD SD	F1	IN	10	0,783	0,033	F2	0,758	0,043
And	MMD SD	F1	IN	20	0,956	0,110	F2	0,893	0,063
And	MMD SD	F1	IN	30	0,971	0,044	F2	0,990	0,075
And	MS LB	F1	IN	0	0,907	0,084	F2	0,894	0,036
And	MS LB	F1	IN	5	0,784	0,118	F2	0,860	0,133
And	MS LB	F1	IN	10	0,811	0,139	F2	0,854	0,075
And	MS LB	F1	IN	20	0,899	0,131	F2	0,937	0,040
And	MS LB	F1	IN	30	0,927	0,113	F2	0,951	0,060
And	MS SD	F1	IN	0	0,798	0,101	F2	0,736	0,091
And	MS SD	F1	IN	5	0,777	0,107	F2	0,877	0,060
And	MS SD	F1	IN	10	0,697	0,278	F2	0,863	0,030
And	MS SD	F1	IN	20	0,896	0,095	F2	0,939	0,053
And	MS SD	F1	IN	30	0,941	0,068	F2	0,968	0,052

### Tableaux statistiques

Valeurs moyennes des densités apparentes en F1 à Andranomanelatra (après analyses statistiques) par profondeur

Profondeur/système	MS SD		MS LB		HSK		MMD	
	m	e	m	e	m	e	m	e
0-5	0.80 (a)	0.08	0.9 (a)	0.06	0.80 (b)	0.08	0.76 (b)	0.06
5-10	0.79 (a)	0.09	0.79 (b)	0.10	0.81 (b)	0.07	0.77 (b)	0.05
10-20	0.74 (a)	0.22	0.83 (b)	0.10	0.86 (b)	0.08	0.79 (b)	0.03
20-30	0.90 (a)	0.07	0.87 (b)	0.11	0.94 (b)	0.08	0.94 (b)	0.08
30-40	0.93 (a)	0.07	0.92 (b)	0.09	1.01 (a)	0.09	0.97 (b)	0.07

Profondeur/système	MS LB	HSK	MMD
0-5	0.9 (a)	0.80(a)	0.76 (b)
5-10	0.79 (a)	0.81 (b)	0.77 (a)
10-20	0.83 (a)	0.86 (b)	0.79 (a)
20-30	0.87 (a)	0.94 (b)	0.94 (b)
30-40	0.92 (a)	1.01 (b)	0.97 (b)

Profondeur/système	HS SD	MM SD
0-5	0.8 (a)	0.76 (b)
5-10	0.81 (a)	0.77 (a)
10-20	0.86 (a)	0.79 (a)
20-30	0.94 (a)	0.94 (b)
30-40	1.01 (a)	0.97 (b)

Note: -m: valeur moyenne (moyenne)  
-e: écart-type

Valeurs moyennes des densités apparentes en F2 à Andranomanelatra (après analyses statistiques) par profondeur

Profondeur/système	MS SD		MS LB		HSK		MMD	
	m	e	m	e	m	e	m	e
0-5	0.78 a	0.09	0.89 (a)	0.05	0.77 (b)	0.08	0.71 (b)	0.06
5-10	0.86 a	0.06	0.87 (b)	0.12	0.86 (b)	0.11	0.78(a)	0.09
10-20	0.84 a	0.08	0.87 (b)	0.07	0.89 (b)	0.06	0.77 (b)	0.08
20-30	0.95 a	0.04	0.92 (b)	0.07	0.98 (b)	0.05	0.92 (b)	0.10
30-40	1.00 a	0.08	0.98 (b)	0.06	1.04 (b)	0.08	1.01 (b)	0.08

Profondeur/système	MS LB	HSK	MMD
0-5	0.89	0.77 (a)	0.71 (a)
5-10	0.87	0.86 (b)	0.78 (b)
10-20	0.87	0.89(b)	0.77 (a)
20-30	0.92	0.98 (b)	0.92 (b)
30-40	0.98	1.04 (b)	1.01 (b)

Profondeur/système	HS SD	MM SD
0-5	0.77	0.71 (b)
5-10	0.86	0.78 (b)
10-20	0.89	0.77 (a)
20-30	0.98	0.92 (b)
30-40	1.04	1.01 (b)

Valeurs moyennes des densités apparentes comparant l'effet de fumure à Andranomanelatra(après analyses statistiques) par profondeur

Profondeur (cm)système	MS SD F2		MS SD F1	
	m	e	m	e
0-5	0.78	0.09	0.8 (b)	0.07
5-10	0.86	0.06	0.79 (b)	0.09
10-20	0.84	0.08	0.74 (b)	0.22
20-30	0.95	0.05	0.90 (b)	0.07
30-40	1.00	0.08	0.92 (b)	0.06

Profondeur (cm)système	MS LB F2		MS LB F1	
	m	e	M	e
0-5	0.98	0.05	0.80 (b)	0.07
5-10	0.87	0.12	0.79 (b)	0.09
10-20	0.87	0.07	0.83 (b)	0.10
20-30	0.91	0.07	0.87 (b)	0.11
30-40	0.98	0.06	0.92 (b)	0.09

Profondeur (cm)système	HSK F2		HSK F1	
	m	e	m	e
0-5	0.77	0.08	0.80 (b)	0.08
5-10	0.86	0.11	0.81 (b)	0.07
10-20	0.89	0.05	0.86 (b)	0.08
20-30	0.98	0.05	0.95 (b)	0.08
30-40	1.03	0.08	1.01 (b)	0.09

Profondeur (cm) système	MMD F2		MMD F1	
	m	e	m	e
0-5	0.77	0.08	0.80 (b)	0.07
5-10	0.78	0.08	0.77 (b)	0.05
10-20	0.77	0.08	0.79 (b)	0.03
20-30	0.92	0.097	0.94 (b)	0.078
30-40	1.01	0.08	0.92 (b)	0.07

**ANNEXE X : Données brutes des pF**

Echantillon	M-S/Lab/F2C	M-S/Lab/F2A	M-S/SD/F2B	M-S/SD/F2A
Répétitions	3	1	3	2
volume intrude(cc/g)	0,4727	0,4460	0,4064	0,4536
surf tot pores (m2/g)	36,12	36,68	22,70	35,63
diam med pore (vol) micm	7,56	6,27	16,44	5,81
diam med por(surf) micm	0,012	0,011	0,017	0,012
diam moy (4V/A)	0,053	0,049	0,130	0,051
densite app (g/cc)	1,11	1,16	1,17	1,08
densite des solides (g/cc)	2,34	2,41	2,25	2,12
Porosité	0,5248	0,5181	0,4788	0,4903

### ANNEXE XI : Données densités réelles et porosités

Parcelle(MS)	1ère répétition	2ème répétition	3ème répétition	4ème répétition	5ème répétition	moyenne	ecartype
lb c 5-10	2,84	2,91	2,69	2,78	2,77	2,80	0,08
lb a 50-60	2,93	2,92	2,89	2,85	2,79	2,87	0,05
lb a 30-40	2,83	2,87	2,84	2,78	2,75	2,81	0,04
lb c 30-40	2,78	2,96	2,91	2,81	2,82	2,86	0,07
lb c 10-20	2,93	3,06	2,96	2,96	2,95	2,97	0,05
lb a 10-20	2,88	2,99	2,98	2,93	2,90	2,94	0,04
sd a 125-135	2,87	3,01	2,86	2,81	2,92	2,89	0,07
lb a 20-30	2,76	2,83	2,89	2,83	2,70	2,80	0,07
sd a 100-110	2,80	2,92	2,90	2,83	2,70	2,83	0,08
sd a 30-40	2,70	2,90	2,74	2,75	2,73	2,76	0,07
lb a 5-10	2,74	2,85	2,75	2,78	2,75	2,77	0,04
lb c 20-30	2,79	2,94	2,84	2,89	2,90	2,87	0,05
lb c 50-60	2,82	2,97	2,90	2,86	2,71	2,85	0,09
sd a 70-80	2,75	2,79	2,88	2,77	2,72	2,78	0,06
sd a 0-5	2,87	2,74	2,68	2,71	2,30	2,62	0,16
lb a 0-5	2,68	2,80	2,79	2,77	2,62	2,73	0,07
sd a 50-60	2,93	2,91	2,85	2,88	2,85	2,89	0,03
sd a 20-30	2,72	2,94	2,80	2,80	2,57	2,77	0,12
lb a 70-80	2,82	2,81	2,75	2,71	2,83	2,78	0,05
lb c 70-80	2,77	2,71	2,81	2,73	2,67	2,74	0,05
lb c 0-5	2,58	2,81	2,54	2,58	2,76	2,61	0,07
sd a 5-10	2,67	2,68	2,75	2,62	2,66	2,68	0,04
sd a 10-20	2,64	2,66	2,68	2,62	2,80	2,68	0,08

### HUMIDITE

Référence	sol	Tare	T+sol	T+sol sec	humidité
lb c 5-10	1	13,763	18,326	18,119	4,75
lb a 50-60	2	13,873	18,024	17,817	6,26
lb a 30-40	3	13,83	18,574	18,35	4,96
lb c 30-40	4	13,715	19,478	19,261	3,91
lb c 10-20	5	13,766	18,914	18,542	7,79
lb a 10-20	6	13,997	18,295	18,022	6,78
sd a 125-135	7	13,946	19,987	19,656	5,80
lb a 20-30	8	13,794	18,172	17,987	4,41
sd a 100-110	9	13,897	18,811	18,593	4,64
sd a 30-40	10	13,789	18,754	18,566	3,94
lb a 5-10	11	13,88	19,565	19,325	4,41
lb c 20-30	12	13,569	18,944	18,686	5,04
lb c 50-60	13	13,702	19,377	19,15	4,17
sd a 70-80	14	13,61	19,854	19,597	4,29
sd a 0-5	15	13,574	18,836	18,653	3,60
lb a 0-5	16	14,041	18,02	17,873	3,84
sd a 50-60	17	13,792	18,66	18,41	6,41
sd a 20-30	18	13,844	18,755	18,573	3,86
lb a 70-80	19	13,795	18,516	18,287	5,10
lb c 70-80	20	13,805	20,663	20,379	4,32
lb c 0-5	21	16,289	22,086	21,895	3,41
sd a 5-10	22	16,348	21,475	21,297	3,60
sd a 10-20	23	16,927	21,828	21,636	4,08

tableau des résultats densités sèches sur échantillons provenant des fosses sur maïs-soja

	ds1	ds2	ds3	ds4	moy	écartype	CV
<b>MS LB F2 fosse 1</b>							
lb a 0-5	2,68	2,80	2,79	2,77	2,76	0,05	1,91
lb a 5-10	2,74	2,85	2,75	2,79	2,78	0,06	1,79
lb a 10-20	2,88	2,99	2,98	2,93	2,94	0,05	1,73
lb a 20-30	2,76	2,83	2,89	2,83	2,83	0,05	1,93
lb a 30-40	2,83	2,87	2,84	2,78	2,83	0,04	1,33
lb a 50-60	2,93	2,92	2,89	2,85	2,90	0,04	1,27
lb a 70-80	2,82	2,81	2,75	2,71	2,77	0,05	1,82
<b>MS LB F2 fosse 2</b>							
lb c 0-5	2,58	2,61	2,54	2,58	2,58	0,03	1,25
lb c 5-10	2,84	2,91	2,69	2,78	2,81	0,10	3,42
lb c 10-20	2,93	3,06	2,96	2,96	2,98	0,06	1,89
lb c 20-30	2,79	2,94	2,84	2,89	2,87	0,07	2,28
lb c 30-40	2,78	2,96	2,91	2,81	2,86	0,09	3,09
lb c 50-60	2,82	2,97	2,90	2,86	2,89	0,07	2,28
lb c 70-80	2,77	2,71	2,81	2,73	2,76	0,04	1,55
<b>MS SD F2 fosse 1</b>							
sd a 0-5	2,67	2,74	2,68	2,71	2,70	0,03	1,16
sd a 5-10	2,67	2,68	2,75	2,62	2,68	0,06	2,08
sd a 10-20	2,64	2,66	2,68	2,62	2,65	0,03	1,03
sd a 20-30	2,72	2,94	2,80	2,80	2,81	0,09	3,26
sd a 30-40	2,70	2,90	2,74	2,75	2,77	0,09	3,14
sd a 50-60	2,93	2,91	2,85	2,88	2,89	0,04	1,28
sd a 70-80	2,75	2,79	2,88	2,77	2,80	0,06	2,04
sd a 100-110	2,80	2,92	2,90	2,83	2,86	0,05	1,90
sd a 125-135	2,87	3,01	2,86	2,81	2,89	0,08	2,92

Tableau présentant résultats porosimétrie

	MS LB F2 f2	MS LB F2 f1	MS SD F2 f2	MS SD F2 f1
répétitions (nbr mottes)	3	1	3	2
densité apparente sur motte	1,11	1,16	1,17	1,08
densité des solides sur motte	2,34	2,41	2,25	2,12
porosité > 0.006µm	0,5248	0,5181	0,4788	0,4903
porosité totale	0,5800	0,5616	0,5569	0,5928
<b>répartition de la porosité</b>				
<0.006µm	0,0552	0,0434	0,0781	0,1025
0.1 - 0.006µm	0,1382	0,1379	0,1019	0,1300
0.1-10µm	0,1515	0,1440	0,1127	0,1348
10-400µm	0,2413	0,2367	0,2628	0,2250
<b>distribution de la porosité</b>				
<0.006µm	9,4	7,7	14,1	17,3
0.1 - 0.006µm	23,6	24,5	18,3	21,9
0.1-10µm	25,8	25,6	20,3	22,8
10-400µm	41,2	42,1	47,3	38,0

## RESUME :

A Madagascar, surtout sur les Hautes Terres, la pression démographique devient de plus en plus importante. En conséquence, la mise en culture des collines aux sols fragiles et peu fertiles s'accélère, avec des fumures limitées, de faibles rendements, et l'érosion qui ensable les rizières. Il est impératif de trouver d'autres alternatives pour assurer la production, surtout rizicole : la diffusion et la pratique des systèmes de culture durables tels que les SCV.

Il est alors nécessaire de connaître le fonctionnement des systèmes SCV et c'est la raison pour laquelle notre étude a été basée sur les caractéristiques physiques du sol sous SCV en comparaison avec des systèmes labourés, dans la région du Vakinankaratra.

Nous avons employé des méthodes très classiques (densités au cylindre, densités sèches, courbes pF) et moins classiques (pénétrométrie, porosité au mercure). Faut de temps les résultats sont encore incomplets (porosimétrie et pF) pour pouvoir avoir une vision d'ensemble. Il faudrait aussi les mettre en relation avec des données de rendements, biomasses et profils racinaires, et des analyses chimiques et granulométriques. Par ailleurs il faudrait analyser plus finement les données de pénétrométrie, certainement en tenant compte des humidités, car pour le moment cela ne semble pas être un bon outil de caractérisation.

Cependant, nos résultats permettent de constater des choses importantes en ce qui concerne la porosité : il n'y a pas de différences nettes entre le SD et le système labouré, ni entre les niveaux de fumures, ni entre les traitements en SD même si les couvertures vives se distinguent un peu. Enfin, au delà de 40 cm de profondeur, on ne constate pas d'effet des systèmes sur la porosité. Ainsi les résultats de densités apparentes indiquent bien la capacité des systèmes en SD à maintenir ou améliorer la porosité, par la protection du sol, et les activités racinaires et biologiques : ils révèlent la force (cas de maïs sur *Desmodium*) ou la relative faiblesse (cas de riz-soja avec F1) de certains systèmes.

Ces résultats sont un peu surprenants car on s'attendait à des différences plus marquées entre traitements et fumures. Cela s'explique sans doute par la nature très argileuse des sols. Il nous faudra des analyses complémentaires (matière organique, Fer...) pour bien approfondir.

Cette étude a donc permis d'acquérir des informations précises qui n'existaient pas encore sur les sols de la région, et qui seront utiles pour la compréhension des performances des systèmes, de leur bilan hydrique, des phénomènes de ruissellement et d'érosion.

On peut suggérer que pour les prochaines études il faut terminer les analyses en cours et les compléter : granulométrie, analyses chimiques, observations racinaires, biomasses, etc. Il faudrait aussi poursuivre sur d'autres systèmes et ajouter l'étude d'autres propriétés physiques comme les caractéristiques d'infiltration ou les tests de stabilité structurale.

**Mots clés :** *Vakinankaratra, tanety, sol ferrallitique, semis-direct, caractéristiques physiques du sol, densités apparentes, densités sèches, porosité, porosimétrie mercure, pénétrométrie, courbes pF, réserve utile*