

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	1
1 MATERIELS ET METHODES .....	3
1.1. Problématique et hypothèses de recherche .....	3
1.2. Dispositifs expérimentaux.....	5
1.2.1 Site expérimental.....	5
1.2.2 Description du dispositif expérimental .....	7
1.2.2.1 Systèmes de culture étudiés .....	7
1.2.2.2 Humidimètre avec sonde .....	8
1.2.2.3 Micro-lots d'érosion .....	9
1.2.3 Mesures sur terrain.....	10
1.2.3.1 Mesures climatiques .....	10
1.2.3.2 Mesure des pentes.....	11
1.2.3.3 Relevé des états de surface de la parcelle.....	12
1.2.3.4 Mesures du ruissellement et des sédiments .....	12
1.2.3.5 Mesure de l'humidité du sol .....	13
1.2.4 Travaux au laboratoire .....	15
1.2.4.1 Mesure du taux d'humidité de pailis .....	15
1.2.4.2 Mesure des charges érodées .....	15
1.2.5 Traitements des données .....	15
2 RESULTATS ET DISCUSSION.....	17
2.1 Résultats .....	17
2.1.1 Relation entre la couverture du sol et l'érosion hydrique .....	17
2.1.1.1 Ruissellement.....	17
2.1.1.2 Pertes en terre .....	18
2.1.1.3 Turbidité .....	20
2.1.2 Relation entre la couverture du sol et l'humidité du sol .....	21
2.1.2.1 Humidité du sol .....	21
2.1.2.2 Relation entre le stock d'eau dans le sol - le ruissellement et la pluie .....	23
2.1.3 Les différents agents érosifs.....	23
2.1.3.1 Caractéristiques de la pluie.....	23
2.1.3.2 Couverture du sol.....	24
2.1.3.3 Croûte structurale .....	26
2.1.3.4 Construction faunique.....	28
2.2 Discussion .....	30
2.2.1 Importance de la couverture du sol sur le ruissellement et l'érosion.....	30

2.2.2	Importance de la couverture du sol sur l'humidité du sol.....	31
2.2.3	Importance des autres facteurs sur le ruissellement, la perte en terre et le maintien de l'eau dans le sol.....	31
2.2.3.1	Facteur climatique : la pluie .....	31
2.2.3.2	Facteur morphologique : la pente .....	32
2.2.3.3	Facteurs sol.....	33
2.2.4	Limites de travail.....	34
	CONCLUSION .....	35
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	37
	LISTE DES ANNEXES.....	42
	Annexe 1 : Caractéristique de la zone d'étude .....	i
	Annexe 2 : Caractéristique de <i>Stylosanthes guianensis</i> .....	vi
	Annexe 3 : Mesure de la pente à l'aide d'un clisimètre .....	vi
	Annexe 4 : Mesure de l'humidité du sol .....	vii
	Annexe 5 : Tableau de comparaison des moyennes du ruissellement, pertes en terre, turbidité, stock de l'eau dans le sol.....	viii
	Annexe 6 : Quantité de mulch (début et fin de la campagne de l'expérimentation).....	viii
	Annexe 7 : Comparaison de la quantité de ruissellement et des pertes en terre avec la précipitation au Lac Alaotra (sur la parcelle d'expérimentation au CALA) durant 3 ans .....	ix

## LISTE DES ACRONYMES

<b>ABACO</b>	: Agro-ecology Based Aggradation Conservation Agriculture
<b>AVSF</b>	: Agronomes et Vétérinaires Sans Frontières
<b>BRL</b>	: Bas Rhone Languedoc
<b>CALA</b>	: Complexe agronomique du Lac Alaotra
<b>CIRAD</b>	: Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
<b>CRR-ME</b>	: Centre régional de recherche du Moyen-Est
<b>CTFT</b>	: Centre technique forestier tropical
<b>dcd</b>	: décade
<b>FIDA</b>	: Fonds International de Développement Agricole
<b>FOFIFA</b>	: Foibem-pirenena momba ny fikarohana ampiarina ho fampanandrosoana ny ambanivohitra ou Centre national de recherche appliquée au développement dans le monde rural
<b>FTM</b>	: Foiben-Taotsaritanin'i Madagasikara
<b>Max</b>	: Maximum
<b>Min</b>	: Minimum
<b>ONE</b>	: Office National pour l'Environnement
<b>P</b>	: Précipitation
<b>P. terre</b>	: Pertes en terre
<b>Pds</b>	: Poids
<b>PRD</b>	: Plan Régional de Développement
<b>Ruis</b>	: Ruissellement
<b>SCV</b>	: Systèmes en semis direct sur couverture végétale permanente
<b>SCVm</b>	: Systèmes en semis direct sur couverture végétale permanente morte
<b>SCVv</b>	: Systèmes en semis direct sur couverture végétale permanente vivante
<b>SDMad</b>	: Semis Direct de Madagascar
<b>ST</b>	: Croûtes en surface
<b>T couv</b>	: Taux de couverture
<b>T</b>	: Température
<b>URP-SCRiD</b>	: Unité de recherche en partenariat sur les systèmes de culture et riziculture durable
<b>Wo</b>	: Constructions fauniques

## LISTES DES ILLUSTRATIONS

### LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Carte d'Alaotra.....	6
<b>Figure 2</b> : Plan de l'essai erosion.....	7
<b>Figure 3</b> : Mesure de pente .....	11
<b>Figure 4</b> : Ruissellement mesuré durant la campagne 2012-2013 : a) dynamique de ruissellement en fonction de la date des pluies – b) cumul de ruissellement en fonction de la pente et du taux de couverture .....	18
<b>Figure 5</b> : Pertes en terre mesurées durant la campagne 2012-2013 : a) dynamique de perte en fonction de la date des pluies – b) cumul des terres perdues en fonction de la pente et du taux de couverture.....	19
<b>Figure 6</b> : Turbidité en fonction de la pente et des taux de couverture du sol .....	20
<b>Figure 7</b> : Stock d'eau dans le sol : a) dynamique du stock d'eau dans le sol en fonction des précipitations – b) quantité moyenne des eaux stockées en fonction de la pente et des taux de couverture du sol.....	22
<b>Figure 8</b> : Relation entre la pluie moins le ruissellement total et le stock d'eau moyen sur le cycle .....	23
<b>Figure 9</b> : Répartition des pluies journalières durant la campagne 2012 – 2013 .....	24
<b>Figure 10</b> : Dégradation de la couverture du sol : a) relation entre les taux de couverture à l'état initial et à l'état final – b) comparaison de la quantité de couverture à l'état initial et à l'état final .....	25
<b>Figure 11</b> : Relation entre les taux de couverture du sol à l'état final et a) le ruissellement – b) les pertes en terre.....	26
<b>Figure 12</b> : Formation des croûtes structurales en surface au debut et à la fin de la campagne en fonction de la pente et des taux de couverture du sol.....	27
<b>Figure 13</b> : Relations entre les taux de ruissellement et les croûtes en surface.....	28
<b>Figure 14</b> : Pourcentage des surfaces présentant des constructions fauniques en fonction de la pente et des taux de couverture .....	29
<b>Figure 15</b> : Relation entre le taux de surface présentant des constructions fauniques et a) le taux de ruissellement – b) les pertes en terre .....	29

## LISTE DES CLICHES

<b>Cliché 1:</b> Humidimetre avec sonde theta : a) tube à enfoncer dans le sol – b) boîtier composant des capteurs d’humidité – c) sonde mise en place .....	9
<b>Cliché 2:</b> Micro-lots d’érosion : (a) cadre mis en place avec ses équipements – (b) fentes sur la face en aval du cadre .....	9
<b>Cliché 3 :</b> Station météorologique : a) station cimetière – b) pluviomètre à lecture directe .....	10
<b>Cliché 4:</b> Opérations des mesures de ruissellement et des sédiments : (a) mesure de ruissellement – (b) rinçage des fentes – (c) filtrage des échantillons .....	13
<b>Cliché 5:</b> Mesure de l’humidité du sol : a) capteur enfoncé dans le tube – b) appareil de lecture.....	14

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1:</b> Caractéristiques des systèmes étudiés .....	8
<b>Tableau 2:</b> Cadre opératoire de recherche .....	16
<b>Tableau 3:</b> Répartition des précipitations avec les jours des pluies .....	24

## INTRODUCTION

La Région Alaotra-Mangoro est l'une des zones les plus productrices en riz. La production oscille entre 250 000 t et 300 000 t par an dont 80 000 t sont exportées (FIDA, 2006). Mais par suite de la saturation de bas-fonds et pour subvenir aux besoins alimentaires de la population qui ne cesse d'augmenter, l'agriculture pluviale est actuellement en plein essor sur les collines environnantes (*Tanety*). La surface en riz pluvial croît régulièrement et couvre environ 70.000 ha actuellement. Les exploitants qui produisent du riz pluvial sont estimés à 67% du total des producteurs régionaux (Penot et al., 2010). L'agriculture pluviale tient ainsi une place importante dans le système de production surtout dans la région d'Alaotra avec de vastes plaines à l'irrigation aléatoire dont elle se présente comme une solution de recharge adéquate au repiquage tardif. Sous cette gestion, les plantes cultivées ne trouvent aucune source hydrique que celle des eaux des pluies. Vue la variabilité annuelle de la hauteur de la pluie, en cas d'excès d'eau, la culture pluviale en *tanety est* confrontée à des problèmes d'érosion hydrique (BeMartial et al., 1996, Ratsivalaka, 2007) et en périodes moins arrosées, l'insuffisance en eau entraîne des déficits hydriques pour les plantes cultivées. Par rapport à une telle situation, la gestion de l'eau des pluies sur les versants en pente constitue une des priorités locales.

Face à cela, il est primordial d'opter pour d'autres pratiques plus conservatrices de l'environnement agricole. Dans cette optique, les systèmes en semis direct sur couverture végétale permanente ou systèmes SCV ont été introduits et proposés à Madagascar vers le début des années quatre vingt dix comme une solution alternative pour protéger le sol de *tanety*. Ils ont été implantés au Lac Alaotra vers la fin des années 1990 afin d'intensifier la production agricole et de préserver les ressources naturelles de l'érosion hydrique (Chabierski et al., 2008). Les systèmes SCV visent à imiter le fonctionnement d'un écosystème naturel forestier et en particulier celui de sa litière. Ils sont basés sur trois principes fondamentaux : (i) minimiser la perturbation du sol, et donc absence du travail du sol, (ii) protéger le sol par une couverture végétale permanente, morte ou vivante, et (iii) adopter des associations et rotations culturales judicieuses (Séguy et al., 2009). Trois types de systèmes SCV existent tels que les systèmes en semis direct sur couverture végétale vivante ou SCVv, les systèmes en semis direct sur couverture végétale morte ou SCVm et les systèmes en semis direct sur couverture végétale mixte (Capillon & Séguy, 2002 ; AFD, 2007). Au Lac Alaotra, les deux premiers types de systèmes sont les plus pratiqués.

Pour appuyer l'introduction de ces systèmes, il est toujours nécessaire de vérifier s'ils constituent vraiment une meilleure solution pour répondre aux difficultés de l'agriculture précitées. Certes, pour une production agricole de qualité et de quantité, la protection et l'amélioration des ressources naturelles (sol, eau) sont les voies les plus efficaces pour

garantir le présent et assurer le futur. C'est ce qui justifie donc d'évaluer les effets des systèmes en semis direct sous couverture végétale permanente sur la dynamique de l'eau et ses conséquences tant sur la dégradation du sol que sur la production.

Cette étude consistera alors à quantifier les effets bénéfiques des systèmes avec paillis du sol sur le contrôle de l'érosion hydrique et la valorisation de l'eau afin d'améliorer la production du riz pluvial au Lac Alaotra face à la variabilité pluviométrique accentuée par le changement climatique. Ainsi, le présent manuscrit comporte deux parties bien distinctes pour mieux comprendre la relation entre les effets de la couverture végétale du sol sur la meilleure répartition d'eau de pluie tombée à la surface du sol. La première partie concerne les matériels et méthodes qui mettent en exergue le milieu d'étude et toutes les démarches méthodologiques adoptées pour éclaircir le travail entrepris; et la deuxième partie présente les résultats et la discussion afin de vérifier si les hypothèses de travail sont vraies ou fausses.

# 1 MATÉRIELS ET MÉTHODES

## 1.1. Problématique et hypothèses de recherche

### Problématique

Le changement climatique commence à se faire ressentir dans la Région du Lac Alaotra. En effet, les données des pluies recueillies durant dix ans (2002-2012), à la station météorologique du CRR-ME au sein du centre Ambohitsilaozana (Annexe 1) montre une nette variabilité annuelle de la pluviosité. Cette variabilité constitue un facteur limitant à la bonne pratique de la culture pluviale (Penot *et al.* 2010), surtout sur les terrains en pente. Lors de la saison des pluies bien arrosée, les risques d'érosion hydrique sont énormes. Les fortes pluies entraînent toujours des pertes en terre et en éléments nutritifs (FIDA, 2006; Ratsivalaka, 2007, Razafindramanana., 2011), de l'ensablement des terrains en bas de pente et des bas-fonds ainsi que la destruction des diverses infrastructures (routes, canaux, digues, ect.), cas fréquemment rencontrés dans la Région du Lac Alaotra. À l'opposé, en période des pluies aléatoires, les sols sont soumis à un risque élevé de déficit hydrique. Ces phénomènes pourraient porter atteintes à la qualité de la production et aux sécurités alimentaires de la population malgache. Face à ce contexte, la question qui se pose c'est de savoir comment gérer la répartition des eaux dans le sol afin d'améliorer ou au moins de stabiliser la production agricole ?

Différentes études ont été déjà faites pour lutter contre l'érosion hydrique et pour rationaliser la gestion de l'eau de pluie au Lac Alaotra. Depuis 1949, la création de bureau des sols constitue la première approche étatique effective pour la lutte antiérosive dans la région (BeMartial *et al.*, 1996). De ce fait, d'importants travaux d'aménagement et d'équipement sont entrepris pour atténuer l'érosion et résoudre le problème d'insuffisance d'eau tel que la construction de barrages pour l'irrigation, la mise en place de diverses essences de reboisement, en occurrence « *Eucalyptus robusta* », « *Acacia dealbata* » et « *Grevillea banksii* » etc. À partir des années quatre vingt dix, le plan régional de développement ou PRD intègre des actions pilotes en sylviculture et en agroforesterie, après le Centre technique forestier tropical ou CTFT a fait des mesures du ruissellement et des pertes en terre en fonction des traitements antiérosifs à préconiser dans les périmètres de restauration, en 1969. Mais les résultats de ces interventions restent cependant mal exploités et peu diffusés (Tassin J., 1995). En fait, les solutions déjà prises demandent beaucoup d'investissements qui ne pourraient pas être à la portée de la population locale, telles que l'entretien des barrages et des canaux d'évacuation d'eau. 40 % des réseaux hydro-agricoles sont donc vétustes et non entretenus (FIDA, 2006). Ce qui fait que l'érosion hydrique et le problème de gestion de l'eau reste encore et toujours pour l'agriculture pluviale.

Pour pallier en partie ces lacunes, cette étude se propose de s'investir sur une technique culturale innovatrice et respectueuse de l'environnement, dénommée systèmes SCV. Les résultats des recherches entreprises par Ravalisoa (2012), Laingo (2011) sur le même dispositif montrent l'effet positif de cette pratique sur la réduction du ruissellement et de l'érosion. Mais la partie étude sur l'effet des systèmes SCV sur le stock d'eau et l'humidité du sol n'est pas prise en compte. De plus, ces études antérieures n'ont pas considéré également le taux de couverture utilisé. Pour compléter ces informations, la présente recherche accorde une importance particulière sur ces points non appréhendés par ces études.

De ces propos découlent le questionnement suivant: **Comment expliquer l'importance de la couverture du sol sur la réduction du ruissellement et de l'érosion hydrique ainsi que sur le bon maintien de l'humidité du sol ?**

## **Hypothèses**

Pour répondre à ce questionnement, trois hypothèses d'études ont été testées :

**Hypothèse 1** : Le taux de couverture du sol est en corrélation positive avec la réduction du ruissellement et des pertes en terre.

Selon cette hypothèse, la quantité d'eau ruisselée et la quantité des terres perdues diminuent au fur et à mesure que le taux de couverture du sol augmente.

**Hypothèse 2** : L'humidité du sol augmente avec le taux de couverture du sol.

Plusieurs études montrent que la couverture du sol constitue un moyen efficace pour lutter contre l'érosion hydrique et aussi pour maintenir l'eau dans le sol (Razafindramanana, 2011 ; Douzet et al., 2010 ; Remamy, 2005 ; Scopel et al., 2004 ; Roose, 1994, etc.). D'un côté, les deux premières hypothèses visent alors à vérifier les résultats obtenus par ces auteurs et de quantifier ces effets pour la région d'Alaotra. D'un autre côté, elles proposent de comparer les effets des différents taux de couverture du sol sur le contrôle de l'érosion hydrique et l'humidité du sol. Ainsi, elles permettent de déterminer si un taux partiel de couverture suffit à réduire le ruissellement et les pertes en terre et à améliorer l'infiltration de l'eau dans le sol. Ce dernier point est très important vue les différentes utilisations des plantes de couverture comme l'alimentation humaine, l'alimentation animale, la clôture, la fertilisation.

**Hypothèse 3** : La couverture du sol atténue les effets des autres facteurs (pluviosité, pente et état de surface du sol) agissant sur l'érosion hydrique et améliore l'infiltration de l'eau dans le sol.

Clicours.COM

L'infiltration d'eau dans le sol et l'érosion hydrique dépendent de plusieurs facteurs (Roose et al., 2004, Fox et al., 2008) comme la pente du terrain, le climat, les activités anthropiques, les caractéristiques physico-chimiques du sol, le couvert végétal. Cette troisième hypothèse est alors nécessaire pour déterminer si le couvert végétal a un effet déterminant sur ces facteurs, tout en contrôlant l'érosion hydrique et améliorant l'infiltration d'eau dans le sol.

## 1.2. Dispositifs expérimentaux

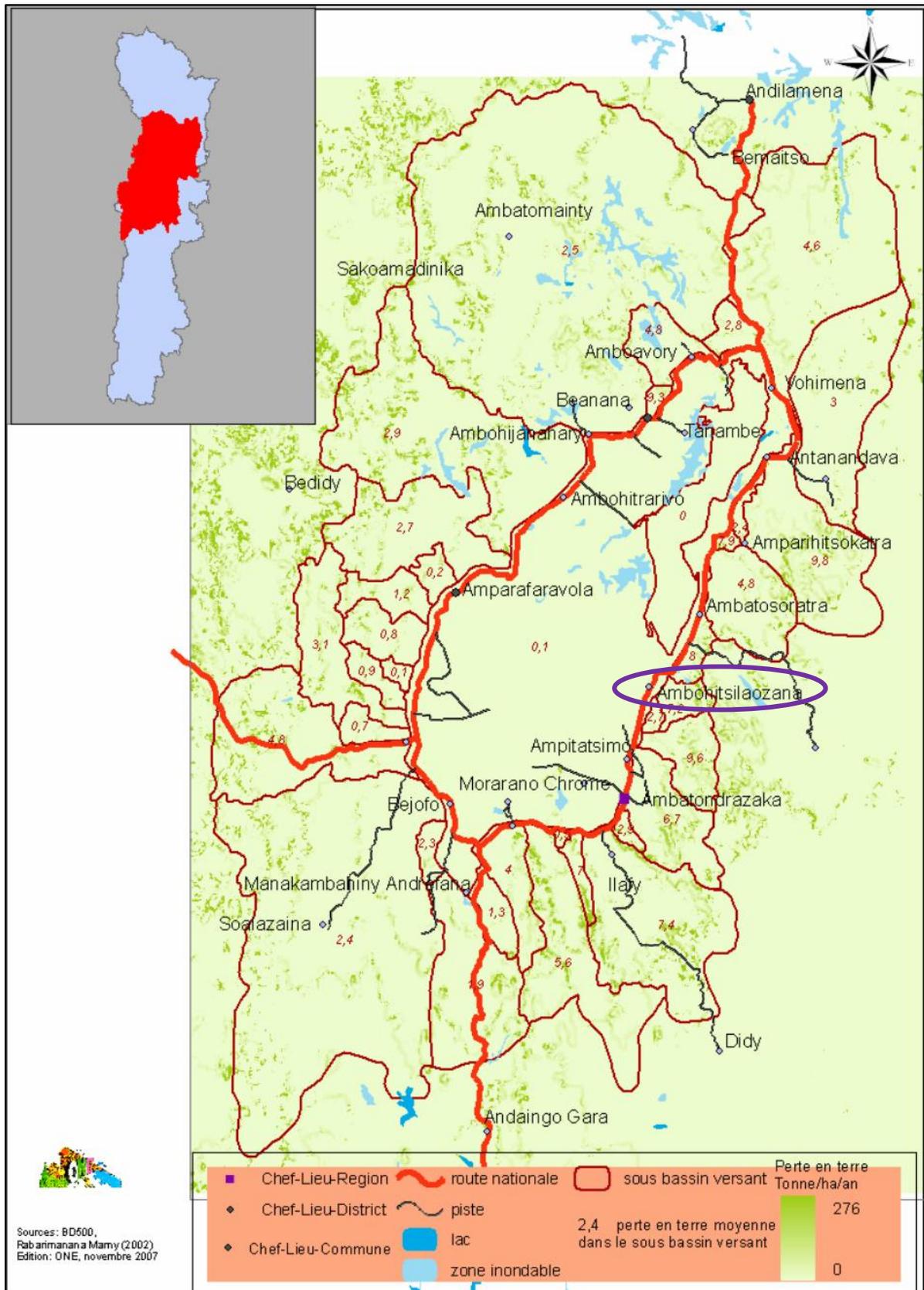
### 1.2.1 Site expérimental

L'expérimentation conduite sous pluie naturelle est entreprise dans la Commune d'Ambohitsilaozana, à 15 km au Nord d'Ambatondrazaka, sur les parcelles de recherche de FOFIFA Lac Alaotra, en bordure de la rive Sud-Est du Lac Alaotra (Fig 1). La zone se trouve enclavée dans une impasse à 250 km au Nord-Est de la Capitale, à 760 m d'altitude sur les Hautes-terres et entre 17° et 18° de la latitude Est.

La zone d'étude bénéficie d'un climat « tropical d'altitude » qui est à la fois favorable aux cultures des régions pays chaudes et tempérées, et se caractérise par une pluviométrie irrégulière. Sous l'effet de foehn, elle appartient au domaine sous le vent de l'alizée qui se caractérise par une faible précipitation, une pluviométrie irrégulière et une saison sèche importante. Les données climatologiques recueillies durant dix ans (2002 à 2012) fournies par la station météorologique du CRR-ME au sein du centre Ambohitsilaozana permettent d'élaborer la courbe ombrothermique de Gaussen ( $P \leq 2T$ ) (Annexe 1) et montrent bien ces caractéristiques. Durant ces dix ans, elle est marquée par de très haute variabilité interannuelle avec des années humides suivies des années déficitaires (Annexe 1). La région est marquée par une saison fraîche et sèche durant quatre mois environ (mai à août) suivi d'une saison chaude et humide pendant huit mois, dont cinq à six mois de pluie à partir de mi-novembre. La température moyenne annuelle est de 21,5 °C avec des températures minimale et maximale respectivement de 17,2°C (juillet) et 24,2°C (décembre). La pluviométrie moyenne mensuelle varie entre 4 mm (mois d'août) et 286 mm (mois de janvier), avec un total annuel de l'ordre de 1.060 mm (moyenne sur 10 ans). Cette pluviométrie varie d'une année à une autre.

Cette expérimentation est réalisée sur *tanety*. Ce dernier a présenté au début des argiles latéritiques plus ou moins carencées en potasse, de pH varie de 5,7 à 6,3, et les terrasses des alluvions jaunes anciennes d'origine lacustre M.Roche et Velly, 1957). Actuellement, des sols ferrallitiques jaunes et rouges sont observés sur *tanety* du fait de phénomène d'érosion (PRD, 2005).

L'annexe 1 caractérise beaucoup plus en détails les caractéristiques de la zone d'étude.



**Figure 1 : Carte d'Alaotra**  
Source : FTM, 2006

## 1.2.2 Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est composé de six parcelles de 6 m de long et 4 m de large. Trois parcelles sont situées sur un versant ayant une pente de l'ordre de 27 % (orientée vers le Nord), et les trois autres sont placées sur une pente d'environ 9 % (orientée vers le Sud).

Sur chaque parcelle, trois micro-lots d'érosion de 1 m<sup>2</sup> sont intégrés et à l'intérieur de chaque micro-lot, une sonde de 1m de long est enfoncée dans le sol. Cette dernière est utilisée pour la mesure d'humidité du sol et les mesures du ruissellement et des pertes en terre sont réalisés au niveau de ces micro-lots d'érosion (Fig. 2).

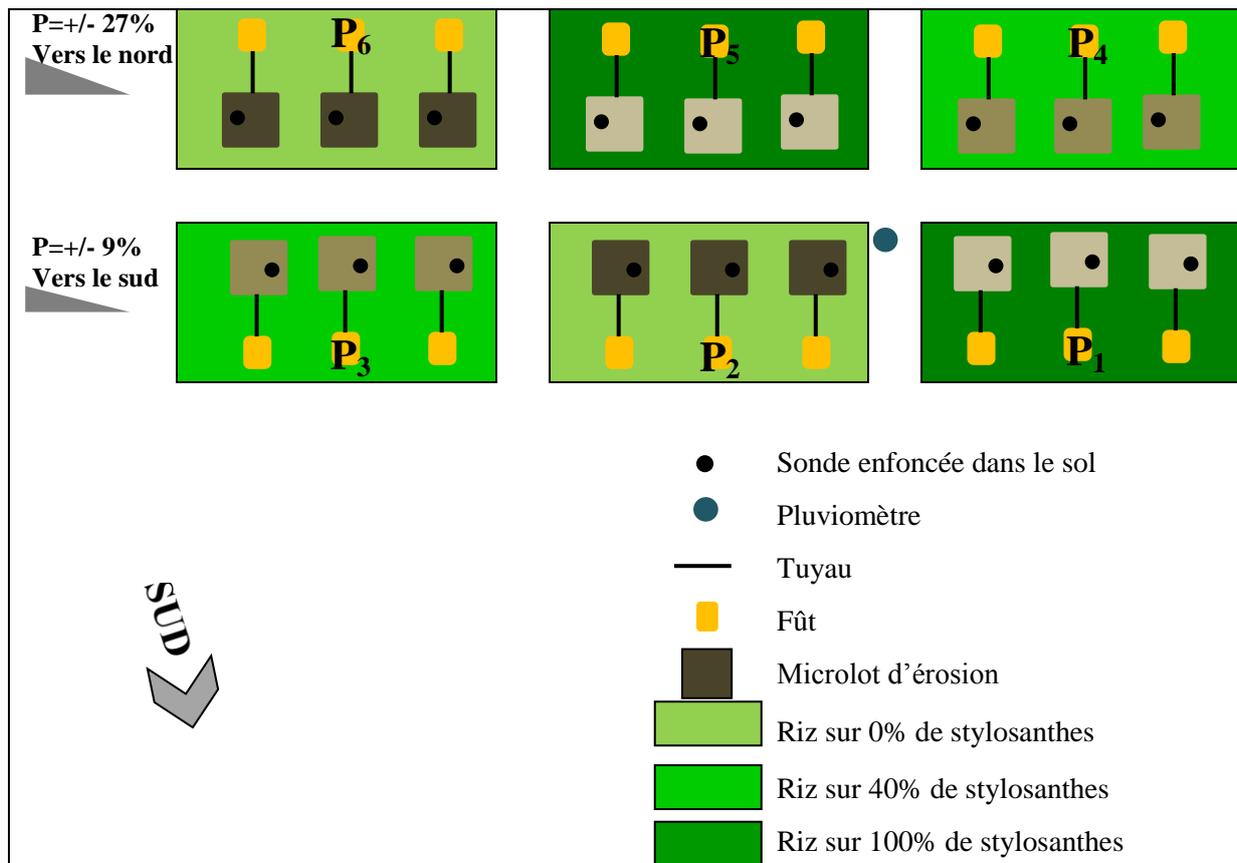


Figure 2: Plan de l'essai érosion

Source : Laingo, 2013

### 1.2.2.1 Systèmes de culture étudiés

Les pertes en eau, les pertes en terre et l'humidité du sol sont comparés sur deux états différents de sol (niveau de pente : pente faible environ 9% et pente forte de l'ordre de 27%). Avec chaque niveau de pente, les mesures sont effectuées sur la culture de riz pluvial sur trois différents taux de couverture du sol (0%, 40%, et 100%). Le paillis utilisé est le stylosanthes ;

il a été mise en place en début de la campagne, soit cinq jours avant le semis. Les caractéristiques de cette plante de couverture utilisée sont détaillées en annexe 2.

Le même niveau de fertilisation est appliqué sur toutes les parcelles. Lors du semis, un apport du fumier (5 t.ha<sup>-1</sup>) et de N<sub>11</sub>P<sub>22</sub>K<sub>16</sub> (150 kg.ha<sup>-1</sup>) est effectué. Vingt cinq et quarante cinq jour après semis, un apport d'urée de 100 kg.ha<sup>-1</sup> est réalisé. Le tableau 1 synthétise les caractéristiques de tous les systèmes étudiés.

**Tableau 1: Caractéristiques des systèmes étudiés**

N° parcelle	Taux de couverture (%)	Quantité de couverture en MS (t.ha <sup>-1</sup> )	Culture	Pente (%)
1	100	12	Riz ( <i>Oriza sp.</i> L)	9
2	0	0	Riz ( <i>Oriza sp.</i> L)	9
3	40	3	Riz ( <i>Oriza sp.</i> L)	9
4	40	3	Riz ( <i>Oriza sp.</i> L)	27
5	100	12	Riz ( <i>Oriza sp.</i> L)	27
6	0	0	Riz ( <i>Oriza sp.</i> L)	27

#### 1.2.2.2 Humidimètre avec sonde

Le tube (cliché 1.a) à parois fines est enfoncé bien verticalement dans le sol jusqu'à 1 m de profondeur. Il faut veiller à ce qu'il y ait un bon contact entre le sol et le tube. Ce tube est hermétiquement couvert par un bouchon à la surface du sol de façon à éviter l'entrée d'eau à l'intérieur. Il est installé en début de l'essai pour pouvoir mesurer l'humidité sur différentes profondeurs dans un profil de sol vertical (100 mm ; 200 mm ; 300 mm ; 400 mm et 600 mm). Une sonde (cliché 1.b) est enfoncée dans le sol, plus précisément dans ce tube, lors de chaque mesure. Elle est pourvue de différents éléments de mesure pour pouvoir mesurer le taux d'humidité du sol à différentes profondeurs dans un profil de sol vertical. Elle mesure à une précision de ± 3 % dans le tube. Ce tube enfoncé s'est situé à l'intérieur du micro-lot d'érosion en raison de protéger ses alentours contre le piétinement (cliché 1.c).

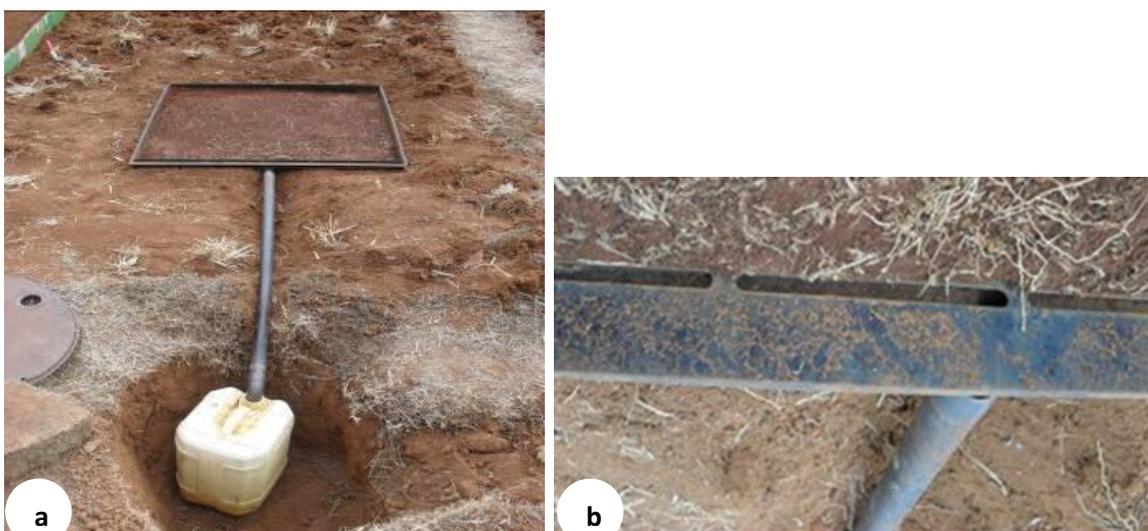


**Cliché 1: Humidimètre avec sonde théta : a) tube à enfoncer dans le sol – b) boîtier composant des capteurs d’humidité – c) sonde mise en place**

Source : Laingo, 2013

### 1.2.2.3 Micro-lots d’érosion

Les micro-lots d’érosion sont enfoncés dans le sol d’une certaine profondeur (5cm). L’une des faces est constituée par des fentes, qui en aval, se trouvent sur un même niveau que la surface du sol pour bien capter les eaux ruisselées et les sédiments érodés dans 1 m<sup>2</sup>. Il faut veiller à l’horizontalité le long de ces fentes afin d’éviter les écoulements préférentiels. Un tuyau ramène l’eau de ruissellement, après l’avoir collectée par un canal d’une certaine pente, dans un bidon plastique situé à 1m en bas du cadre, et ce, par l’intermédiaire d’un exutoire en tuyau métallique d’1 m (Cliché 2).



**Cliché 2: Micro-lots d’érosion : (a) cadre mis en place avec ses équipements – (b) Fentes sur la face en aval du cadre - Source : Laingo, 2010**

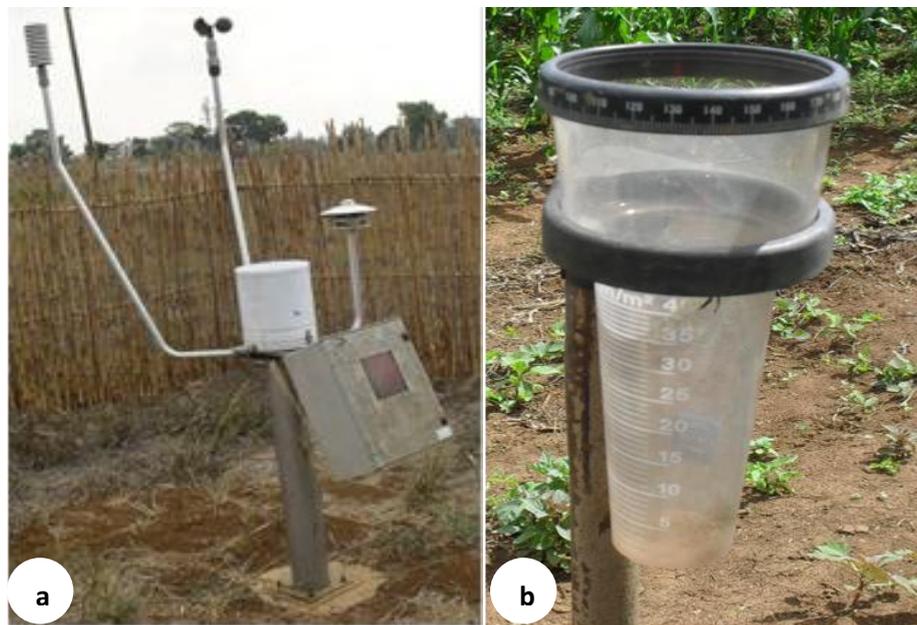
## 1.2.3 Mesures sur terrain

### 1.2.3.1 Mesures climatiques

A côté du dispositif expérimental, il y a une station météorologique (CIMEL) (Cliché 3.a). Elle est utilisée pour déterminer l'effet du climat local sur le phénomène d'érosion et l'humidité du sol. Elle est constituée par différents capteurs pour mesurer la température et l'humidité relative qui sont abrités par un MINI ABRI de dimensions réduites permettant une utilisation à proximité d'un pluviomètre ; le pyranomètre servant à mesurer le rayonnement solaire ; l'anémomètre permettant de mesurer la durée, la vitesse et la direction du vent ; et le pluviomètre pour mesurer la hauteur de la pluie.

Un autre pluviomètre à lecture directe (Cliché 3.b) a été également mis en place juste à côté du dispositif expérimental d'érosion afin de vérifier la hauteur réelle de la pluie sur le terrain.

La mesure des pluies avec le pluviomètre sur la parcelle d'expérimentation a été faite systématiquement chaque matin à la même heure, le lendemain de l'événement pluvial. L'intensité de la pluie a été mesurée à l'aide de la station automatique CIMEL (intensité maximale en  $\text{mm.h}^{-1}$ ).



**Cliché 3 : Station météorologique : a) station CIMEL – b) pluviomètre à lecture directe**

Source : Laingo, 2010

### 1.2.3.2 Mesure des pentes

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour évaluer la pente d'un terrain comme la mesure à l'aide d'un clisimètre, la mesure indirecte avec le théodolite, la mesure d'après la différence de niveau.

Dans cette expérimentation, la pente est mesurée sur de petite surface donc la mesure d'après la différence de niveau a été utilisée. Par contre, les détails sur les deux autres mesures sont trouvés en annexe 3.

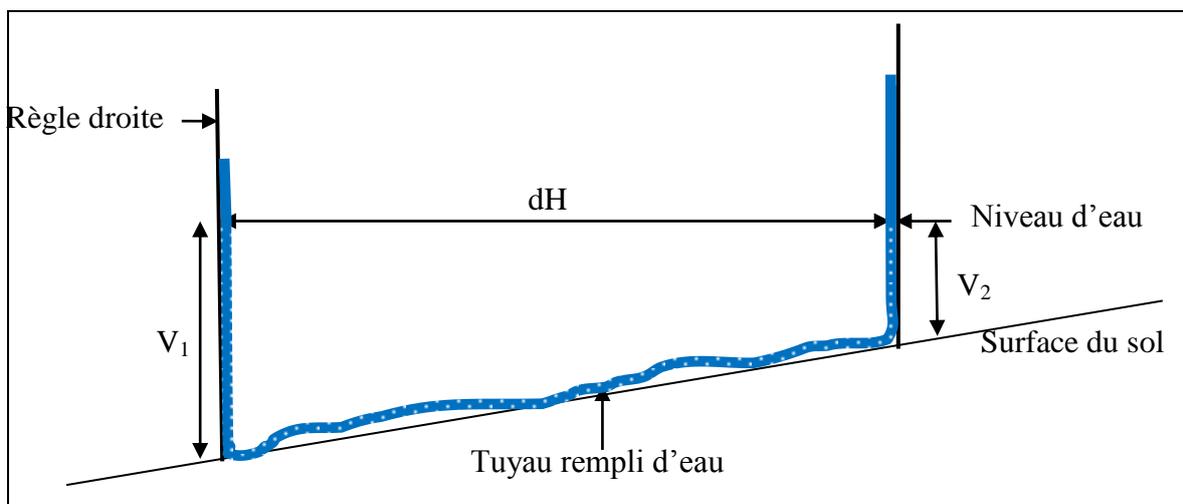
- **Mesure de la pente d'après la différence de niveau (Fig 3)**

En utilisant deux règles ou tringles bien droites, un tuyau à niveau de 5 m, un mètre et un niveau à bulle, la mesure des pentes est faite selon la procédure suivante : (i) remplir le tuyau par une eau claire de manière à éviter toutes formations de bulle d'air ; (ii) maintenir bien verticales les tringles des deux côtés du cadre, l'un en amont et l'autre en aval de la pente ; (iii) monter chaque extrémité du tuyau le long des tringles ; (iv) mesurer la distance horizontale entre les deux tuyaux, plus précisément entre les points où se situe le niveau d'eau ; (v) mesurer également la hauteur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol, sur les deux côtés. Par le principe des vases communicants, la différence de ces mesures donne la dénivellation.

La valeur de pente est obtenue en faisant le rapport entre la dénivellation et la distance horizontale, suivant cette formule :

$$P = [(V_2 - V_1) / d_H] \times 100$$

- P = pente exprimée en %
- $V_1$  et  $V_2$  = Hauteur de niveau d'eau par rapport à la surface du sol (m)
- $d_H$  = distance horizontale entre les deux niveaux d'eau (m)



**Figure 3: Mesure de pente**  
Source : Laingo, 2013

### **1.2.3.3 Relevé des états de surface de la parcelle**

Le relevé des états de surface de chaque parcelle a été réalisé au début et à la fin de la saison pluvieuse. C'est un travail très important parce que la capacité d'infiltration d'eau dans le sol dépend vraiment des caractéristiques des états de surface. Ainsi, il permet de déterminer la cohérence entre les caractéristiques des états de surface et les résultats obtenus avec les mesures du ruissellement, les pertes en terres et l'humidité du sol sur les mêmes parcelles. Pour cela divers points ont été observés, déterminés et analysés dans chaque cadre d'érosion tels que le pesage de paillis installé dans le cadre au début et à la fin de la campagne culturale; la quantification des pieds du riz et des adventices dans chaque cadre d'érosion ; l'estimation visuelle de pourcentage des croûtes d'érosion formées et des agrégats libres sur la surface ; et l'estimation des activités biologiques.

Pour la détermination du taux de couverture réellement utilisé sur les parcelles au début et à la fin de la campagne, un échantillon des paillis utilisés et qui a été déjà pesé, a été mis à l'étuve, et repesé après pour déterminer son taux d'humidité. Ainsi, ce taux obtenu est appliqué lors de pesage de paillis de stylosanthes sur chaque parcelle.

### **1.2.3.4 Mesures du ruissellement et des sédiments**

La mesure doit se faire chaque jour et très tôt le matin s'il a plu durant les 24 heures précédentes. Les opérations consistent à nettoyer soigneusement le haut du bidon et l'extérieur du tuyau à l'aide d'une éponge ou d'une brosse pour éviter la contamination en sol. Ensuite, il faut mesurer tout d'abord les eaux de ruissellement dans le bidon par un doseur de 1 L et un ou deux seaux selon la quantité, après il faut noter dans un carnet la quantité d'eau ruisselée. A chaque mesure, il faut bien observer d'où vient l'eau contenue dans le bidon pour vérifier qu'il n'y ait pas de contamination d'eaux et/ou de terres venant de l'extérieur (Cliché 4.a).

Concernant, les prélèvements des sédiments, tout d'abord, il faut verser les eaux de ruissellement dans un seau ; puis nettoyer soigneusement les fentes, les canaux d'évacuation, le tuyau et le bidon à l'aide d'une eau claire (sans sédiments) de 1,5 l tout en utilisant une pissette et un pinceau (Cliché 4.b). Cela a pour but de récupérer toutes les particules solides restantes. Les eaux ruisselées et les eaux de rinçage doivent être mélangées. Ensuite, prélever une aliquote de 1,5 L d'eau turbide dans une bouteille bien référencée. L'aliquote est filtrée (Cliché 4.c) à l'aide d'un filtre de type millipore d'une porosité de 0,45  $\mu\text{m}$  (également référencé). Les filtres sont séchés à l'air libre après. Dès que toutes les opérations sur terrain soient finies, il faut veiller à la propreté des fentes, de tuyau et du bidon pour ne pas fausser la prochaine mesure.



**Cliché 4: Opérations des mesures de ruissellement et des sédiments : (a) mesure de ruissellement – (b) rinçage des fentes – (c) filtration des échantillons**

Source : Laingo, 2010

### 1.2.3.5 Mesure de l'humidité du sol

Actuellement, différentes méthodes sont disponibles pour mesurer l'humidité du sol. Parmi lesquelles il y a la méthode par télédétection, la méthode gravimétrique, la méthode capacimétrique, la méthode par tensiomètre et la méthode TDR ou réflectométrie temporelle.

Cette dernière méthode a été choisie durant l'expérimentation. Elle est plus facile et donne des mesures plus précises avec une lecture directe de l'humidimètre sur le terrain. Toutes les autres méthodes sont développées en annexe 4.

- **Méthode TDR ou réflectométrie temporelle**

La sonde Theta pour les humidimètres du sol détermine le pourcentage d'humidité par le biais d'une technique de domaine de fréquence. Cette méthode permet de mesurer les fluctuations de la constante diélectrique du sol, fluctuations qui sont ensuite converties en un signal en millivolts correspondant à un taux d'humidité. Le capteur se compose d'un logement en plastique robuste et étanche qui abrite les composants électroniques. Ce boîtier est doté, sur le côté, de quatre sondes de mesure en acier inoxydable pouvant être facilement enfoncées dans le sol. Le capteur offre une plage de mesure allant de 5 à 55 % de volume d'humidité du sol, avec une précision de 5 %. Le capteur est équipé d'un câble avec une fiche correspondant à l'humidimètre ou d'un fil avec branchement sur un enregistreur de données. Si des mesures de l'humidité du sol en série sont requises, le capteur d'humidité du sol peut facilement être relié à un enregistreur de données. La mesure est par ailleurs faiblement influencée par la température, la salinité et le type de sol.

La mesure a été effectuée tous les sept jours. Ainsi, une sonde est enfoncée dans le tube déjà installé sur chaque parcelle afin de capter l'humidité du sol sur les profondeurs de 0 à 15cm, 15 à 25 cm ; 25 à 35 cm ; 35 à 50 cm et 50 à 70 cm (cliché 5.a). Cette sonde est par la suite reliée à un appareil qui est l'humidimètre et les valeurs mesurées s'affichent sur l'écran de l'humidimètre (Cliché 5.b). La lecture a été faite sur trois points en tournant le capteur de 120° dans le but de vérifier s'il y a des côtés qui font un mauvais contact entre le sol et le tube.

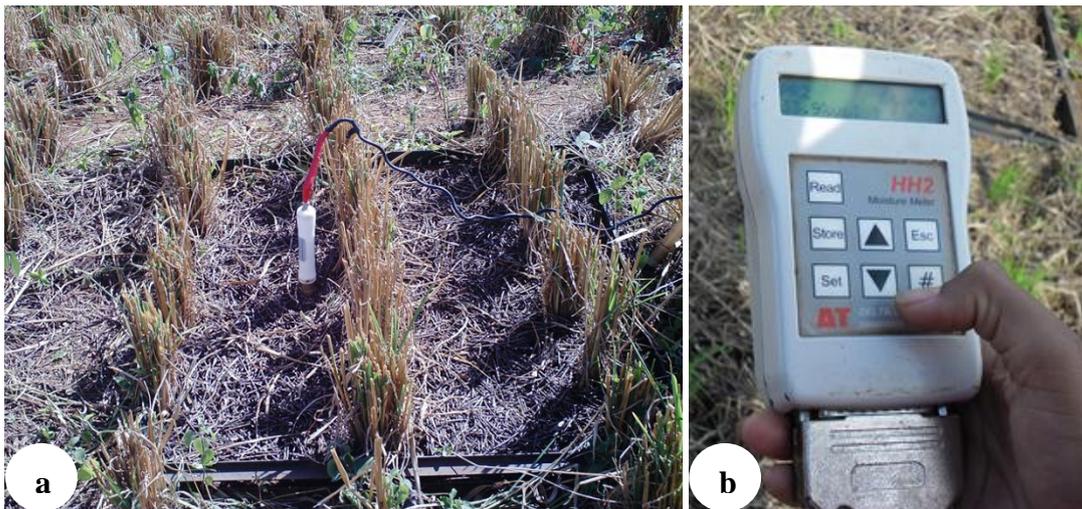
D'après les valeurs obtenues par cette mesure, le stock d'eau dans le sol peut être calculé de la manière suivante :

$$\text{Stock eau } (C_x) = P(C_x) \times \text{Hum } (C_x)/100$$

Avec Stock eau ( $C_x$ ): Stock d'eau dans la couche x, exprimé en mm;

$P(C_x)$ : Profondeur de la couche x en mm

Hum ( $C_x$ ): Humidité moyenne dans la couche x, en % du volume



**Cliché 5:** Mesure de l'humidité du sol : a) capteur enfoncé dans le tube – b) appareil de lecture

Source : Laingo, 2013

## 1.2.4 Travaux au laboratoire

### 1.2.4.1 Mesure du taux d'humidité de paillis

Avant de mettre en place le *mulch* en début de la campagne, il faut déterminer son taux d'humidité afin d'avoir une quantité de paillis exact. Un échantillon de stylosanthes est passé à l'étuve réglée à 70°C pendant 48 heures pour obtenir le poids de la matière sèche.

### 1.2.4.2 Mesure des charges érodées

Les filtres contenant les sédiments sont séchés à l'étuve réglée à 105 °C durant 24 heures. La formule suivante donne les pertes en terre :

$$P_{\text{Terre}} (\text{g}) = [\text{Pds}_{\text{TF}} (\text{g})] \times [\text{Ruis} (\text{ml}) + \text{Eau}_r (\text{ml})] / [\text{V}_{\text{EF}} (\text{ml})]$$

Avec :

- $P_{\text{Terre}}$  = Pertes en terre en g ;  $\text{Pds}_{\text{TF}}$  = Poids des particules solides dans le filtre en g ;
- $\text{Ruis}$  = Ruissellement en ml ;  $\text{Eau}_r$  = Eau de rinçage en ml
- $\text{V}_{\text{EF}}$  = Volume de l'aliquote prélevé pour filtration en ml

Les pertes en terre sont ensuite cumulées sur une campagne pour déterminer les pertes en terre pendant une saison des pluies ([Razafindramanana Rakotoniaina, 2011](#)).

## 1.2.5 Traitements des données

Les analyses de toutes les données ont été effectuées avec le logiciel statistique XLSTAT 2008. L'expérimentation est étudiée sous deux facteurs différents dont le facteur principal est le taux de couverture et le facteur subsidiaire est la pente. Chaque cas est par la suite mené en trois répétitions. En effet, les données sont analysées suivant un modèle statistique d'analyse de variance en split-plot.

D'après le test de normalité, les données ne suivent pas la loi normale. Une transformation selon une fonction logarithme népérien à base deux a été effectuée pour homogénéiser les variances. Or, en comparant les histogrammes obtenus par les valeurs modifiées et non, il n'y a pas une grande différence. Dans ce sens, il est préférable de comparer les données entre elles par le test non paramétrique de Kruskal-Wallis, au seuil de signification 5 %.

Question	Hypothèses	Indicateurs	Méthodologies
<p><b>Comment expliquer l'importance de la couverture du sol sur la réduction du ruissellement et de l'érosion hydrique ainsi que sur le bon maintien de l'humidité du sol ?</b></p>	<p>Le taux de couverture du sol est en corrélation positive avec la réduction du ruissellement et des pertes en terre</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quantité en matière sèche de paillis</li> <li>- Quantité d'eau ruisselée</li> <li>- Quantité des terres perdues</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etuvage et pesage de paillis</li> <li>- Mesure de ruissellement</li> <li>- Filtrage de ruissellement</li> <li>- Etuvage et pesage des filtres contenant les sédiments</li> </ul>
	<p>L'humidité du sol augmente avec le taux de couverture du sol</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quantité en matière sèche de paillis</li> <li>- Valeur d'humidité du sol sur des couches bien définies</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etuvage et pesage de paillis</li> <li>- Mesure de l'humidité du sol</li> </ul>
	<p>La présence de la couverture du sol atténue les effets des autres facteurs (pluviosité, pente, état de surface du sol) agissant sur l'érosion hydrique et améliorant l'infiltration de l'eau dans le sol</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Qualité et quantité de paillis utilisé</li> <li>- Quantité de ruissellement</li> <li>- Quantité des terres perdues</li> <li>- Quantité de l'eau stockée dans le sol</li> <li>- Hauteur totale de la pluie</li> <li>- Pourcentage de la pente</li> <li>- Pourcentage de surface présentant des agrégats libres, des croûtes d'érosion, des activités fauniques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etuvage et pesage de paillis</li> <li>- Mesure de ruissellement</li> <li>- Mesure des pertes en terre</li> <li>- Mesure de l'humidité du sol</li> <li>- Mesure climatique</li> <li>- Mesure de la pente</li> <li>- Relevé des états de surface</li> </ul>

Tableau 2: Cadre opératoire de recherche

## 2 RESULTATS ET DISCUSSION

### 2.1 Résultats

#### 2.1.1 Relation entre la couverture du sol et l'érosion hydrique

##### 2.1.1.1 Ruissellement

Les figures 4a et b résument le ruissellement mesuré sur les parcelles qui diffèrent par le niveau de la pente et par le taux de couverture utilisé. D'après la figure 4.b, sur le terrain en faible pente, la quantité du ruissellement sur une parcelle sans mulch est deux fois plus importante que celle mesurée sur les parcelles couvertes à 40% et à 100%, soient 14 mm et 5 à 6 mm. Sur le terrain en forte pente, cette quantité s'élève jusqu'à 42 mm sur sol non couvert contre 6 à 10 mm sur de sol couvert à 100 % et à 40 %. Ainsi, la différence est nettement significative entre le sol non couvert et le sol couvert quelle que soit la pente, et il y a également une différence significative entre la quantité d'eau ruisselée sur des terrains en pente faible et en pente forte. Par contre, les parcelles couvertes à 40% et à 100% ne présentent aucune différence au seuil de 5 %.

Par rapport à la répartition décadaire des pluies (Fig 4.a), durant la deuxième et troisième décade du mois de février (augmentation jusqu'à 20 mm) et en troisième décade du mois de mars (12 mm de plus), le ruissellement est important surtout sur des parcelles nues et en pente forte. Cette augmentation est aussi remarquée en deuxième décade de décembre et en troisième décade de janvier mais en plus faible quantité.

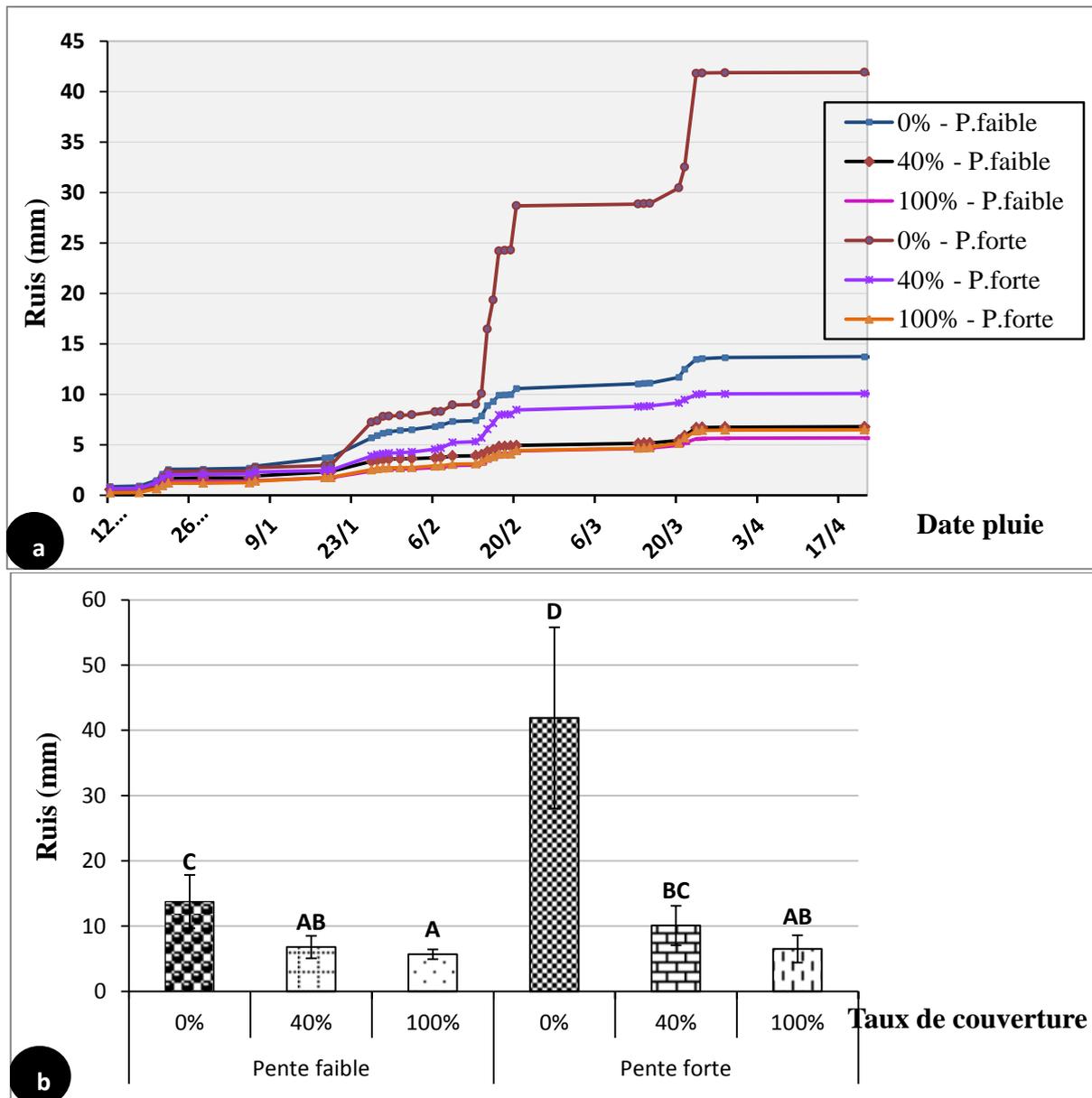


Figure 4: Ruissellement mesuré durant la campagne 2012-2013 : a) dynamique de ruissellement en fonction de la date des pluies – b) Cumul de ruissellement en fonction de la pente et du taux de couverture

### 2.1.1.2 Pertes en terre

Les pertes en terre mesurées durant la saison des pluies 2012-2013 sont détaillées dans les figures 5a et b. Sur toutes les parcelles, quatre pics sont observés : en deuxième décade de décembre, troisième décade de janvier, deuxième décade de février et troisième décade de mars (Fig 5.a).

En comparant la quantité des terres perdues sur les parcelles couvertes et non couvertes (Fig 5.b), une différence hautement significative a été constatée.

En pente faible, les pertes en terre sont de 150 g.m<sup>-2</sup> sur de parcelle sans paillis ; 100 g.m<sup>-2</sup> sur la parcelle à 40% de couverture et 49 g.m<sup>-2</sup> sur la parcelle à 100 % de couverture, soit trois fois plus réduite.

En pente forte, les pertes en terre augmentent jusqu'à 600g.m<sup>-2</sup> sur de sol à 0% de couverture, soit six fois plus que celles avec un taux de couverture de 40% ou 100%.

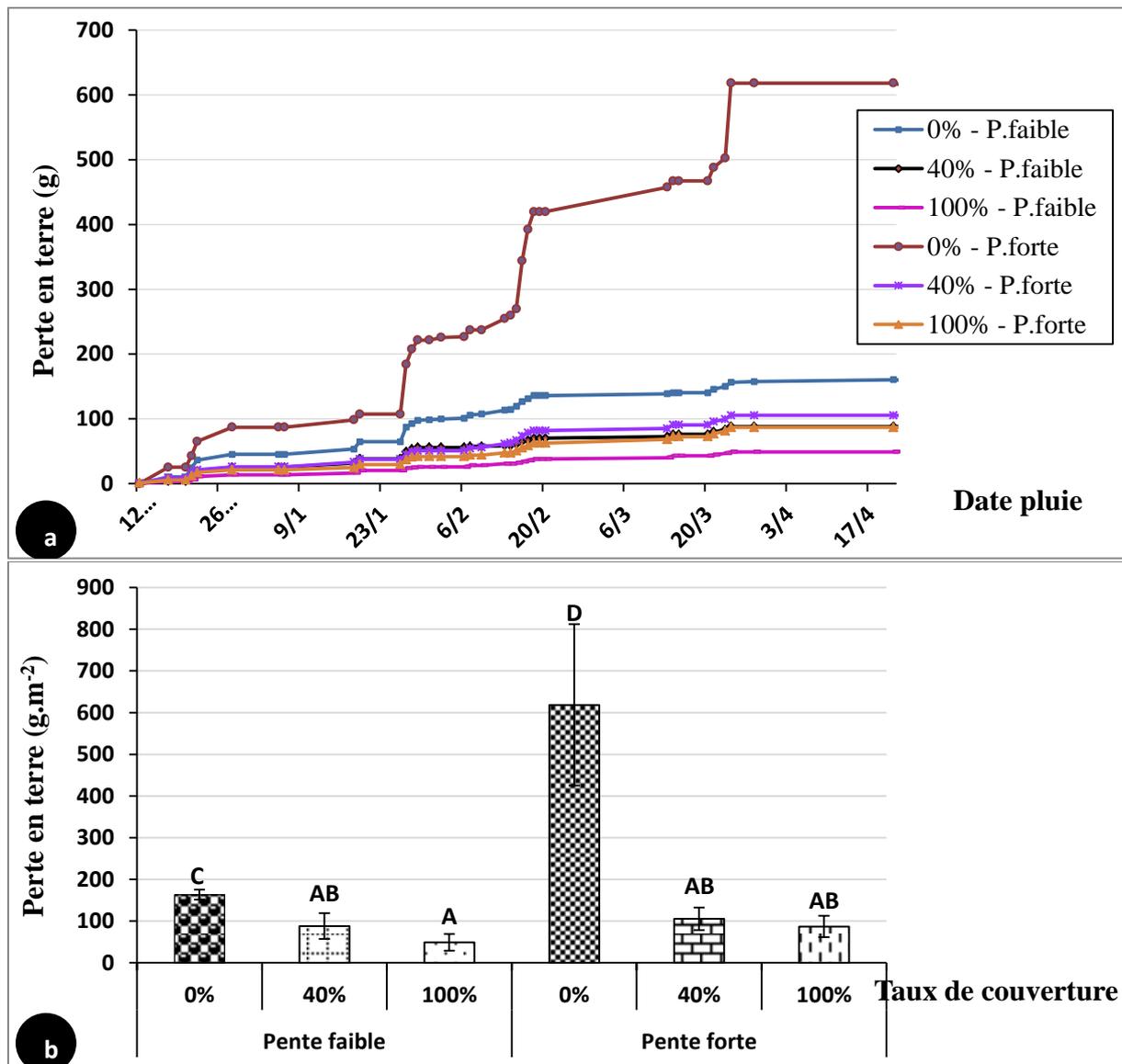


Figure 5: Pertes en terre mesurées durant la campagne 2012-2013 : a) dynamique de perte en fonction de la date des pluies – b) Cumul des terres perdues en fonction de la pente et du taux de couverture

### 2.1.1.3 Turbidité

La figure 6 synthétise la capacité de chaque millimètre de ruissellement à arracher et transporter des sédiments. Quel que soit le pourcentage de la pente, la turbidité est plus élevée sur les systèmes non paillés que sur ceux paillés, avec une différence significative à 5%. Par contre, il n'y a pas de différence entre les systèmes paillés à 40 % et à 100 %.

En pente faible, elle est de 464 g.l<sup>-1</sup> sur des parcelles nues alors que sur des parcelles couvertes à 40 % et 100 % de paillis de stylosanthes, les turbidités sont respectivement de 343 g.l<sup>-1</sup> et 216 g.l<sup>-1</sup>.

En pente forte, la turbidité est de l'ordre de 760 g.l<sup>-1</sup> sur de parcelle à 0% de couverture contre 350 g.l<sup>-1</sup> sur des parcelles couvertes de stylosanthes. La différence n'est pas significative entre les parcelles paillées.

D'une manière générale, ces trois traitements en interaction avec la pente peuvent être classés comme suit, par ordre d'importance de la turbidité : P (0%)-F > P (0%)-f > P (40%)-F = P (40%)-f = P (100%)-F > P (100%)-f.

La pente présente des effets significatifs sur la turbidité entre les parcelles non paillées.

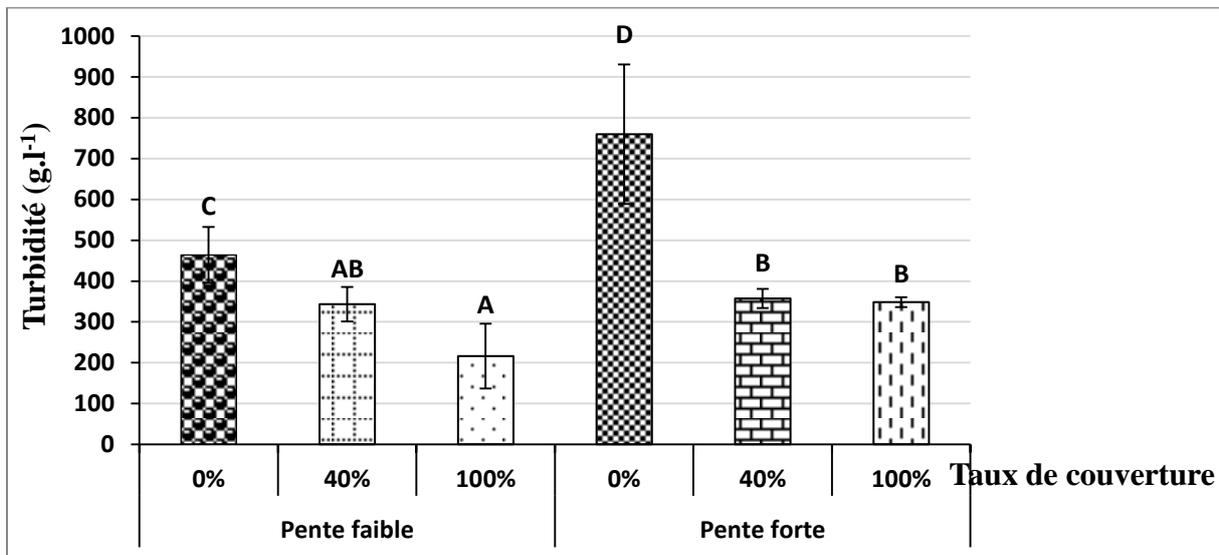


Figure 6 : Turbidité en fonction de la pente et des taux de couverture du sol

## 2.1.2 Relation entre la couverture du sol et l'humidité du sol

### 2.1.2.1 Humidité du sol

La figure 7 illustre les stocks d'eau totaux enregistrés dans les soixante dix premier centimètres de profondeur du sol sur des parcelles de riz sous couverture de stylosanthes et sans couverture, sur les deux pentes différentes.

La figure 7.a montre que ce stock d'eau moyen sur le cycle est significativement différent sur des parcelles avec des paillis et sur des parcelles sans paillis tant sur une pente faible que sur une pente forte. Le stock d'eau moyen est de l'ordre de 200 mm sur des parcelles non couvertes et d'environ 245 mm sur des parcelles couvertes. La diminution de ce stock d'eau dans le sol est beaucoup plus accentuée sur une pente forte que sur une pente faible surtout sur les parcelles couvertes.

L'évolution de chaque courbe par rapport à l'histogramme des pluies dans la figure 7.b montre que le stock d'eau dans le sol varie suivant la hauteur de la pluie. Lors de la première mesure de l'humidité du sol (13 décembre 2012), le stock d'eau dans la couche de 0 à 70cm en profondeur du sol est de l'ordre de 270mm sur des parcelles couvertes de stylosanthes contre 216mm sur des parcelles non couvertes. Ainsi, quatre pics des courbes de stock d'eau dans le sol sont observés : i) en quatrième semaine du décembre (+/- 260 mm sur sol couvert et +/- 210 mm sur sol non couvert) ; ii) en cinquième semaine du janvier (+/- 280 mm sur sol couvert et +/- 240 mm sur sol non couvert) ; iii) en troisième semaine du février (+/- 310 mm sur sol couvert et +/- 260 mm sur sol non couvert) ; et en quatrième semaine du mars (+/- 275 mm sur sol couvert et +/- 230 mm sur sol non couvert). A partir de ce dernier pic, le stock d'eau dans le sol ne cesse de diminuer d'une semaine à une autre jusqu'à la fin de l'expérimentation.

On voit également que les stocks ne se rejoignent pas, ni durant les forts épisodes pluvieux, ni à la fin de longues périodes sèches. Cela semble illustrer qu'on n'atteint jamais ni la saturation du profil ni son assèchement total.

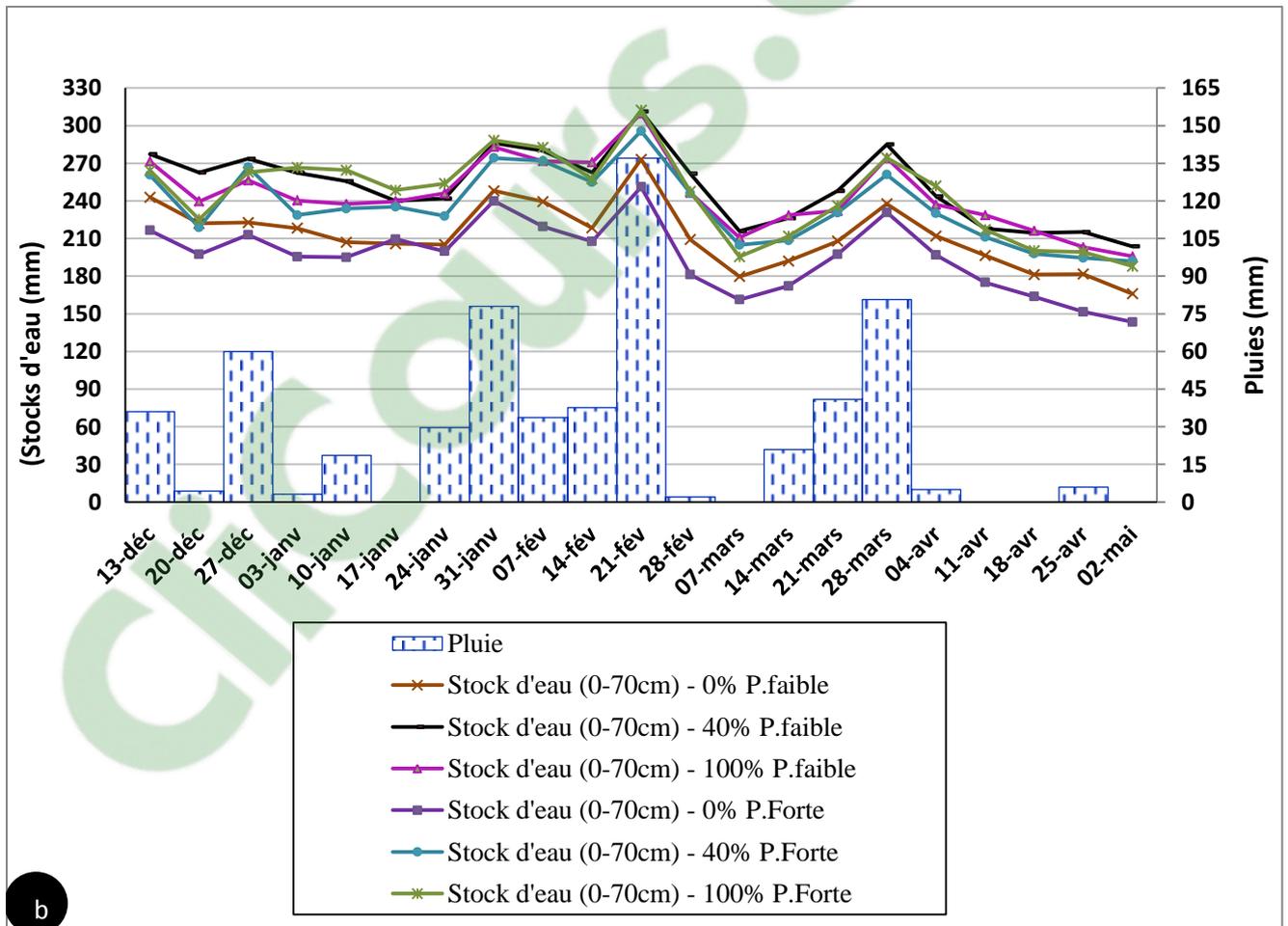
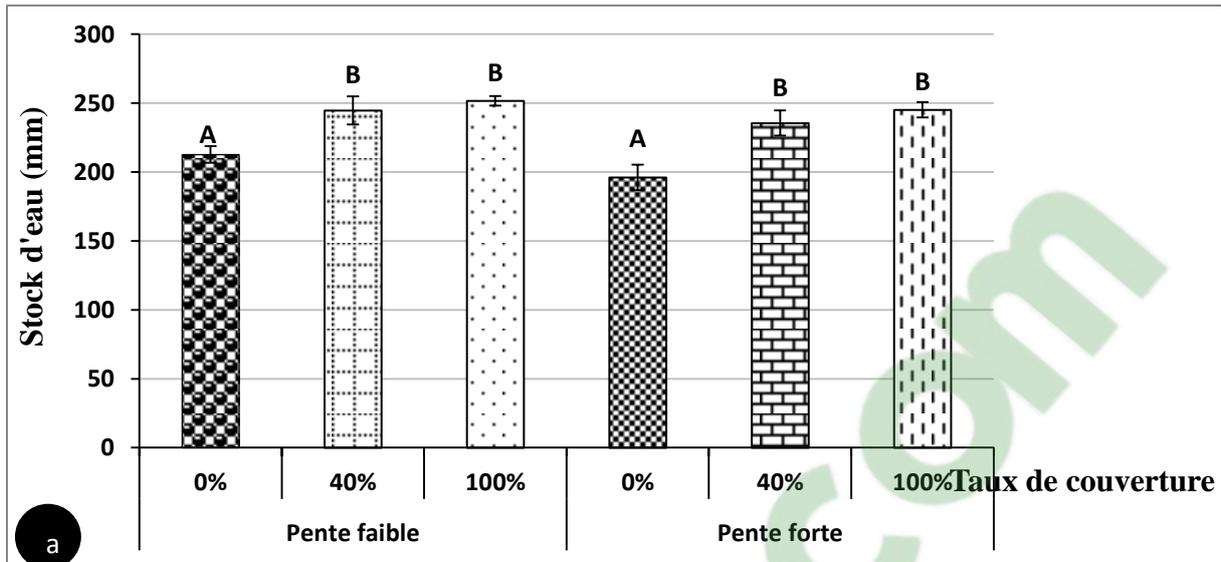


Figure 7 : Stock d'eau dans le sol : a) Quantité moyenne des eaux stockées en fonction de la pente et des taux de couverture du sol– b) Dynamique du stock d'eau dans le sol en fonction des précipitations

**N.B** : Le tableau de comparaison des moyennes de ruissellement, des pertes en terre, de la turbidité et du stock d'eau dans le sol est résumé dans l'annexe 5.

### 2.1.2.2 Relation entre le stock d'eau dans le sol - le ruissellement et la pluie

La figure 8 explique la relation entre la pluie, le ruissellement et le stock d'eau dans le sol mesurés durant la période de l'expérimentation. Inversement au ruissellement, l'eau stockée est bien supérieure sur des parcelles couvertes de stylosanthes (587 mm à 589 mm) que sur des parcelles non couvertes (540 mm sur des parcelles en pente forte et 570 mm sur des parcelles en faible pente).

Une corrélation positive existe entre le stock d'eau dans le sol et la pluie moins le ruissellement. Sur une pente faible, cette corrélation est forte avec un coefficient  $R^2 = 0,906$  alors que sur une pente forte,  $R^2 = 0,78$  et la corrélation est moyenne.

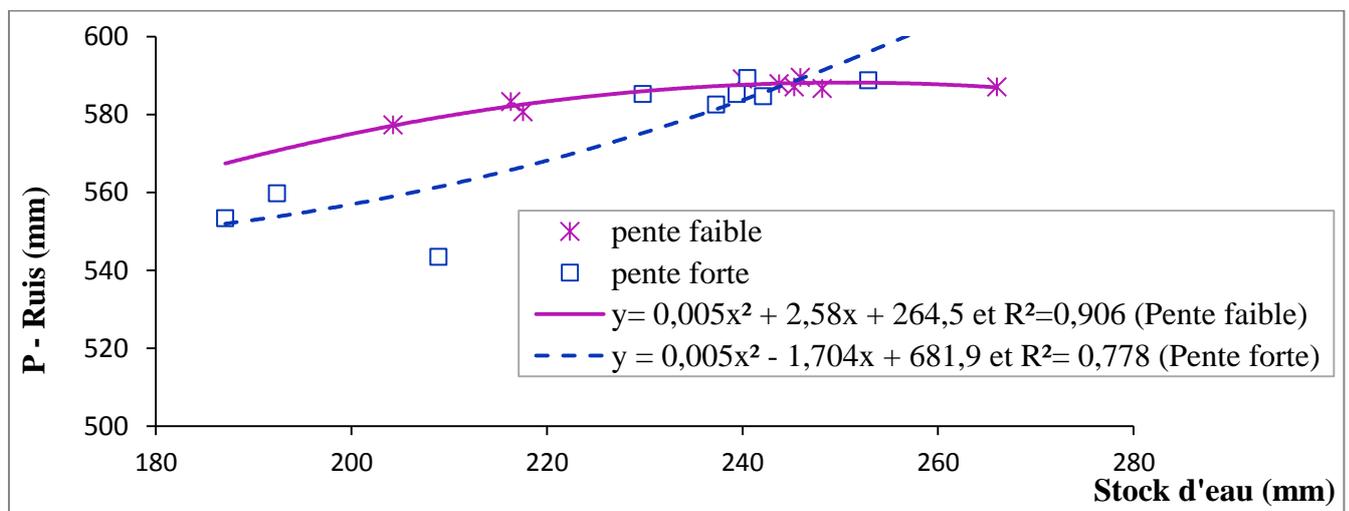


Figure 8 : Relation entre la pluie moins le ruissellement total et le stock d'eau moyen sur le cycle

## 2.1.3 Les différents agents érosifs

### 2.1.3.1 Caractéristiques de la pluie

Le tableau 3 et la figure 9 résument les caractéristiques des pluies enregistrées à partir de novembre 2012 (début de l'expérimentation) jusqu'en avril 2013 (fin de l'expérimentation).

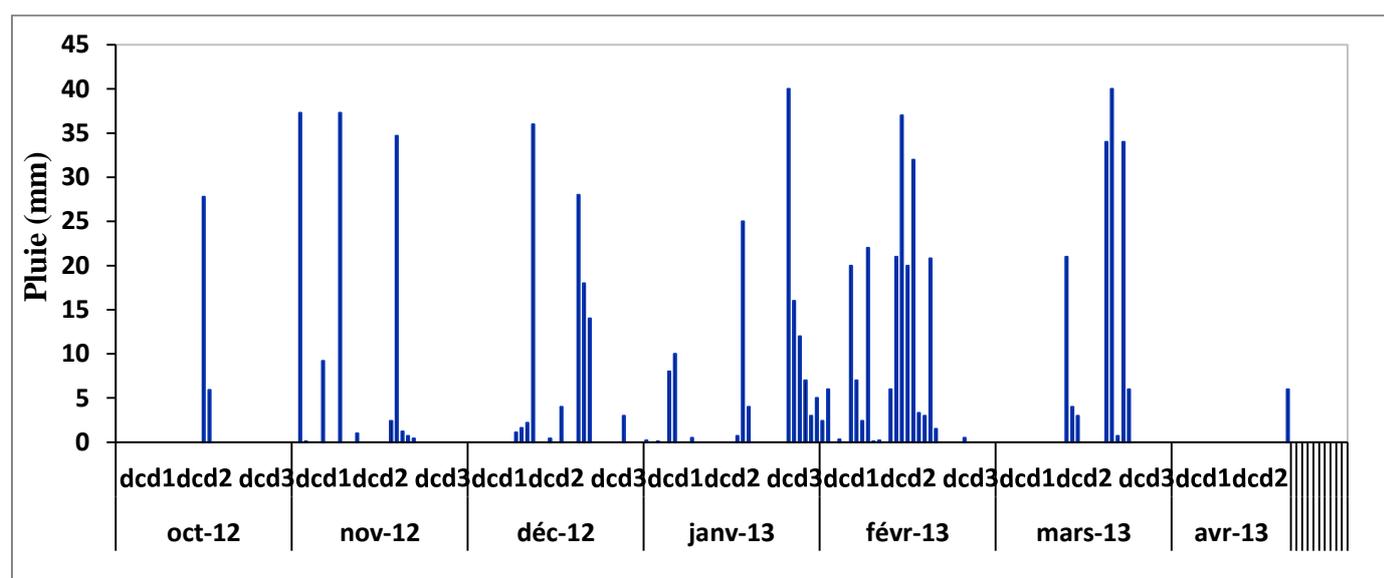
Les pluies se répartissent sur soixante deux jours avec une hauteur totale de 718,6 mm et un maximum journalier de 40 mm. La majorité des événements pluvieux (environ 65 %), ont connu des pluies inférieures à 10 mm alors que les 16 % sont constitués par des pluies supérieures à 30 mm et qui occupent la moitié de la pluviosité totale; et les pluies comprises entre 10 mm et 30 mm représentent 19 % des événements pluvieux.

La figure 9 montre clairement qu'il y a des périodes intermédiaires sans événements et aussi des périodes cycloniques avec des excédents d'eau. Les périodes de plus forte précipitation se

concentrent dans la première décade du mois de novembre (84 mm dont min =9 mm et max =37 mm), deuxième décade du mois de décembre (70 mm avec un maximum de 36 mm), troisième décade du mois de janvier (83 mm avec un maximum de 40 mm), deuxième décade du mois de février (143 mm avec un maximum de 37 mm) et troisième décade du mois de mars (80 mm avec un maximum de 40 mm).

**Tableau 3: Répartition des précipitations avec les jours des pluies**

CAMPAGNE 2012-2013					
Hauteur des pluies (mm)	P<10	10<P<20	20<P<30	30<P<40	TOTAL
Nombre de jours	40	6	6	10	62
Total des pluies (mm)	120,4	100	136,2	362	718,6



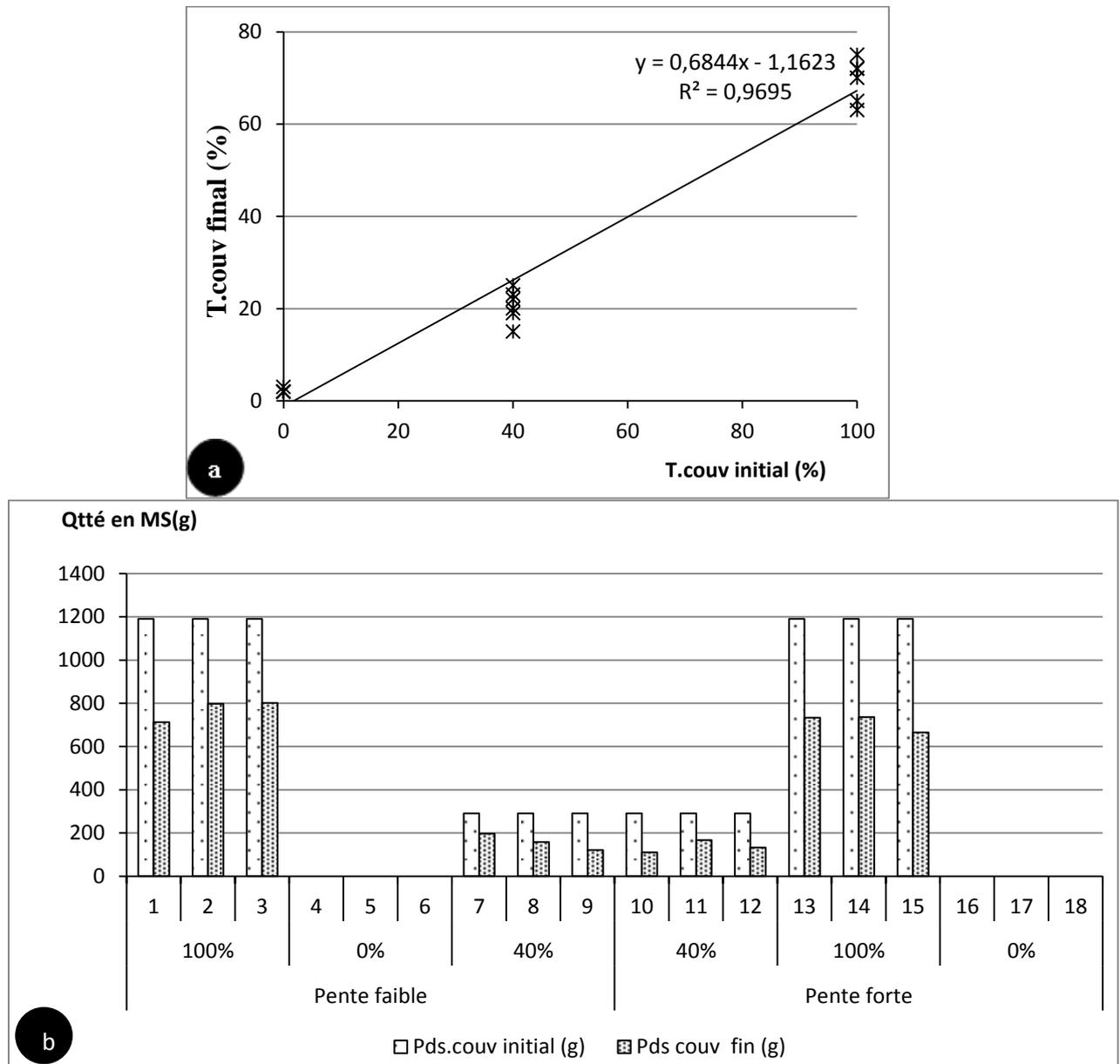
**Figure 9 : Répartition des pluies journalières durant la campagne 2012 – 2013**

### 2.1.3.2 Couverture du sol

- *Dégradation de mulch*

Une forte corrélation est constatée entre le taux de couverture du sol au début et à la fin de la campagne de l'expérimentation (Fig 10.a). D'après la figure 12.b, les quantités de couverture 1200 g.m<sup>2</sup> et 300 g.m<sup>2</sup> mises en place sur les parcelles au début de l'expérimentation deviennent respectivement de 710 g.m<sup>2</sup> (pente forte) à 770 g.m<sup>2</sup> (pente faible) et 148 g.m<sup>2</sup> (pente forte) à 158 g.m<sup>2</sup> (pente faible) à la fin de l'expérimentation. La quantité de paillis

de stylosanthes est réduite de moitié durant la saison des pluies. Sa vitesse de dégradation est de l'ordre de 40 à 60 %, (figure 10.a). L'annexe 6 montre les quantités de pailis sur chaque parcelle au début et à la fin de la campagne.



**Figure 10 : Dégradation de la couverture du sol : a) relation entre les taux de couverture à l'état initial et à l'état final – b) comparaison de la quantité de couverture à l'état initial et à l'état final**

- **Relation entre l'érosion hydrique et le taux de couverture du sol**

Une corrélation négative est observée entre le taux de ruissellement et le taux de couverture du sol. La corrélation est nettement meilleure sur une pente forte où  $R^2=0,92$  que sur une pente faible où  $R^2=0,85$  (fig 11.a). Une tendance similaire a été également constatée entre le

taux de couverture du sol et les pertes en terre avec  $R^2=0,87$  (pente faible) et  $R^2=0,94$  (pente forte) (Fig 11.b).

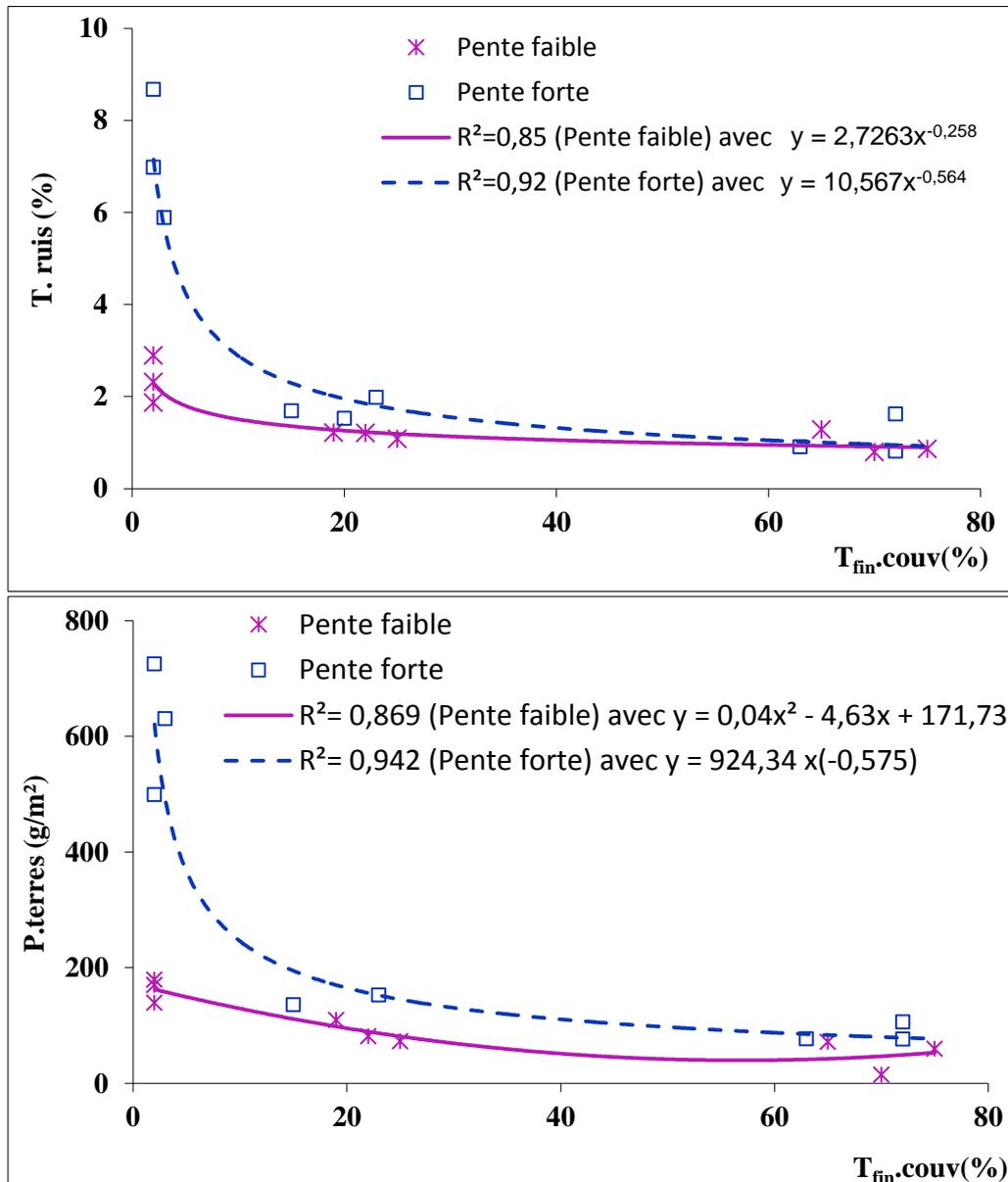


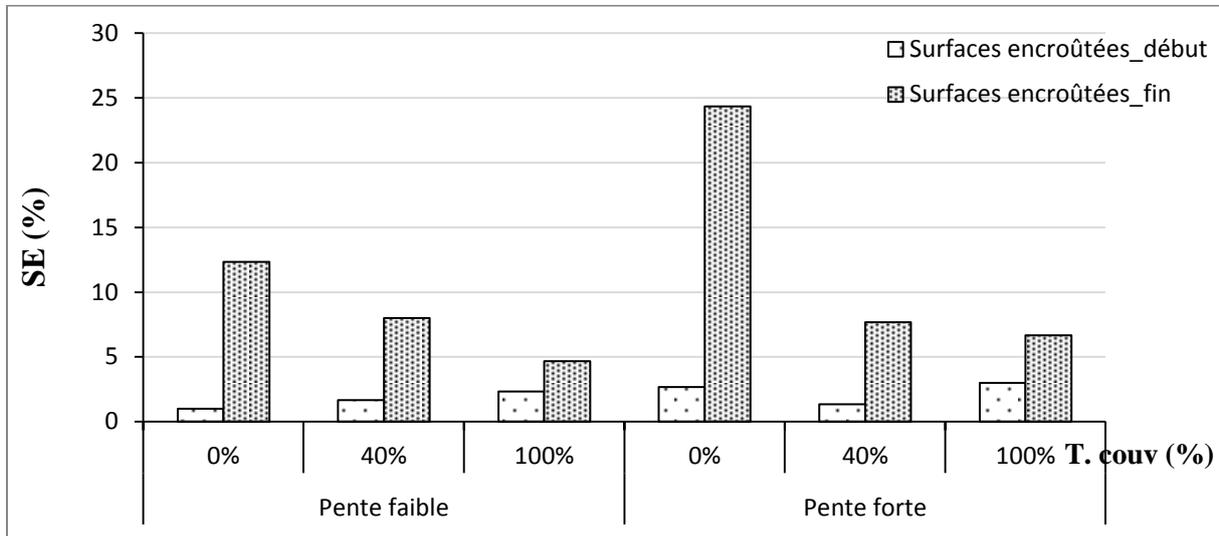
Figure 11 : Relation entre les taux de couverture du sol à l'état final et a) le ruissellement – b) les pertes en terre

### 2.1.3.3 Croûte structurale

- *Formation de croûte en surface*

La figure 12 montre le pourcentage des surfaces encroûtées dans le cadre d'érosion au début et à la fin de la période pluvieuse. Au début, les croûtes en surface estimées sur chaque parcelle varient de 1 à 3%. A la fin de la campagne d'expérimentation elles deviennent deux fois plus importantes sur les parcelles totalement couvertes (100% de paillis), quatre à cinq

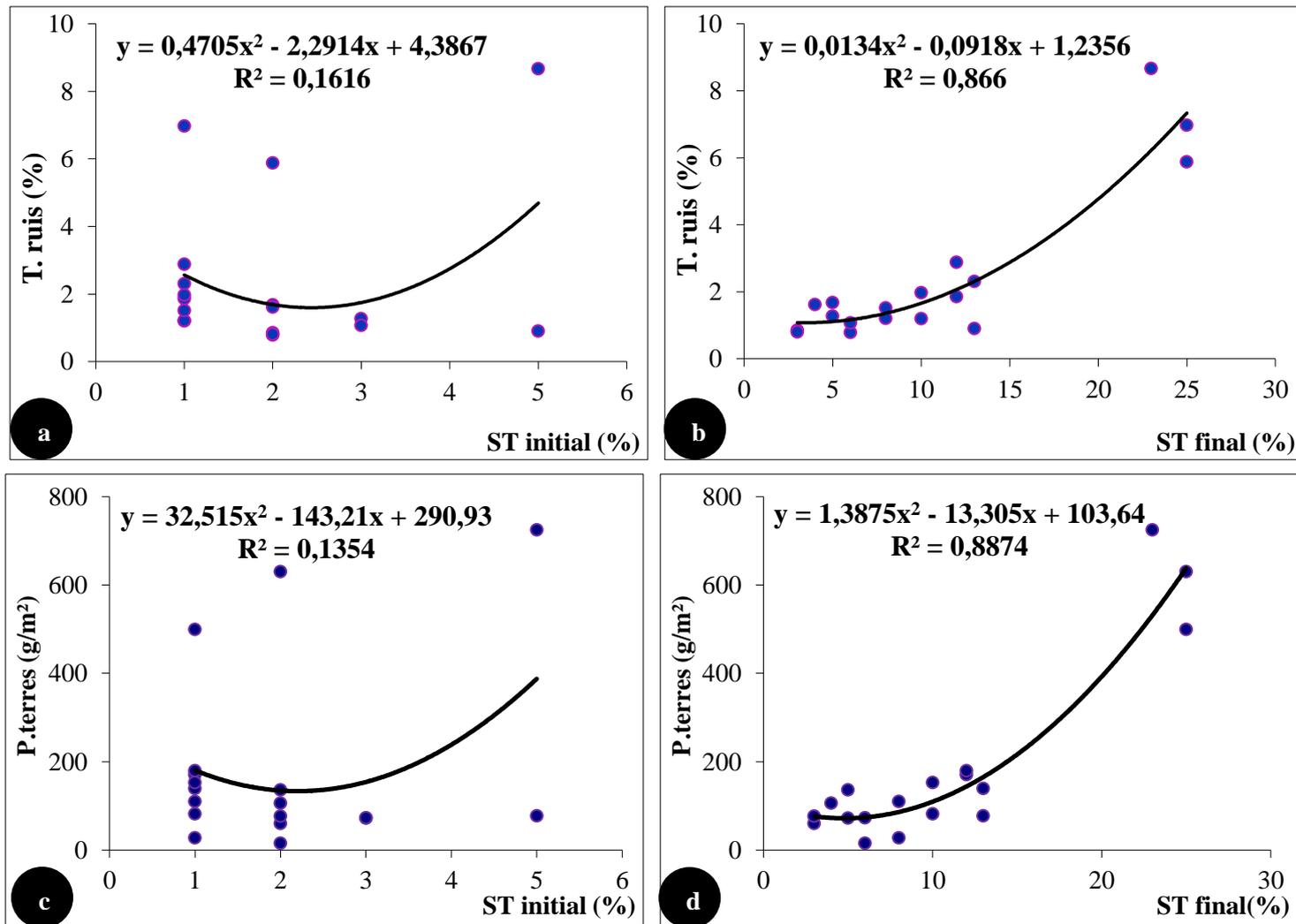
fois plus importantes sur les parcelles couvertes à 40% de stylosanthes; et encore beaucoup plus élevé sur les parcelles sans paillage, une formation de croûte structurale qui atteint jusqu'à dix à douze fois plus importantes a été constatée.



**Figure 12 : Formation des croûtes structurales en surface au début et à la fin de la campagne en fonction de la pente et des taux de couverture du sol**

- **Relation entre l'érosion hydrique et la surface encroûtée**

Le pourcentage des surfaces encroûtées dans le cadre d'érosion augmente avec le taux de ruissellement et les pertes en terre (Fig 13). Au début de l'expérimentation, les croûtes en surface estimées sur les parcelles d'expérimentation donnent une très faible corrélation avec le ruissellement et les pertes en terre avec de coefficients respectifs  $R^2 = 0,16$  (Fig 13.a) et  $R^2 = 0,14$  (Fig 13.c). A la fin de l'expérimentation, la corrélation entre les trois paramètres devient forte, avec  $R^2 = 0,86$  (surface encroûtée et ruissellement) et  $R^2 = 0,88$  (surface encroûtée et pertes en terre) (Fig 13.b et Fig 13.d).



**Figure 13 : Relations entre les taux de ruissellement et les croûtes en surface a) à l'état initial – b) à l'état final et entre les pertes en terre et les croûtes en surface c) à l'état initial – d) à l'état final**

### 2.1.3.4 Construction faunique

Le pourcentage de la surface qui présente une construction faunique estimée sur les parcelles au début et à la fin de l'expérimentation, particulièrement dans le cadre d'érosion, est présenté dans la figure 14.

Sur une pente faible, au début, le pourcentage des surfaces où il y a une construction faunique est plus élevé (2,67% en moyenne) sur de parcelles couvertes de 40% de stylosanthes et sur des parcelles non couvertes que celui observé sur de parcelles couvertes à 100% de stylosanthes (1%). Par contre, à la fin de la campagne, ce pourcentage augmente respectivement à 5% et à 13% sur de parcelles partiellement couvertes (40%) et totalement couvertes (100%) mais diminue à 2% sur de parcelles sans couverture.

Sur une pente forte, une même tendance a été remarquée sur les trois parcelles. La surface qui présente la construction faunique sur des parcelles paillées est la moitié de celle estimée sur les parcelles non paillées au début. Mais à la fin, elle devient deux fois (parcelles à 40% de couverture) et cinq fois (parcelles à 100% de couverture) plus importante par rapport à celle sur de parcelles à 0% de couverture.

La figure 15 présente que le taux du ruissellement et les pertes en terre diminuent de façon exponentielle avec l'augmentation du taux de surface présentant de constructions fauniques.

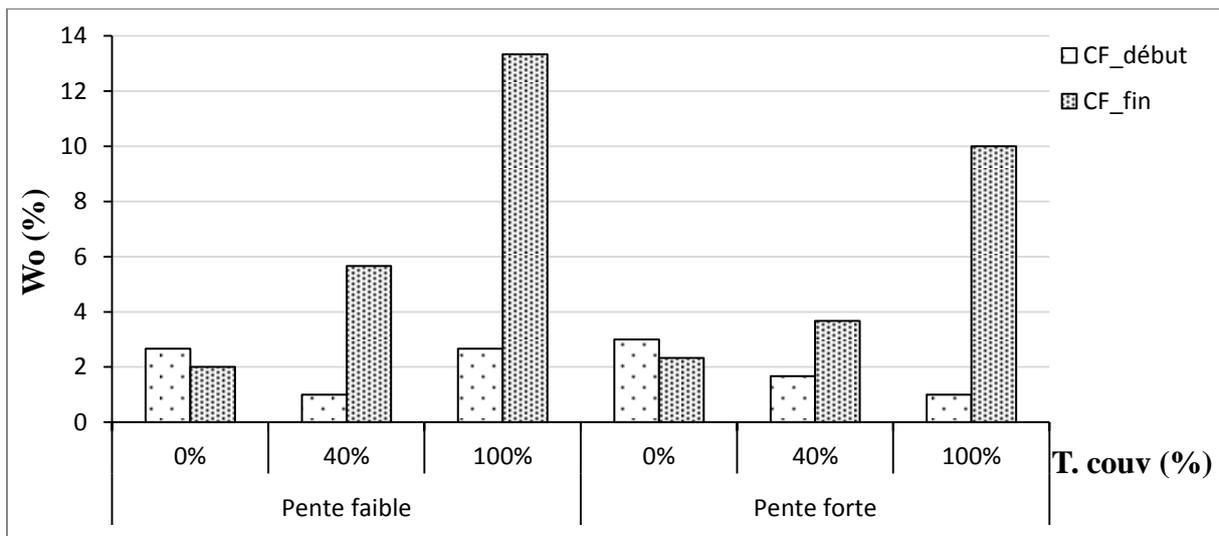


Figure 14 : Pourcentage des surfaces présentant des constructions fauniques en fonction de la pente et des taux de couverture

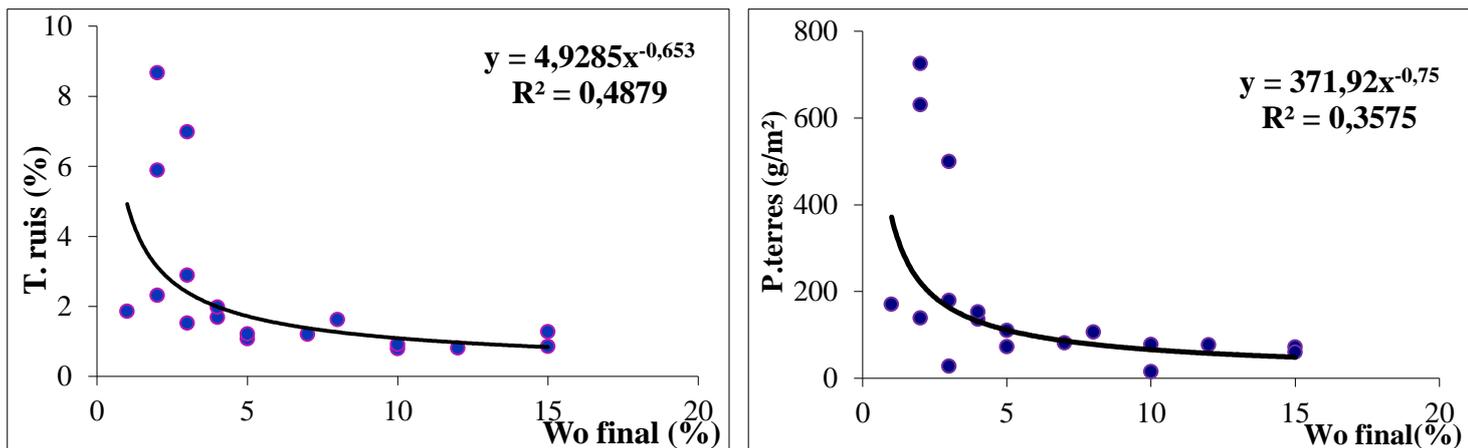


Figure 15 : Relation entre le taux de surface présentant des constructions fauniques et a) le taux de ruissellement – b) les pertes en terre

## 2.2 Discussion

### 2.2.1 Importance de la couverture du sol sur le ruissellement et l'érosion

Les résultats obtenus au cours de cette étude montrent que les parcelles couvertes réduisent d'une manière significative la quantité de la lame d'eau ruisselée. Le taux d'érosion connaît aussi une nette diminution en présence de la couverture végétale. Ces observations sont valables quelles que soient les pentes. Ils rejoignent ainsi fortement ceux trouvés par Ravalisoa (2012) et Laingo (2011) au Lac Alaotra, et ceux de Razafindramanana (2011), Douzet *et al.*, 2010 ; Bardossy *et al.* (2010), Séguy *et al.* (2009), Scopel *et al.* (2004) dans d'autres régions tropicales. La paille qui couvre le sol en permanence contrôle l'érosion (Husson *et al.* 2008). Elle protège le sol contre l'énergie cinétique des gouttes de pluie et ralentit les filets d'eau superficiel. La couverture du sol constitue un écran protecteur de la surface du sol, agit en retardant le début du ruissellement et en diminuant son intensité (Scopel et Findelling, 2001). Ces résultats expliquent ainsi l'importance de la couverture du sol pour contenir le ruissellement et les pertes en terre.

Les résultats de la turbidité mettent en évidence également cette importance de paillis sur l'érosion hydrique. Ils admettent que la capacité de chaque millimètre de ruissellement à arracher et à transporter les sédiments est moins intense sur des parcelles paillées que sur des parcelles non paillées. En effet, le paillis assure la fixation du sol en place et diminue l'agressivité de la nappe ruisselante (énergie cinétique du courant d'eau mobilisateur de particules). Cette moindre énergie cinétique se traduit par moins de transport solide d'origine hydrique. De plus, la couverture végétale piège et retient les sédiments érodés (Rey *et al.*, 2004).

Outre, il est bien clair que les différences de ruissellement ou de pertes en terre ou de la turbidité ne sont pas significatives entre les parcelles couvertes à 40 % et 100 % de stylosanthes, quelle que soit les pentes (§ 2.1.1). Un taux partiel de 40 % de paillis permet alors de réduire considérablement l'érosion hydrique. Cette conclusion rejoint celle d'autres auteurs. McIvor *et al.* (1995) conclue que le seuil du taux de couverture du sol considéré comme nécessaire pour protéger efficacement le sol contre l'érosion hydrique est généralement à partir de 40 %. Roose, 1994, Scopel *et al.* ont avancé en 2005 également que malgré les très faibles quantités de résidus utilisés (1,5 t.ha<sup>-1</sup>), l'impact des semis directs avec paillis sur la lame d'eau ruisselée est considérable. Ils ont ajouté que même si la couverture assurée par les paillis est très imparfaite (moins de 30%), ils contribuent à diminuer l'effet *splash* des gouttes d'eau en amont.

## 2.2.2 Importance de la couverture du sol sur l'humidité du sol

Les résultats indiquent que le stock d'eau moyen mesuré dans une couche de 0 à 70 cm dans le sol est d'environ 250 mm sur des parcelles paillées et de 200 mm sur des parcelles non paillées. Ceux-ci résultent des effets positifs de la couverture du sol sur le maintien de l'eau dans le sol. Cette observation rejoint ainsi celle trouvée par Findeling (2001). Il admet que le taux d'infiltration reste bien plus élevé (+ 20%) sur les traitements paillés.

En premier temps, elle peut être expliquée par la capacité des résidus à former des barrières pour que la lame d'eau en surface circule plus lentement. Ces résidus créent des petites retenues et augmentent la tortuosité de l'écoulement (Scopel *et al.* 2001, Findeling, 2001). Ceci donne plus de temps pour que l'eau s'infilte dans le sol. La couverture du sol assure ainsi la contention continue des eaux de ruissellement et c'est l'effet peigne (Roose, 1994).

En deuxième temps, ce maintien d'humidité du sol peut être expliqué également par la capacité des résidus à jouer le rôle de la couverture thermique. D'après Séguy *et al.* en 2009, la couverture protège le sol du rayonnement solaire et limite les pertes de chaleur par rayonnement pendant la nuit. La température du sol sous une couverture végétale est donc tamponnée, l'amplitude thermique y est limitée et l'eau est maintenue dans le sol.

La corrélation positive entre le stock d'eau dans le sol et la pluie moins le ruissellement démontre l'importance du processus de stockage sur la définition de l'eau disponible pour la culture en condition pluviale au Lac Alaotra.

## 2.2.3 Importance des autres facteurs sur le ruissellement, la perte en terre et le maintien de l'eau dans le sol

### 2.2.3.1 Facteur climatique : la pluie

Il est prouvé par ailleurs que la pluie influe également sur le ruissellement et l'érosion hydrique. Chaplot *et al.* (2007), Scopel *et al.* (2004) ont affirmé que le coefficient de ruissellement et d'érosion augmentent avec la pluviométrie. L'érosion hydrique dépend de l'intensité de la pluie qui est la quantité d'eau tombée par unité de temps ( $\text{mm.h}^{-1}$ ), de la durée de la pluie (en h) que la hauteur de la pluie (en l). Les mesures menées sur la même zone d'étude (Lac Alaotra) par Laingo (2011) et Ravalisoa (2012) contribuent à expliquer l'effet de la pluie sur l'érodibilité du sol. Ainsi, la période des fortes pertes en terres, fort ruissellement et forte stock d'eau dans le sol coïncident bien avec les périodes de forte précipitation (Fig 4.a, 5.a, 7.b).

Quand l'intensité des pluies est supérieure à la capacité d'infiltration du sol, l'eau commence à ruisseler (Le Bissonais & Souder, 1995). En effet, les eaux de pluies agissent sur le sol par leur force de frappe et leur énergie cinétique provoque le rejaillissement des particules solides et de l'eau en toutes directions et à la fin le détachement de ces particules (Campy&Macaire, 2003).

En comparant les résultats durant trois ans sur le même dispositif au Lac Alaotra, une différence de ruissellement et de perte en terre sur des années avec des pluies différentes est observée. Avec une pluie totale de 1096 mm en 2012, les quantités de ruissellement et des pertes en terre sur un sol labouré sont respectivement trois et cinq fois plus élevées que celles enregistrés avec une pluie de l'ordre de 637 mm en 2011 et trois et quatre fois plus importante avec une pluie totale de 718 mm (2013). Par contre sur les parcelles de riz pluvial paillée, les valeurs respectives de la lame d'eau ruisselée et les terres érodés sont deux et quatre fois moins avec une faible pluviosité (637 mm) et deux fois moins avec une pluie de 718 mm qu'avec une pluviosité moyenne de 1096 mm. Un tableau de comparaison des résultats de ruissellement et de l'érosion durant les trois années successives (2011, 2012 et 2013) est rapporté en annexe 7. Quand la pluie diminue, les quantités de ruissellement et de pertes en terre diminuent également. Cependant, les taux de diminution ne sont pas les mêmes entre les parcelles paillées et celles non paillées. Ils sont moins importants en systèmes paillés. Cela est expliqué par l'effet très remarquable de la couverture du sol. Bref, la pluie constitue un agent érosif de l'érosion hydrique mais l'effet de la couverture peut atténuer l'impact de cet agent.

### **2.2.3.2 Facteur morphologique : la pente**

Plusieurs recherches ont montré que le ruissellement et l'érosion s'accroissent avec l'augmentation de la pente (Le Bissonais, 2000). De plus sur notre dispositif d'expérimentation, les résultats montrent que lorsque la pente passe de 27 % à 9 %, le ruissellement et l'érosion mesurés sur des parcelles non paillées sont approximativement diminués d'un tiers. Par contre, sur des parcelles paillées, cette diminution n'est pas significative. Il en est de même sur le stock d'eau dans le sol, aucune différence n'est constatée. De ce fait, l'effet pente sur l'érosion hydrique est plus prononcé sur des parcelles sans paillis mais moins intense sur des parcelles où il y a apport de paillis, même à faible quantité. Cette différence met en exergue l'importance de la couverture du sol sur l'érosion hydrique et le stock d'eau dans le sol. L'impact de la pente du terrain sur l'érosion, le ruissellement et l'infiltration d'eau dans le sol est également influencé par la couverture du sol.

### 2.2.3.3 Facteurs sol

Il s'agit surtout de voir l'effet de l'état de la surface du sol (la croûte structurale) et l'effet de l'activité des faunes dans le sol.

Les résultats obtenus à la fin de l'expérimentation montrent que la croûte formée est beaucoup plus élevée sur les parcelles non paillées que sur les parcelles paillées, ce qui n'était pas le cas observé au début de l'expérimentation. Cela peut être due à l'effet de la couverture du sol qui est riche en matière organique et pouvant améliorer la structure du sol. La croûte structurale dépend de la stabilité structurale du sol. Plus le sol est stable, moins il est sensible à la formation de la croûte (Le Bissonais, 2000). Cette stabilité peut être améliorée par apport des matières organiques qui agissent sur les propriétés physiques et chimiques du sol (Razafindrakoto *et al.*, 2008).

Les résultats obtenus montrent l'existence d'une forte corrélation entre le taux du ruissellement, les pertes en terre et le taux de surface encroûtée (§2.1.3.3). S'il y a encroûtement du sol en surface, le ruissellement est fortement augmenté et entraînant d'autant plus des particules solides. Cette conclusion est en accord avec celle de Razafindrakoto *et al.*, (2008), Scopel *et al.* (2005). Ils affirment que la conductivité hydraulique et la stabilité structurale du sol s'accroissent en fonction du taux de la couverture végétale apportée.

Concernant les activités fauniques, il est prouvé par ailleurs qu'elles assurent le fonctionnement biologique du sol et participent à améliorer sa structure en surface. De plus, les résultats de cette présente étude montrent une corrélation négative entre le taux de surface qui présente des constructions fauniques et le taux du ruissellement et les pertes en terre. En modifiant l'agrégation et la porosité du sol, en décomposant la matière organique, ces organismes participent à l'infiltration et au stockage de l'eau dans le sol, à la régulation du ruissellement (Ruellan *et al.*, 2009). Scopel et Findeling (2001) et Findeling (2001) confirment également que l'activité plus importante de la macro-faune maintient une plus forte porosité qui explique la meilleure conductivité de surface que l'on observe sous systèmes SCV.

En outre, les résultats sur l'étude des surfaces au début de la campagne 2012 présentent que la construction faunique est beaucoup plus importante sur les parcelles couvertes que sur les parcelles non couvertes. Ces résultats concordent bien alors à ce que Naudin *et al.*, (2008), Ratnadass *et al.*, (2008) Blanchart *et al.* (2008) et Husson *et al.* (2008) ont trouvé : les systèmes en semis direct sous couverture végétale (mulching) ont un effet positif sur l'amélioration de la diversité faunistique et sur les activités fauniques.

Bref, les effets de la structure du sol et de l'activité faunique sur l'érosion hydrique et sur l'infiltration d'eau dans le sol sont encore influencés pour beaucoup par la couverture du sol.

Cette couverture du sol contribue à la restauration des propriétés biologiques, hydriques et fertilisantes du sol (Tan et Lal, 2005).

#### **2.2.4 Limites de travail**

Cette expérimentation a été menée sur un petit dispositif, les effets de la longueur de la pente, de la force et direction du vent ne sont pas considérés. De plus, la teneur en matière organique qui influe beaucoup sur la stabilité structurale du sol est inconnue. Or, il est nécessaire de tenir compte l'ensemble de tous les paramètres ainsi que de la dynamique spatiale et temporelle des processus décrits afin d'étudier l'érosion et l'infiltration des sols cultivés à une grande échelle. Encore plus, en vue de fournir des données fiables sur l'impact des changements globaux (anthropiques et climatiques) sur l'érosion et l'humidité du sol, il est essentiel de disposer de suivis à long terme (Valentin, 2004, Valentin *et al.*, 2006).

## CONCLUSION

Les études effectuées au Lac Alaotra durant trois ans présentent des effets très positifs des systèmes en semis direct sous couverture végétale permanente du sol sur le contrôle de l'érosion hydrique même si les taux de ruissellement et la quantité des terres perdues sont très faibles par rapport aux résultats des autres études menées dans d'autres lieux. Cette année, les résultats illustrent dans la première partie que la lame ruisselée et les pertes en terres sont très faibles sur des parcelles paillées que sur des parcelles non paillées. Ils diminuent alors avec l'augmentation de la quantité de paillis couvrant le sol, mais à un seuil de 40%. Ainsi, la première hypothèse énonçant que le taux de couverture du sol est en corrélation positive avec la réduction du ruissellement et de l'érosion est partiellement vérifiée. Dans la deuxième partie, ils présentent que l'infiltration de l'eau dans le sol est devenue meilleure sur des parcelles paillées. Outre, l'augmentation de la quantité de l'eau stockée dans le sol n'est plus significative entre 40% et 100%. Cela confirme en une partie la deuxième hypothèse disant que l'humidité du sol augmente avec le taux de couverture du sol. Ainsi, un taux partiel de couverture suffit ainsi de protéger le sol contre l'érosion hydrique et de maintenir l'eau dans le sol. Certes, l'érosion hydrique et le maintien d'eau dans le sol dépendent aussi d'autres paramètres comme les variations climatiques, les caractéristiques du sol, la pente, l'organisation spatiale du paysage à l'échelle du bassin versant, etc. Cette étude expose également la réponse de ces différents facteurs face au ruissellement, à des pertes en terre et au stock d'eau dans le sol. Ainsi, la lame ruisselée et les terres entraînées diminuent très fortement avec la pluie, le degré de la pente et la croûte structurale formée en surface quand les mesures sont effectuées avec des parcelles non paillées. Parallèlement à ces observations, les eaux captées dans le sol augmentent. Par contre, quand les mesures sont réalisées sur des parcelles paillées, les effets de la pente ou de la pluie, ou des structures du sol (par la croûte structurale et les activités fauniques) ne présentent pas de différence significative. Les effets de tous ces facteurs sont encore masqués par ceux, très forts, du couvert végétal. Par conséquent, la troisième hypothèse annonçant que la couverture du sol atténue les effets des autres facteurs sur l'érosion hydrique et sur l'infiltration d'eau dans le sol est vérifiée.

La baisse des quantités de la lame ruisselée, des terres perdues et la faible capacité de chaque millimètre de ruissellement à arracher les sédiments, ainsi que l'amélioration de l'infiltration d'eau dans le sol témoignent de l'adoption avec succès des systèmes en semis direct sous couverture végétale morte permanente. La pratique de paillage prouve tout son intérêt vu sa capacité à agir sur l'érosion hydrique et sur le maintien d'eau dans le sol même à un taux partiel de couverture. Mais face à des limites de ce travail, il mérite d'être amélioré en vue de fournir des données fiables pour convaincre les paysans et leur apporter une solution adéquate au problème de la dégradation du sol et au problème d'eau au Lac Alaotra. Ainsi, il sera intéressant d'élargir et de continuer les études tout en considérant la teneur en matière

organique et en éléments minéraux dans le sol et celle apportée par la culture et la couverture, ainsi que les pertes en ces éléments par érosion. Outre, la détermination de la consommation d'eau par la culture, la détermination des pertes d'eau par évaporation sont également importantes pour élargir l'étude sur le bilan hydrique.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDRE Lucille, BERNARD Camille, BOULANGER Florent, BRUELLE Guillaume, DECROIX Margaux, FABRE Joana, FALCONNIER Gatién, FLEURY Joseph, KONG, Rada, MICHEL Etienne, MIQUEL Marie, PARESYS Lise, RICARD Bertrand, SALANIE Florie, TOPI Mirjan, VALDES Pineda Alejandra, VILLEMAINE Robin, 2010. Erosion et pratiques des agriculteurs du Lac Alaotra : cas de la commune d'Ifafy et de Feramanga. 47pp.
- AFD., 2007. Direct Seeding mulch-based cropping systems (DMC) - An alternative to conventional cropping systems in developing countries. Paris France.
- BADEAU Vincent, BRÉDA Nathalie, 2007. Modélisation du bilan hydrique : l'étape clé de la détermination des paramètres et variables d'entrée. Colloque RENECOFOR, Beaune, 9-11 mai 2007.
- BARDOSSY Andras, BAVEYE Philippe, CHARLET Laurent, GEORGAKAKOS Konstantine P., SYME Geoff, 2010. Journal of hydrology. Vol 390, Issues 3-4, 1 September 2010. ISSN 0022-1694. 13pp.
- BE MARTIAL, RAKOTOZANDRY Lalaina, MAMY NIRINA Caroll Abeddi, RAVALITERA Lanto, CHABALIER, nov 1996. Bilan et évaluation des travaux et réalisation en matière de conservation des sols de la région du Lac Alaotra. 40pp. + annexes.
- BLANCHART Eirc, BARTHES Bernard, BERNOUX Martial, CHAPUIS-LARDY Lydie, CHOTTE Jean-Luc, COQ Sylvain, DOUZET Jean-Marie, FALINIRINA Virginie, FELLER Christian, RABARY Bodovololona, RANDRIAMANANTSOA Richard, RATNADASS Richard, RAZAFIMBELO Tantely, SCOPEL Eric, VILLENAVE Cécile, WEBER Lynn, 2008. Fonctionnement du sol sous SCV au Brésil et à Madagascar : Abondance et rôle des ingénieurs du sol sur la dynamique du carbone du sol. *In Terre Malgache - Tany Malagasy*. ESSA – CID. p.25-28
- BURGAUD Jean Claude, SILVERA Norbert, FAYE, A., 1986. Mesure de l'humidité des sols - Evaluation de la consommation en eau sous couvert de cocotiers à Port-Bouët (IRHO) – Etalonnage neutronique des sols. ORSTOM, Abidjan. 10pp
- CASENAVE Alain, VALENTIN Christian. 1989. Les états de surface de la zone sahélienne : influence sur l'infiltration. Editions de l'ORSTOM, Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en coopération. 229pp
- CAMPY Michel & MACAIRE Jean-Jacques, 2003. Géologie de la surface: érosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux 2eme Edition DUNOD, 440pp.
- CAPILLON, A. & SEGUY Lucien, 2002. Ecosystèmes cultivés et stockage du carbone. Cas des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale. *Compte-rendu de l'Académie d'Agriculture Française* 88: 63-70.
- CHABIERSKI, S., PENOT Eric, HUSSON Olivier, 2008. Determinants of DMC technologies adoption among smallholders in the lake Alaotra area, Madagascar.

- CHAPLOT Vincent, KHAMPASEUTH, VALENTIN, Christian, LE BISSONNAIS, 2007. Interril erosion in the sloping lands of northern Laos subjected to shifting cultivation.
- Collectif « SOL-SCV » (GSDM, IRD, CIRAD, TAFA, FOFIFA), 2008. Sols tropicaux, Pratiques SCV, Services écosystémiques. 37pp.
- DOUZET Jean-Marie, MULLER Bertrand, SCOPEL Eric, ALBRECHT Alain, RAKOTOARISOA Jacqueline, RAKOTOALIBERA Haingo, 2008. Réduction du ruissellement et de l'érosion par les systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale pour les cultures pluviales des Hautes terres malgaches. *In* Terre Malgache - Tany Malagasy. ESSA – CID. p. 99-102
- DOUZET Jean-Marie, SCOPEL Eric, MULLER B, RAKOTOARISOA Jacqueline, ALBRECHT Alain, RAZAFINDRAMANANA Norosoa, 2010. Effets des systèmes de cultures en semis direct avec couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des cultures pluviales des Hautes Terres de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols*, Vol 17,2, 2010 – p.131-142 ; Accepté : oct 2009
- FIDA, 2006. Synthèse des résultats de l'enquête FIDA sur les Moyens d'existence durable des paysans pauvres pour l'Exposé des Options et Stratégies d'Intervention pour le pays (COSOP). Avril-Mai 2006
- FINDELING Antoine, 2001. Etude et modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azote d'une culture de maïs pluvial au Mexique. Thèse de Doctorat en Agronomie à l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech), 355 pp.
- FOFIFA, Déc 1991. Station Agronomique du Lac Alaotra, 12pp.
- FOX Dennis, CARREGA Pierre, MORSCHEL Jean, EMSELLEM Karine, EQUIPE TICE, 2008. La dégradation des sols dans le monde. *In* [unt.unice.fr/uoh/degsol/facteurs-erosion.php](http://unt.unice.fr/uoh/degsol/facteurs-erosion.php)
- GTDR : Groupe de Travail pour le Développement Rural Alaotra – Mangoro, 2010. Alaotra Mangoro – exportatrice de riz et berceau de la nature. 80pp.+annexes  
[horizon.documentation.ird.fr/exl.../010039083.pdf](http://horizon.documentation.ird.fr/exl.../010039083.pdf) V.
- HUSSON Olivier, CHARPENTIER Hubert, NAUDIN Krishna, RAZANAMPARANY Célestin, MOUSSA Narcisse, MICHELLON Roger, ANDRIANASOLO, RAZAFINTSALAMA Hubert, RAKOTOARINIVO Christian, RAKOTONDRAMANANA, ENJALRIC Frank, SEGUY Lucien, Sept 2009. Le choix des cultures, associations et successions adaptées aux contraintes agro-climatiques. Vol II. Chap 1. 24pp.
- HUSSON Olivier, RAYMOND Boucher, RAKOTONDRAMANANA, SEGUY Lucien, 2008. Le semis direct sur couverture végétale permanente (SCV) – Comment ça marche ? pp.53
- KLEIN Henri-Dominique, CESAR Jean, 1999 . Plantes fourragères et maintien de la fertilité des sols. p. 321-357
- LAINGO IRINTSOA RASOLOFO, 2011. Caractérisation des effets de la couverture végétale sur le contrôle de l'érosion hydrique et sur la maîtrise de l'émergence des adventices au Lac Alaotra. Mém AGRI - ESSA. 40pp.

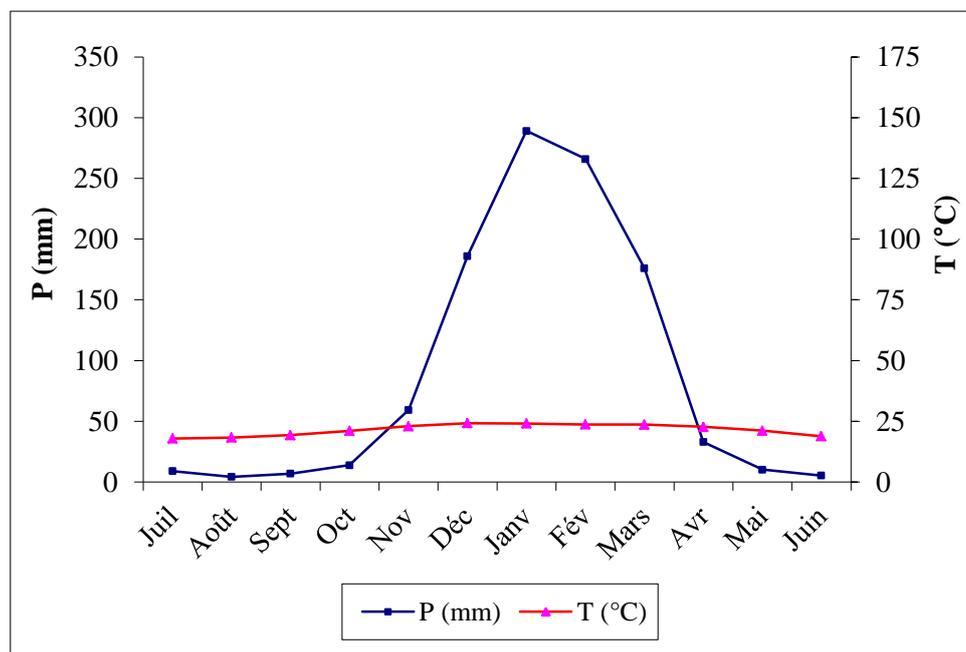
- LE BISSONNAIS Yves, Le Souder, Christine, 1995. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et Gestion des Sols*. p.43-55  
[www.afes.fr/afes/egs/EGS\\_2\\_1\\_bissonnais.pdf](http://www.afes.fr/afes/egs/EGS_2_1_bissonnais.pdf)
- LE BISSONNAIS Yves, 2000. Analyse expérimentale des mécanismes d'érosion: la dégradation structural, superficielle et le détachement des particules des sols cultivés. *ingénierie – EAT n°22* – juin 2000. p.27-36  
[hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/46/40/65/.../2000-PUB00008183.pdf](http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/46/40/65/.../2000-PUB00008183.pdf)
- MCIVOR John-Graham, WILLIAMS John, GARDENER C J, 1995. Pasture management influences runoff and soil movement in the semi-arids tropics. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 35: 55-65.
- MICHEL Vauclin, 1983. L'humidité des sols en hydrologie: intérêt et limites de la télédétection. Institut de Mécanique de Grenoble, BP 68, F-38402 Saint Martin d'Hères Cedex, France. 17pp.
- MOUNIROU Lawani, 2012. Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso : Quantification et transposition des données. Thèse en Science de l'Eau dans l'Environnement Continental et en Science et Technologie de l'eau, l'Energie et l'environnement. 249 pp.
- NAUDIN Krishna, BIKAY Simon, MALDES Jean Michel, BREVAULT Thierry, 2008. Impacts des SCV sur la macrofaune, cas de coton au Nord Cameroun. *In Terre Malgache - Tany Malagasy*. ESSA – CID. p. 149-153
- PENOT Eric, DOMAS Raphaël, ANDRIAMALALA Herilalao, HYAC P, DUPIN Bruce, HUSSON Olivier, 2010. Place et rôle du riz pluvial dans les systèmes de production du lac Alaotra – Les systèmes SCV (semis direct sur couverture végétale permanente): une alternative viable pour une agriculture pluviale durable.
- RATNADASS, Alain, RANDRIAMANANTSOA, Richard, RAJAONERA, Tahina, RAFAMATANANTSOA, Emile, RAMAHANDRY, Fidiniaina, RAMAROFIDY, Mamonjiniaina, MICHELLON, Roger, 2008. Impacts d'un système de culture à base de riz pluvial et de semis direct sur couverture végétale (SCV) sur la macrofaune du sol à Madagascar, avec référence particulière aux effets sur la production du riz. *In Terre Malgache - Tany Malagasy*. ESSA – CID. p. 39-41
- RATSIVALAKA Simone Randriamanga, 2007. Les conditions socio-économiques de la lutte anti-érosive à Madagascar. Journée scientifique inter-réseaux Hanoi 2007. *Gestion intégrée des eaux et des sols*.
- RAVALISOA Rojo, 2012. Estimation de l'effet des systèmes en semis direct sous couverture végétale sur l'érosion hydrique des sols des tanety au Lac ALaotra. *Mém Ingénieur-Agriculture*.43pp.
- RAZAFIMBELO Tantely, 2005. Stockage et protection du carbone dans un sol ferrallitique sous système en semis direct avec couverture végétale des hautes terres malgaches. 120pp. + annexes.

- RAZAFINDRAKOTO Marie Antoinette, RANDRIAMBOAVONJY Jean Chrysostôme, ANDRIAMAMPIANINA Nicolas, 2008. Efficience de diverses techniques biologiques de gestion conservatoire de la fertilité du sol. *In* Terre Malgache - Tany Malagasy. CDI-ESSA. p. 173-175
- RAZAFINDRAMANANA Norosoa Christine, 2011. Contrôle des pertes en terre, en carbone et en nutriments par érosion sous systèmes en semis direct sur couverture végétale permanente des hautes terres centrales malgache. 128pp.
- REMAMY Randzavola Nirina, 2005. Quantification du ruissellement et érosion sur défriche par différents systèmes de culture paysans des Hautes Terres de Madagascar : Labour et semis direct sur couverture végétale permanente de Madagascar. Mém AGRI – ESSA. 55pp.
- REY Freddy, BALLAIS Jean-Louis, MARRE Alain, ROVERA Georges, 2004. Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. Géoscience de surface 336 : 991-998. [www.em-consulte.com/en/article/25867](http://www.em-consulte.com/en/article/25867)
- ROOSE Eric, 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique de la FAO 70. Service des sols-ressources, aménagement et conservation – Division de la mise en valeur des terres et des eaux.
- ROOSE Eric, BARTHES Bernard, SABIR Mohamed, 2004. Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes eu Rif occidental (maroc).
- RUELLAN Alain, BLANCHART Eric, BRAUMAN Alain, GRIMALDI Michel, GRÜNBERGER Olivier, BARBIERO Laurent, CHAPLOT Vincent, MONGA Olivier, BERNOUX Martial, 1999. Les dossiers thématiques de l'IRD. 21pp.
- RUELLAN Allain, POSS Roland, 2009. Les sols pour l'avenir de la planète terre. Brochure réalisée par l'Association française pour l'étude du sol avenue de la Pomme de Pin – BP 20619 - 45166 Olivet cedex. In [www.afes.fr](http://www.afes.fr) . 16pp.
- SCOPEL Eric, FERNANDO A.M., CORBEELS Marc, AFFHOLDER François, MARAUX Florent, 2004. Modeling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. INRA, EDP Sciences, 2004. DOI : 10.105/agro : 2004029. p.383-395. [ftp://ftp.fao.org/agl/.../Modelling\\_crop\\_residues.pdf](ftp://ftp.fao.org/agl/.../Modelling_crop_residues.pdf)
- SCOPEL Eric, FINDELING Antoine, CHAVEZ Guerra, 2005. Impact des techniques semis direct avec paillis sur la réduction de l'érosion et l'évolution des stocks de carbone de maïs pluvial en zones sémi-arides de l'Ouest mexicain. Pp.311 – 321
- SEGUY Lucien, HUSSON Olivier, CHARPENTIER Hubert, BOUZINAC Serge, MICHELLON Roger, CHABANNE André, BOULAKIA Stéphane, TIVET Florent, NAUDIN Krishna., ENJALRIC Frank, RAMAROSON Ignace, RAKOTONDRAMANANA, Oct 2009. Principes et fonctionnement des écosystèmes cultivés en semis direct sur couverture végétale permanente, Vol I. Chap 1. 32pp.

- SERPANTIE Georges, 2009. L'agriculture de conservation à la croisée des chemins en Afrique et à Madagascar. Vertigo – la revue électronique en sciences de l'environnement (en ligne), Volume 9 Numéro 33/ décembre 2009, mis en ligne le 14 déc 2009. URL : <http://vertigo.revues.org/9290> ; DOI : 10.4000/vertigo.9290
- TAN and LAL Rattan 2005. Carbon sequestration potential estimates with changes in land use and tillage practice in Ohio, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 111: 140-152.
- TASSIN Jacques, 1995. Programme de recherche en argoforeserie, sylviculture et conservation des sols au Lac Alaotra. Programme d'appui au projet Imamba-Vakaka, Vallée Sud-Est – Phase II.
- PRD Alaotra Mangoro, Tableau de Bord Environnemental (TBE), 2004. Région Alaotra-Mangoro. ONE/MO/DOC/38/RSEE/ALM. 40pp.
- VALENTIN Christian, HUON Sylvain, DE ROUW Anneke, RIBOLZI Olivier, TIEBAUX Jean-Pierre, CHAPLOT Vincent, RUMPEL Comelia, SENGTAHEUANGHOUNG Oloth, XAYATHIP Kampaseuth, 2008. Ruissellement – infiltration et érosion : Erosion et conservation des sols dans des bassins versants du Laos. *In Terre Malgache - Tany Malagasy*. CDI-ESSA. p. 77-79

**LISTE DES ANNEXES**

<b>Annexe 1</b> : Caractéristiques de la zone d'étude	I
<b>Annexe 2</b> : Caractéristiques de <i>stylosanthes guianensis</i>	VI
<b>Annexe 3</b> : Mesure de la pente à l'aide d'un clisimetre	VI
<b>Annexe 4</b> : Mesure de l'humidite du sol	VII
<b>Annexe 5</b> : Tableau de comparaison des moyennes du ruissellement, pertes en terre, turbidité, stock d'eau dans le sol	VIII
<b>Annexe 6</b> : Quantité de mulch (début et fin de la campagne de l'expérimentation)	VIII
<b>Annexe 7</b> : Comparaison de la quantité de ruissellement et des pertes en terres avec la précipitation au Lac Alaotra (sur la parcelle d'expérimentation au CALA) durant 3 ans	IX

**Annexe 1 : Caractéristiques de la zone d'étude**• **Climat****Courbe ombrothermique de Gaussen (données sur dix ans : 2002-2012)**

Source : Station météorologique du CRR-ME d'Ambohitsilaozana.

**Données climatiques enregistrées durant dix ans (2002-2012) à Ambohitsilaozana****Précipitation**

	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	08-09	09-10	10-11	11-12	
Sept	8,6	8,0	4,9	6,7	1,4	11,3	17,6	3,2		7,7	
Oct	0,9	31,4	0,0	0,1	0,8	11,8	80,7	6,6		6,0	
Nov	44,5	54,2	7,1	57,4	84,7	12,3	233,4	54,7	17,2	28,5	
Déc	389,6	160,4	366,8	221,4	60,5	140,2	106,7	103,9	123,8	186,9	
Janv	485,9	220,2	142,8	138,4	513,9	212,0	239,6	431,4	114,5	404,8	
Précipitation (mm)	Févr	311,2	129,8	484,0	86,3	446,0	409,9	192,0	75,5	200,3	336,9
Mars	135,6	128,2	342,1	107,3	156,1	41,3	219,8	404,9	151,5	76,2	
Avr	3,1	16,3	46,6	13,0	50,5	2,3	146,9	2,6	10,0	42,9	
Mai	8,6	5,2	7,4	4,7	8,0	15,0	7,9	10,3	20,0	4,5	
Juin	4,3	8,2	5,1	8,9	3,3	14,3	1,2	5,8	0,7	1,8	
Juil	4,4	3,0	33,5	6,8	14,0	6,8	1,2	14,4	1,1	5,5	
Août	1,7	2,8	8,4	15,2	2,4	0,6	3,2	4,9	0,1	4,0	
<b>TOTAL</b>	<b>1398,4</b>	<b>767,7</b>	<b>1448,7</b>	<b>666,2</b>	<b>1341,6</b>	<b>877,8</b>	<b>1250,2</b>	<b>1118,2</b>	<b>639,2</b>	<b>1105,7</b>	

<i>Température</i>		02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	08-09	09-10	10-11	11-12
Température min (°C)	Sep	9,5	13,8	13,7	13,5	13,4	13,9	14,3	14,5		13,7
	Oct	14,7	14,7	15,8	14,0	14,6	15,1	15,4	15,5		14,2
	Nov	17,0	16,9	16,9	16,8	17,5	16,5	18,6	17,8		15,0
	Déc	18,9	18,6	18,9	19,0	19,1	18,2	18,1	19,2	18,3	19,5
	Jan	19,9	19,8	19,5	18,5	20,2	19,2	19,4	19,7		20,37
	Fév	19,0	18,9	20,0	19,0	20,0	19,1	18,4	19,5		18,9
	Mars	18,8	18,8	19,7	18,6	18,3	18,1	19,1	19,7	19,1	19,1
	Avr	18,2	16,6	17,4	17,1	16,9	17,3	17,7	17,1	18,1	18,2
	Mai	17,0	14,2	16,2	15,6	16,3	14,6	15,2	16,3	16,33	16,23
	Juin	12,7	12,3	13,9	13,7	12,5	13,3	13,7	15,2	13,93	13,47
Juil	12,2	12,0	12,3	13,1	13,6	12,1	12,9	12,4	12,83	12,6	
Août	11,6	12,3	12,6	12,8	12,8	12,7	13,8	13,3	14	11,13	
Température Max (°C)	Sep	25,0	25,2	26,0	24,2	25,0	24,1	26,4	25,8		25,7
	Oct	26,7	28,3	27,7	26,4	27,0	26,3	27,0	28,0		26,3
	Nov	30,0	29,5	28,8	29,1	29,2	29,6	28,0	29,2		27,0
	Déc	29,0	28,8	28,4	30,2	28,6	30,2	29,1	29,7	30,8	31,6
	Jan	27,6	28,5	29,2	28,4	28,5	28,5	29,3	28,4		28,7
	Fév	28,2	28,6	29,6	28,4	27,9	26,5	28,3	28,5		27,8
	Mars	28,4	27,1	28,8	28,3	28,0	27,3	28,9	28,7	29,2	29,1
	Avr	28,9	27,8	28,4	28,2	26,4	28,0	26,8	28,1	28,77	27,77
	Mai	27,5	25,3	24,9	26,6	26,0	25,1	26,7	27,5	28,53	27,03
	Juin	23,9	23,0	23,8	24,5	23,3	23,3	25,3	24,8	25,6	24,13
Juil	22,7	23,8	22,6	22,6	23,1	22,4	22,8	22,9	25,1	24,57	
Août	23,6	24,2	22,8	24,0	23,8	23,9	24,1	23,2	27,3	22,73	
Température Moyenne (°C)	Sept	17,3	19,5	19,8	18,8	19,2	19,0	20,4	20,2		19,7
	Oct	20,7	21,5	21,8	20,2	20,8	20,7	21,2	21,7		20,3
	Nov	23,5	23,2	22,9	23,0	23,4	23,0	23,3	23,5		21,0
	Déc	23,9	23,7	23,7	24,6	23,9	24,2	23,6	24,5	24,6	25,6
	Janv	23,7	24,1	24,4	23,4	24,4	23,8	24,4	24,0		24,5
	Févr	23,6	23,7	24,8	23,7	23,9	22,8	23,3	24,0		23,3
	Mars	23,6	23,0	24,2	23,5	23,1	22,7	24,0	24,2	24,2	24,1
	Avr	23,6	22,2	22,9	22,6	21,7	22,7	22,2	22,6	23,43	23,0
	Mai	22,2	19,8	20,6	21,1	21,2	19,9	21,0	21,9	22,43	21,6
	Juin	18,3	17,7	18,8	19,1	17,9	18,3	19,5	20,0	19,77	18,8
Juil	17,4	17,9	17,5	17,9	18,3	17,3	17,9	17,7	18,97	18,6	
Août	17,6	18,3	17,7	18,4	18,3	18,3	19,0	18,2	20,65	16,93	

- **Relief et utilisation du sol**

Le Nord de la région est occupé par des cuvettes lacustres (Alaotra, Andilamena et Didy) qui alternent avec de vastes plateaux intermédiaires d'altitude moyenne de 700 mètres (enquête FIDA, 2006). La dépression de l'Alaotra couvre, avec ses digitations, près de 190.000 ha. Les

zones basses sont composées par les marais appelées « *Zetra* » et les eaux libres de l'Alaotra et d'Antsomangana. Les bassins versants s'étendent sur 7.600 km<sup>2</sup> (Fofifa, 1991). Ils sont très fragilisés par les fréquents feux de brousse et sont actuellement le siège d'importants phénomènes d'érosion, qui se caractérisent par les *lavakas* (enquête FIDA, 2006).

La plaine est réservée principalement à la riziculture et aux diverses cultures de contre saison. Les bas-fonds sont utilisés pour des cultures vivrières telles le maïs, le manioc et des légumineuses comme la tomate, l'aubergine, etc. Les *baiboho* situé au bord du lac est également exploités par les paysans, ils cultivent du riz, appelée localement « *vary jebo* ». Ce type d'exploitation connaît un grand essor. En effet, la surface cultivée est doublée ou même triplée par rapport à celle qui était cultivée il avait cinq ans passé. La culture se fait en contre saison, durant la saison sèche (*com. pers avec les paysans*).

Le relief est généralement accidenté, le phénomène d'érosion s'accroît toujours et cause de problèmes d'ordre environnemental. En effet, les pertes en terres importantes par érosion vont combler les cours d'eau et ceci va avoir des impacts négatifs sur la production halieutiques d'Alaotra, cependant les ressources halieutiques constituent une source importante de revenus pour les paysans de la région.

- **Sol**

Les sols de la Région d'Alaotra varient suivant le terroir. Les plaines sont généralement riches, humifères et profonds. Ils sont d'origine alluviale (*sols alluvionnaires*), appelé communément « *baiboho* » bordant la cuvette du Lac Alaotra. Ils conviennent particulièrement aux rizicultures. Par suite du phénomène d'érosion, des sols tourbeux et des sols hydromorphes moyennement organique, à texture très argileuse fine se développent dans les rizières. Les alluvions restent dans les environs des grands fleuves et sur les parties basses où il y a écoulement des eaux du ruissellement.

D'après M. Roche, ancien pédologue de la station agronomique d'Ambohitsilaozana et d'après l'analyse effectuée par Velly, chimiste dans le même centre, en 1957, les sols de bas de pente sont formés de colluvions rouges, colluvions beiges micacés, colluvions jaunes sableux, et colluvions jaunes limoneux, de pH allant de 5,1 à 6,4; les vallées et les berges de rivières montrent des sols alluvionnaires fluviatiles d'origine latéritique, de pH variant de 5,1 à 7,5.

Les *tanety* présentent des argiles latéritiques plus ou moins carencées en potasse, de pH varie de 5,7 à 6,3, et les terrasses des alluvions jaunes anciennes d'origine lacustre (M.Roche et Velly, 1957). Actuellement, des sols ferrallitiques jaunes et rouges sont observés sur *tanety* du

fait de phénomène d'érosion (PRD, 2005). En définitive, des vastes superficies cultivables, plus particulièrement les *tanety*, sont devenues pauvres et dégradées.

- **Activités agricoles**

Alaotra-Mangoro est une région à vocation agricole. La majorité de la population est constituée par des agriculteurs et/ou des éleveurs (GTDR, 2010). Le riz reste toujours la principale culture suivie par les autres cultures vivrières comme le manioc (175 000 tonnes/an), la pomme de terre (49 000 tonnes/an), le maïs (50 000 tonnes/an) et la canne à sucre (50 000 tonnes/an) (FIDA, 2006). A part l'agriculture, l'élevage tient une place importante dans le système de production. L'élevage bovin avec 264 000 têtes des bovidés (GTDR, 2010), est très important dans la région. Il est employé à des diverses opérations agricoles telles que le travail du sol, le transport agricole. Ils fournissent aussi des fertilisants pour le sol cultivé et représentent un capital en viande. L'élevage ovin ainsi que l'apiculture se sont particulièrement développés en réponse aux ravages de l'épidémie de peste porcine africaine. L'élevage des volailles aident les paysans à des périodes les plus difficiles comme la maladie, le repiquage qui demande une somme importante d'argent (*communication personnelle avec les paysans*).

La majorité des agriculteurs utilise maintenant des matériels motorisés pour le travail du sol et le transport agricole. En plus, différents matériels agricoles et diverses techniques de culture sont déjà introduits dans la région par les projets qui y ont existés tels que le projet BVlac par la vulgarisation du semoir canne planteuse, par la vulgarisation des systèmes SCV au travers de divers opérateurs locaux (SDMad, BRL, AVSF, BEST, etc).

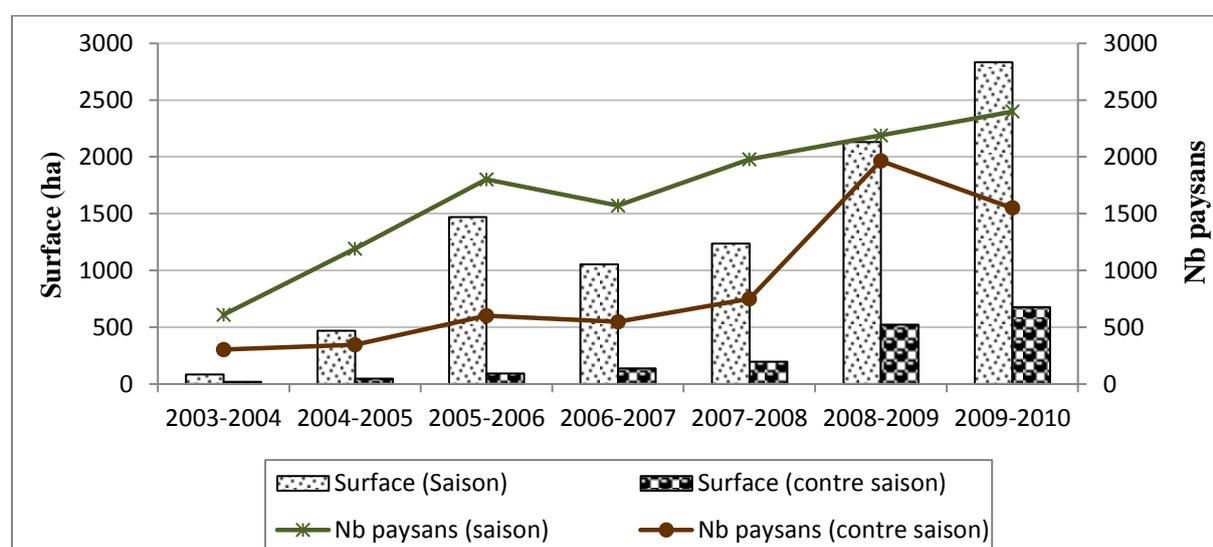
Au vu de ces activités sus-évoquées, les sols constituent un des patrimoines qui méritent d'être protégés et conservés. Les problèmes majeurs tels que la manque d'eau devront être ainsi une priorité des paysans et de l'Etat. L'utilisation de plantes de couverture qui intègrent à la fois la production agricole et la production animale s'avère être intéressante. En effet, elle a une capacité d'augmenter la teneur en matière organique du sol (Razafimbelo, 2005), d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol afin de lutter contre la dégradation de ce dernier (Collectif SOL-SCV, 2008). Actuellement, les systèmes SCV sont des systèmes très vulgarisés au Lac Alaotra.

- **Pratique des systèmes SCV au Lac Alaotra**

Les surfaces en SCV n'ont cessé de croître dans la zone Nord-Est de Madagascar entre les campagnes culturales 2003 à 2010. La figure 3 montre l'évolution des superficies en SCV et du nombre des paysans adoptant ces systèmes au Lac Alaotra. Pour les deux cas étudiés, la

culture de saison et celle de contre saison, par rapport à la superficie en SCV, l'augmentation du nombre d'adoptants est supérieure à celle de la superficie en SCV, à l'exception de deux dernières années pour la culture de saison. Il faut remarquer que cette augmentation est inégale, elle varie suivant les zones considérées.

Malgré cette nette évolution de la surface cultivée en SCV, la surface en SCV peut être considérée comme très faible, voire négligeable (1,49 %) par rapport à la surface cultivée totale de la région. Les systèmes SCV sont encore mal connus par beaucoup des paysans du Lac Alaotra. Or la majorité des terres agricoles présentent des risques importants d'érosion qui peuvent notamment compromettre le maintien de la fertilité des sols (Chabierski *et al.*, 2008).



**Evolution de surface en SCV et du nombre des paysans adoptant le SCV au Lac Alaotra (a) : cas de saison de culture – (b) : cas de contre saison**

Source : Rasolomanjaka, Expert SCV au BVIac détaché par GSDM

#### Surface en SCV au Lac Alaotra et nombre des paysans adoptants

Phase projet	Campagne agricole	SAISON		CONTRE SAISON	
		Surface (ha)	Nb paysans	Surface (ha)	Nb paysans
I	2003-2004	83	609	20	302
I	2004-2005	470	1191	46	344
I	2005-2006	1469	1801	91	600
I	2006-2007	1054	1570	138	547
I	2007-2008	1237	1978	195	750
II	2008-2009	2130,4	2189	522	1964
II	2009-2010	2834	2398	677	1549

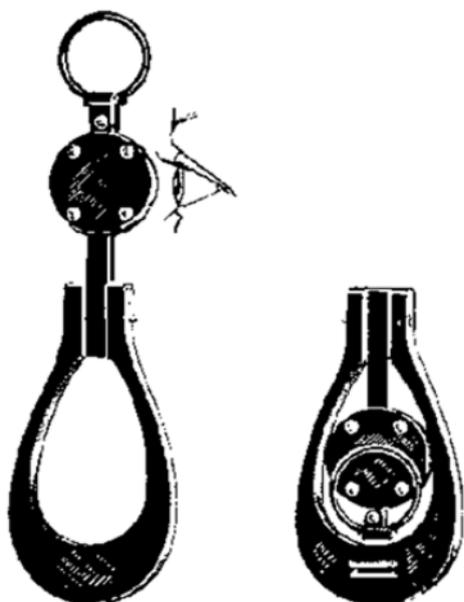
### **Annexe 2 : Caractéristiques de *Stylosanthes guianensis***



*Le Stylosanthes guianensis* est une plante pérenne, particulièrement adaptée pour améliorer les jachères car dotée d'un système racinaire puissant et pouvant fixer de grandes quantités d'azote. De plus, elle peut être tuée par un simple décapage et ne nécessite pas un recours aux herbicides, contrairement aux *Brachiaria* sp.

Elle constitue un fourrage de très bonne qualité pour les zébus. Le cultivar CIAT 184, résistant à l'antracnose, est aujourd'hui vulgarisé au Lac Alaotra. Les rendements en riz pluvial obtenus sur reprise de jachère de 1 à 2 ans à base de stylosanthes sont excellents, même à faible dose d'engrais. Le stylosanthes peut être mis en place en culture pure ou en association avec une céréale, du manioc, du pois de terre, etc. pour générer des revenus tout en produisant de la couverture.

### **Annexe 3 : Mesure de la pente à l'aide d'un clisimètre**



Le clisimètre est un instrument simple de mesure des distances horizontales et il permet en outre de mesurer une pente mais ne fournit cependant qu'une valeur approximative dont la marge d'erreur peut atteindre 10 %. Il comporte un dispositif de visée, un anneau de fixation et une masse en forme de poire servant à maintenir le clisimètre en position verticale quand il est suspendu par son anneau.

Pour mesurer la pente, il faut un piquet marqué ou un jalon. Ce piquet est placé en un point sur la pente à mesurer et l'observateur qui tient le clisimètre bien droite doit éloigner de ce point de 10 à 15m. Il suffit ensuite de lire la valeur de la graduation de l'échelle de gauche de collimateur quand la graduation de l'échelle de pente choisie coïncide avec le trait horizontal de la croix jalon.

## **Annexe 4 : Mesure de l'humidité du sol**

### ***Méthode par télédétection***

Il s'agit d'inférer l'humidité par une mesure du rayonnement émis ou réfléchi par la surface du sol. Cette méthode varie suivant les types de spectres utilisés. Le spectre gamma permet d'observer l'humidité du sol à une faible altitude d'environ 150 m. Les domaines spectraux « infra-rouge » offrent une résolution élevée mais ils présentent de complications avec la topographie et la végétation et la réponse à l'humidité est sur quelques centimètres du sol. Par contre les micro-ondes passives et actives restent indépendants de l'atmosphère et de la végétation mais sensibles à la rugosité du sol, et en plus, la résolution spatiale est mauvaise (Michel V, 1983).

### ***Méthode gravimétrique***

Elle consiste à sécher un échantillon de sol dans une étuve réglée à 105°C durant 24 à 48 heures, puis de mesurer le poids de la matière sèche. L'humidité du sol est obtenue à partir de cette formule :

$$H_{\text{sol}} = (P_f - P_i) \times 100/P_i$$

- $H_{\text{sol}}$  : humidité du sol, exprimée en pourcent
- $P_i$  : poids de terre humide (fraîchement recueillis sur terrain)
- $P_f$  : poids de terre après étuvage à 105°C

C'est une méthode de référence, mais elle demande beaucoup de temps et coûteuse.

### ***Méthode capacimétrique***

C'est une méthode électromagnétique économique mais au volume d'influence limité (1 à 2 cm autour des pointes du capteur) et influencée par le type de sol, la température et la salinité.

### ***Méthode par tensiomètre***

Elle consiste à utiliser deux cylindres de 40 cm dont l'un est rempli par de terre humide et l'autre par de terres sèches. Puis mettre en place les tensiomètres dans le sol à environ 30 cm. Elle est plus facile à utiliser mais ne donne pas de valeur précise de l'humidité du sol.

**Annexe 5 : Tableau de comparaison des moyennes du ruissellement, pertes en terre, turbidité, stock d'eau dans le sol**

	Pente faible			Pente forte		
	0%	40%	100%	0%	40%	100%
<b>Ruissellement (mm)</b>	13,74 C	6,80 AB	5,68 A	41,91 D	10,09 BC	6,50 AB
<b>Pertes en terre (g.m<sup>-2</sup>)</b>	163,04 C	88,04 AB	49,07 A	618,44 D	105,46 AB	86,80 AB
<b>Turbidité (g.l<sup>-1</sup>)</b>	463,76 C	343,29 AB	216,14 A	759,59 D	357,40 B	348,34 B
<b>Stock d'eau (mm)</b>	212,71 B	251,68 A	244,69 A	196,12 B	235,49 A	245,15 A

**Annexe 6 : Quantité de mulch (début et fin de la campagne de l'expérimentation)**

Pente	Taux de couverture	Plot	Taux d'humidité au début (%)	Pds stylo début (g)	Taux d'humidité fin (%)	Pds stlo fin (g)
Pente faible	100%	1	10	1200	12,73	724,90
		2	10	1200	12,73	809,90
		3	10	1200	12,73	813,80
	0%	4	10	0	12,73	0,00
		5	10	0	12,73	0,00
		6	10	0	12,73	0,00
	40%	7	10	300	12,73	208,70
		8	10	300	12,73	170,90
		9	10	300	12,73	133,30
Pente forte	40%	10	10	300	12,73	122,70
		11	10	300	12,73	179,10
		12	10	300	12,73	145,10
	100%	13	10	1200	12,73	746,40
		14	10	1200	12,73	748,50
		15	10	1200	12,73	677,80
	0%	16	10	0	12,73	0,00
		17	10	0	12,73	0,00
		18	10	0	12,73	0,00

**Annexe 7 : Comparaison de la quantité de ruissellement et des pertes en terres avec la précipitation au Lac Alaotra (sur la parcelle d'expérimentation au CALA) durant trois ans**

Année	Pente	Traitement	Précipitation (mm)	Ruissellement (mm)	Pertes en terre (t.ha <sup>-1</sup> )
2010-2011	Faible	Riz sans paillage	637,3	13,23	1,06
		Riz avec paillage		9,19	0,43
	Forte	Riz sans paillage		39,21	2,35
		Riz avec paillage		11,90	0,55
2011-2012	Faible	Riz sans paillage	1096	52,65	7,8
		Riz avec paillage		17,29	2,2
	Forte	Riz sans paillage		103	14,46
		Riz avec paillage		25,34	2,41
2012-2013	Faible	Riz sans paillage	718,6	13,74	1,63
		Riz avec paillage		6,8	0,88
	Forte	Riz sans paillage		41,91	6,2
		Riz avec paillage		10,09	1,05