

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

J.-M. Douzet⁽¹⁾, E. Scopel⁽²⁾, B. Muller⁽³⁾, J. Rakotoarisoa⁽⁴⁾, A. Albrecht⁽⁵⁾ et N.C. Drazafindramanana⁽⁵⁾

- 1) Centre de Coopération Internationale en recherche Agronomique pour le Développement CIRAD, Département PERSYST, UR SCA, SCRiD, BP 230 Antsirabe 110, Madagascar - jean-marie.douzet@cirad.fr
- 2) Centre de Coopération Internationale en recherche Agronomique pour le Développement CIRAD, Département PERSYST, UR SCA, SCRiD, BP 853, Antananarivo, Madagascar
- 3) Centre de Coopération Internationale en recherche Agronomique pour le Développement - CIRAD, Département BIOS, UR AIVA 34398 Montpellier Cedex 5, France, AfricaRice, Sahel Regional Station, BP 96 St Louis, Sénégal
- 4) FOFIFA UR SCRiD, Département de Recherche Rizicole, BP 1769, Antananarivo 101, Madagascar
- 5) Institut de Recherche pour le Développement - IRD, Département DRV, UMR Eco&Sols, BP 434, Antananarivo 101, Madagascar

RÉSUMÉ

Sur les Hautes Terres malgaches, en climat tropical d'altitude, l'érosion est un problème important pour la durabilité des systèmes de culture des pentes cultivées en pluvial. La gestion des sols cultivés a une influence importante sur les phénomènes de ruissellement et d'érosion à la parcelle. Une expérimentation de longue durée a été installée il y a 3 ans à proximité d'Antsirabe, à 1 650 m d'altitude, afin de quantifier les effets des systèmes de culture en semis direct sur couverture végétale permanente (SCV) sur le ruissellement et l'érosion, en comparaison aux systèmes en labour traditionnel. L'expérimentation principale, à Andranomanelatra, est constituée de 5 systèmes de culture différents, avec 3 répétitions par système. Ces systèmes sont basés sur une rotation maïs + haricot/riz, avec labour ou SCV, enfouissement ou exportation de résidus sous labour, et remplacement ou non du haricot par une plante de couverture, *Brachiaria ruziziensis*. Outre ce dispositif principal installé sur une jachère de 10 ans, avec une pente commune de 10 à 13 %, des lots supplémentaires ont été installés à plus court terme sur les parcelles d'un essai de longue durée (SCV et labours de 11 ans) et sur quelques parcelles paysannes, afin d'élargir le spectre des variations étudiées (pente, gestion des sols et des cultures). Les résultats des trois premières campagnes confirment les résultats positifs des SCV sur la diminution du ruissellement et de l'érosion : les coefficients de ruissellement restent faibles, inférieurs à 15 %, malgré une pluviométrie moyenne de plus de 1 300 mm et des événements pluvieux parfois violents ; ces coefficients sont divisés par un facteur allant de 3 à 10 selon les campagnes et les systèmes ; les pertes en terre, qui peuvent aller jusqu'à 25 t ha⁻¹ an⁻¹ sur les parcelles labourées, n'ont été que de quelques centaines de kg par hectare et par an sur les parcelles en SCV. Cet effet de diminution des pertes en terre est dû au recouvrement des parcelles avec une protection du sol contre l'effet érosif de la pluie. En effet, la turbidité des ruissellements reste faible sur les SCV, et diminue au cours de la campagne, avec la croissance des cultures, sur les parcelles labourées. D'autres facteurs peuvent être pris en compte, comme les propriétés physiques des sols, modifiées à la fois par les labours et les restitutions ou non de résidus. Ainsi, la vitesse d'infiltration de l'eau semble significativement supérieure sous SCV.

Mots clés

Semis direct, ruissellement, érosion, taux de couverture, infiltration, turbidité, Madagascar

SUMMARY**EFFECTS OF DIRECT SEEDING MULCH-BASED CROPPING SYSTEMS ON WATER RUNOFF AND EROSION UNDER RAINFED CONDITIONS IN THE HIGHLANDS OF MADAGASCAR**

In the Malagasy highlands, under altitude tropical climate, erosion is an important problem for the durability of the upland cropping systems of the hills. The management practices of cultivated soils are affecting runoff and erosion at plot level. A long-term experiment was settled 3 years ago near Antsirabe, 1 650 m of height, to quantify the effects of the direct seeding mulch-based cropping systems (DMC) on runoff and erosion, in comparison to the systems with conventional tillage. The main experiment, in Andranomanelatra, is constituted by 5 different cropping systems, with 3 replications per system. These systems are based on an annual rotation of maize + common bean and rice, with tillage or DMC, burial or exportation of residues for tillage, and replacement or not of the bean by a cover plant, *Brachiaria ruziziensis*. Besides this main experiment settled on a 10 years fallow, with a common slope from 10 to 13 %, supplementary plots were put in shorter term on the plots of a long-term experiment (DMC and tillage for 11 years) and on some farmers fields, to widen the range of the studied conditions (slope, soil management and crops). The results of the first three growing periods confirm the effect of the DMC on the decrease of runoff and soil loss: the runoff rates stay low, lower than 15 %, in spite of an average annual rainfall of over 1 300 mm and some intense rainfalls; these rates are divided by 3 to 10 according to growing periods and systems; soil loss, which can go to 25 t ha⁻¹ year⁻¹ on the tillage plots were reduced from the first year to some hundreds of kg by hectare and year on the DMC plots. One of the main causes is the mulch cover of the plots, and thus the protection of the soil against the erosive effect of the rain. Indeed, runoff turbidity stays low on the DMC plots, and decreases during the growing period on the tillage plots. Other causes are important, as the soil physical properties, modified both by tillage and DMC and residue exportation or not. So, water infiltration rate seems significantly greater under DMC.

Key-words

No-tillage, runoff, soil loss, cover rate, infiltration, turbidity, Madagascar.

RESUMEN**EFFECTOS DE SISTEMAS DE CULTIVOS EN SIEMBRA DIRECTA CON COBERTURA VEGETAL SOBRE EL ESCURRIMIENTO Y LA EROSIÓN DE CULTIVOS PLUVIALES EN LAS ALTAS TIERRAS DE MADAGASCAR.**

Sobre las Altas Tierras malgaches, en clima tropical de altitud, la erosión está un problema importante para la sostenibilidad de los sistemas de cultivo instalados en pendientes, cultivadas con agua pluvial. El manejo de los suelos cultivados tiene una influencia importante sobre los fenómenos de escurrimiento y de erosión de la parcela. Se instalo hace 3 anos una experimentación de larga duración a proximidad de Antsirabe, a 1 650 m de altitud, con el fin de cuantificar los efectos de sistemas de cultivo en siembra directa con cobertura permanente (SCV) sobre el escurrimiento y la erosión, en comparación a los sistemas en labranza tradicional. La experimentación principal, a Andranomanelatra, está constituida de 5 sistemas de cultivo diferentes, con 3 repeticiones por sistema. Estos sistemas están basados sobre una rotación maíz + frijol/arroz, con labranza o SCV, enterramiento o exportación de los residuos en labranza, y sustitución o no del frijol por una planta de cobertura, *Brachiaria ruziziensis*. Además de este dispositivo principal instalado en un barbecho de 10 años, con una pendiente común de 10 a 13 %, se instalaron lotes suplementarios a corto plazo sobre las parcelas de un ensayo de larga duración (SCV y labranzas de 11 años) y sobre algunas parcelas campesinas, con el fin de ampliar el espectro de las variaciones estudiadas (pendiente, manejo de los suelos y de los cultivos). Los resultados de las tres primeras campañas confirman los resultados positivos des SCV sobre la disminución del escurrimiento y de la erosión: los coeficientes de escurrimiento quedan pequeños, inferiores de 15 %, a pesar de una pluviometría media de más de 1 300 mm y de acontecimientos lluviosos a veces violentos; estos coeficientes están divididos por un factor de 3 a 10 según las campañas y los sistemas; las perdidas en tierra que pueden llegar a 25 t ha⁻¹ an⁻¹ sobre las parcelas aradas, fueron solamente algunas centenas de kg por hectárea y por año sobre las parcelas en SCV. Este efecto de disminución de las pérdidas en tierra se debe a la cobertura de las parcelas con una protección del suelo contra el efecto erosivo de la lluvia. En efecto, la turbiedad de los escurrimientos queda pequeña en los SCV, y disminuye a lo largo de la campaña, con el crecimiento de los cultivos, en las parcelas aradas. Se puede tomar en cuenta otros factores como las propiedades físicas de los suelos, modificadas a la vez por las labranzas y las restituciones o no de residuos. Así, la velocidad de infiltración del agua parece significativamente superior con SCV.

Palabras clave

Siembra directa, escurrimiento, erosión, tasa de cobertura, infiltración, turbiedad, Madagascar.

Sur les Hautes Terres de Madagascar, la fragilité des sols et l'intensité des pluies conduisent à un risque d'érosion hydrique important (Bailly *et al.*, 1976; Zebrowski *et al.*, 1973). Si les *lavakas*, une forme d'érosion géologique principalement, sont un phénomène intense (Tassin, 1995), la mise en culture des *tanety* (pentes) avec labour – le plus souvent manuel, à l'*angady* (sorte de bêche) – avec peu d'utilisation d'intrants, entraîne une érosion accrue des versants. La pression foncière sur les rizières de bas fond ou irriguées amène en effet les agriculteurs à cultiver en pluvial de plus en plus de *tanety*, entraînant une érosion hydrique et des pertes en sédiments qui se déposent dans les rizières en contrebas, pouvant à moyen terme causer l'ensablement des dispositifs irrigués et l'abandon à terme de certains périmètres (Martinet, 2007).

Cette région est densément peuplée (169 habitants au km² à Andranomanelatra, en 2003) (Rakotofiringa et Tokarski, 2007), et l'agriculture y reste l'activité principale. Le riz est essentiellement cultivé dans les rizières plus ou moins aménagées des fonds de vallée et de bas-fond. Les *tanety*, terrains non inondables, le plus souvent en pente, à la végétation naturelle graminéenne généralement constituée de *bozaka* (*Aristida* sp.), étaient traditionnellement réservées à du pâturage extensif. Toutefois, devant la pression démographique, la pression foncière sur les rizières s'accroît rapidement et le recours à la mise en culture des *tanety* est de plus en plus généralisé (Michellon et Razanamparany, 2005).

L'importance de la couverture du sol pour limiter les phénomènes de ruissellement et d'érosion hydrique le long de pentes cultivées est reconnue depuis longtemps (Alberts et Neibling, 1994; Le Bissonais *et al.*, 2005; Dunjo *et al.*, 2004). Les systèmes de culture en semis direct avec couverture permanente du sol (SCV), qui ont été mis au point pour Madagascar depuis quelques années par diverses institutions (ONG telles que TAFE, centres de recherche tels que FOFIFA, CIRAD), sont des systèmes de culture qui ne comportent pas de travail du sol: ce dernier reste couvert durant toute l'année par une plante en place (culture principale, culture de couverture en dérobée, culture de couverture permanente) et/ou des résidus de la culture précédente (couverture morte) (Raunet *et al.*, 1998; Seguy *et al.*, 2003). Ces systèmes semblent donc potentiellement bien adaptés pour limiter le ruissellement et lutter contre l'érosion, entre autres avantages pour la durabilité des terres agricoles (Findeling *et al.*, 2003; Gilley et Finkner, 1987; Scopel *et al.*, 2004).

La pratique des SCV pour les cultures pluviales des *tanety* des Hautes Terres malgaches semble donc être une solution prometteuse pour assurer une gestion conservatoire de sols déjà très pauvres chimiquement. Toutefois, les valeurs réelles des quantités d'eau ruisselées comme des quantités de sédiments emportés par l'érosion restent mal connues au niveau des parcelles paysannes, et l'amélioration due à la pratique des SCV reste à quantifier. L'étude que nous présentons ici concerne des sols argileux des Hautes Terres de Madagascar. Les effets

quantitatifs sur le ruissellement et l'érosion de différents systèmes de culture, proches de ceux des cultivateurs malgaches de ces régions, ont été comparés avec des systèmes SCV, à partir d'un dispositif expérimental.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Présentation du milieu

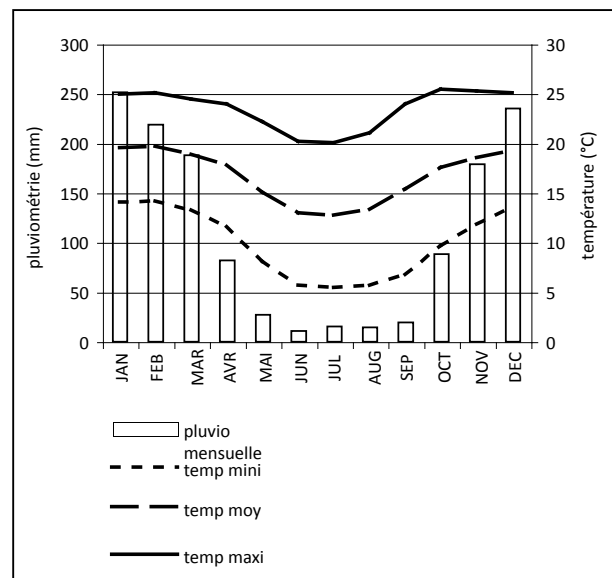
Les parcelles d'expérimentation sont situées à Andranomanelatra (19°53'46" sud, 47°14'48" est, 1645 m d'altitude), à 15 km au nord d'Antsirabe, dans la région des Hautes Terres de Madagascar.

Le climat y est de type tropical d'altitude avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1330 mm (données Météo nationale, 1961-90). Il présente 2 saisons bien marquées. La saison d'octobre à avril est pluvieuse et relativement chaude, la saison de mai à septembre est froide et sèche, avec moins de 90 mm en moyenne sur 5 mois (*figure 1*). La température moyenne annuelle est de 16,6 °C.

Les sols sont développés sur substrat fluvio-lacustre; auparavant classés en Sols ferrallitiques fortement désaturés, ils sont actuellement classés comme andic Dystrustept dans la Soil Taxonomy, ou comme Ferralsol d'après la World Reference Basis (Razafimbelo *et al.*, 2006). Ils sont argileux, pauvres en éléments minéraux, acides, profonds et bien structurés (*tableau 1*). La den-

Figure 1 : Données météorologiques sur 30 ans (1961-1990) à Antsirabe aéroport (Météorologie Nationale, station Antsirabe aéro).

Figure 1 : Meteorological data, 30 years (1961-1990) for Antsirabe airport (National Meteorology, Antsirabe airport station).



sité apparente est inférieure ou égale à 1, quel que soit l'horizon considéré.

Une étude de profil type (Razafimbelo *et al.*, 2006) montre deux sols superposés. Le sol I est de couleur rouge à rouge jaunâtre, à texture argileuse, à assez bonne porosité dans l'ensemble, malgré une couche plus compacte au niveau de l'horizon (B), -50 cm. Le sol II, plus humide et plus foncé, commence vers -110 cm; il est très argileux, avec des traces d'activité biologique (galeries de vers de terre), et une assez bonne porosité.

Présentation du site expérimental

Un dispositif expérimental de mesure du ruissellement et de l'érosion a été mis en place en novembre 2004, sur une grande parcelle en pente de 10 à 13 % initialement en jachère depuis une dizaine d'années. La végétation était essentiellement constituée de graminées de type *cynodon dactylon*.

Les systèmes comparés sont à base de la rotation bisannuelle riz/maïs + haricot, une rotation assez fréquente dans le milieu. On compare des systèmes avec labour conventionnel manuel (profondeur d'environ 25 cm) à l'angady (bêche à fer plat et étroit) à des systèmes en semis direct sur couverture végétale (SCV) pour lesquels les adventices sont contrôlées à l'herbicide avant semis de la culture. Sur labour, les résidus des cultures précédentes peuvent être soit enfouis, soit exportés avant labour. Sur les systèmes en SCV, les résidus des cultures précédentes sont

laissés sur les parcelles, le semis étant effectué manuellement à travers ce mulch.

Les systèmes S1 à S5 ont été installés au cours de 2 années: S1, S2 (labour) et S3 (SCV) en novembre 2004, S4 et S5 (SCV) en novembre 2005. Deux témoins ont également été installés en novembre 2005, en bordure du dispositif: un témoin sol nu toujours maintenu propre (noté Tp), et un témoin laissé en jachère, toujours enherbé (noté Te) (*figure 2*). Le travail du sol, la gestion des résidus de culture et la rotation des cultures pour les 7 systèmes sont détaillés au *tableau 2*.

Le dispositif comprend 22 parcelles de 12 m de long (dans le sens de la pente) et 4 m de large, soit 4 répétitions pour chacun des systèmes S1 à S5, et 1 répétition pour les systèmes témoins (Tp et Te). 3 parcelles sur les 4 répétitions des systèmes S1 à S5 ont été divisées en 2 parties permettant d'équiper des ½ parcelles dites « lots d'érosion » pour l'étude de l'érosion et du ruissellement (*figure 2*). Leurs dimensions sont de 12 m de long sur 1,8 m de large soit 21,6 m² de superficie contrôlée. Le côté supérieur et les deux côtés latéraux sont bordés de tôles de 20 cm de haut enfoncées de 10 cm dans le sol, et, en aval, un déversoir en tôle permet de rassembler les eaux de ruissellement et de les diriger vers deux fûts collecteurs de 200 litres.

Par ailleurs, des « cadres d'érosion » d'une surface de 1 m², à partir desquels on recueille l'eau ruisselée dans un bidon de 20 litres, ont été installés sur 2 parcelles S1 et 2 parcelles S3 (*figure 2*).

Tableau 1: Caractéristiques physico-chimiques des sols d'Andranomanelatra (d'après Oliver R., CIRAD, données non publiées).

Table 1: Physico-chemical characteristics of Andranomanelatra soils (from Oliver R., CIRAD, unpublished data).

Profondeur	Argiles %	Limons %	Sables %	CEC cmolc kg ⁻¹	pH eau	C tot mg g ⁻¹	N tot mg g ⁻¹	P ass Olsen mg kg ⁻¹
0-10	59,4	27,5	13,1	3,71	4,94	44,5	3,53	13,9
30-60	72,0	15,2	12,1	2,63	4,87	24,2	1,65	n.d.
90-120	70,7	15,4	13,9	1,11	5,18	5,20	0,50	n.d.

Tableau 2: Description des différents traitements comparés.

Table 2: Treatments description.

	Campagne 2004-05			Campagne 2005-06			Campagne 2006-07		
	Labour	Exportation résidus	Culture	Labour	Exportation résidus	Culture	Labour	Exportation résidus	Culture
S1	oui	non	maïs + haricot	oui	non	riz	oui	oui	maïs + haricot
S2	oui	non	maïs + haricot	non	non	riz	non	non	maïs + haricot
S3	non	non	maïs + haricot	non	non	riz	non	non	maïs + haricot
S4	-	-	jachère	oui	non	riz	oui	non	maïs + haricot
S5	-	-	jachère	non	non	riz	non	non	maïs + brach ¹
Tp	-	-	jachère	oui	oui	-	oui	oui	-
Te	-	-	jachère	non	non	jachère	non	non	jachère

¹: *Brachiaria ruziziensis* installé par bouture en décembre 2006.

Les conduites des parcelles sont comparables aux itinéraires techniques les plus communs en milieu paysan : conduite entièrement manuelle, semis au poquet, épandage de fumier et parfois d'engrais minéral (urée en couverture), sarclages manuels à la demande. Il a toutefois été utilisé un herbicide systémique pour tuer les adventices avant semis sur SCV.

Observations et mesures effectuées

Données climatiques

Une station de recueil automatique des données météorologiques (marque Cimel, modèle ENERCO 408) est installée en bordure du site expérimental. Y sont relevés quotidiennement la pluie (hauteur, intensité maximale, durée), la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité de l'air et le rayonnement global.

Ruissellement

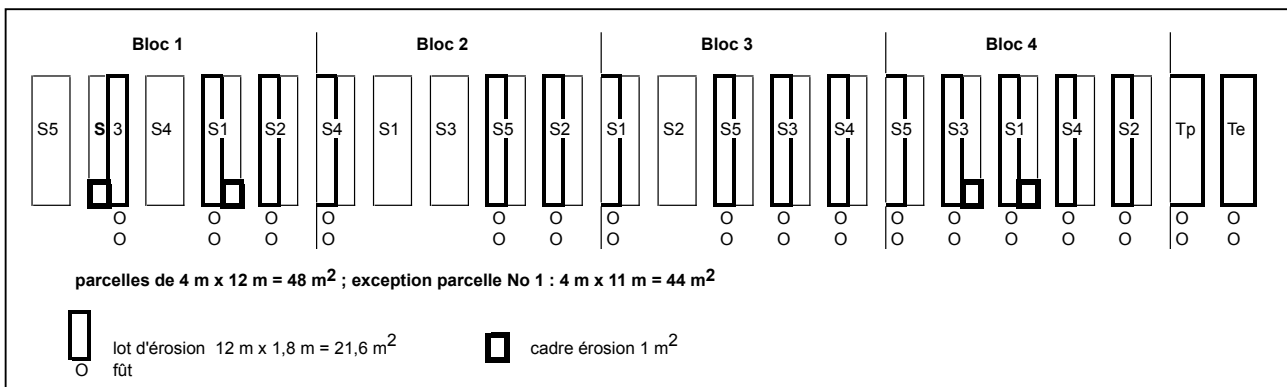
Les eaux de ruissellement sont recueillies dans deux fûts successifs pour chaque parcelle de ruissellement : le premier fût est équipé d'un partiteur qui fait qu'en cas de débordement, 1/5^e de l'eau débordée passe dans le second fût (Barthès and Roose, 2002). La hauteur d'eau est mesurée dans les fûts après chaque événement pluvieux. De même, l'eau des bidons venant des cadres d'érosion est mesurée après chaque événement pluvieux.

Érosion hydrique

Après chaque événement pluvieux ayant donné suite à un ruissellement, on prélève, après homogénéisation manuelle, dans chaque fût (ou bidon) 2 échantillons de 1,5 l, représentatifs de la solution ruisselée. Ces échantillons sont filtrés sur un papier filtre de porosité 0,45 mm et le filtre de l'un des échantillons est passé à l'étuve (24 heures à 105 °C) afin de déterminer la masse de charge solide entraînée par les eaux de ruissellement, tandis que l'autre filtre est séché au frais à l'air libre afin de pouvoir procéder à d'éventuelles analyses ultérieures.

Figure 2: Plan du dispositif expérimental.

Figure 2: Experimental design.



États de surface du sol

Des mesures du taux de recouvrement des parcelles ont été effectuées le 15 janvier de chaque campagne. Pour ce faire, un cadre de 1,1 m², sur lequel sont tendus des fils se croisant tous les 10 cm, a été utilisé. Cette grille est disposée horizontalement au-dessus de la parcelle, et la nature de ce qui se trouve au point situé à la verticale de chaque intersection est notée (sol nu, résidus de différentes natures, plante vivante cultivée ou non) (Bonham, 1989; Gutierrez and Hernandez, 1996). Deux mesures ont été effectuées par parcelle.

La vitesse d'infiltration en surface a été mesurée selon la méthode « Beerkan » (de Condappa, 2000; Findeling, 2001) à partir de cylindres de 30 cm de diamètre et de plusieurs lames d'eau de 1 cm de hauteur à chaque fois, jusqu'à stabilisation de la vitesse d'infiltration de la lame d'eau. 4 répétitions ont été effectuées en décembre 2004 et 3 en janvier 2007.

RÉSULTATS

Données climatiques

Les pluies ont été abondantes et supérieures à la moyenne interannuelle lors des saisons pluvieuses 2004-05 et 2006-07 (respectivement 1664,5 mm et 1587,0 mm), alors que la pluviométrie 2005-2006 a été proche de la moyenne avec 1207,5 mm. Les répartitions ont été assez hétérogènes, avec notamment un début de saison peu pluvieux en 2005-06 (figure 3), posant des problèmes aux cultures. Sur les campagnes de mesures, qui vont généralement du labour aux récoltes, les différences sont tout aussi importantes (respectivement 1177, 1069,5 et 1542 mm pour 2004-05, 2005-06 et 2006-07), et les répartitions demeurent très différentes. De gros événements pluvieux, supérieurs à 50 mm, arrivent assez fréquemment : on en compte trois durant la campagne 2004-05, en décembre et février, quatre durant la campagne 2005-06,

en décembre, février et mars, et trois en 2006-07, en décembre et janvier. Les intensités maximales horaires sont variables, atteignant et/ou dépassant parfois les 100 mm.h⁻¹ (trois fois en 2004-05, cinq fois en 2005-06, une fois en 2006-07).

Ruissellement et érosion

Les résultats de ruissellement, d'érosion et de turbidité obtenus pour les lots d'érosion sont résumés dans le *tableau 3* (respectivement, 3 a), 3 b) et 3 c)). Les analyses statistiques ont été faites pour les trois campagnes.

Dès la première année, le ruissellement et surtout les pertes en terre sont fortement réduits pour SCV en comparaison au labour (facteur 2.2 et facteur 57 respectivement). Ces tendances se confirment dans les années qui suivent, avec des ruissellemets réduits de facteurs 3 à 10, et les érosions de facteurs 20 à 140. On note également que les coefficients de ruissellement restent relativement faibles, allant de 1 % à 15 %, même pour le témoin toujours propre.

Les pertes annuelles en terre vont de 27 t ha⁻¹ à 0,4 t ha⁻¹ la première année, se réduisant ensuite sur les parcelles cultivées (9 puis 2 t ha⁻¹ sur labour en 2005-06 et 2006-07 respectivement). Toutefois, on peut noter que la parcelle témoin Tp a des pertes en terre qui restent importantes (15 t ha⁻¹ en 2005-06 et 24 t ha⁻¹ en 2006-07).

Dans la majorité des cas, les ruissellemets, et, dans tous les cas, les érosions sont significativement supérieures sur labour par rapport aux SCV. Par contre, les différents traitements en labour ou SCV (âge, enfouissement ou exportation) ne se distinguent pas statistiquement, même si des tendances semblent apparaître (ruissellement significativement supérieur avec exportation des résidus).

La turbidité, qui avait atteint des valeurs maximales importantes la première année (jusqu'à 267 g l⁻¹) est restée inférieure à 50 g l⁻¹ les deux années suivantes sous labour. Elle est toujours significativement supérieure sous labour par rapport aux SCV.

Sur les trois années d'études, nous avons pu effectuer des mesures des taux de recouvrement du sol à différentes dates (*tableau 4*). En particulier, au 15 janvier, les taux de recouvrement sont très différents selon les campagnes agricoles. Ceci est dû à la fois aux dates de semis des cultures qui sont différentes, et aux cultures qui se mettent en place plus ou moins vite.

On constate ainsi que l'érosion est très négativement corrélée au taux de recouvrement du sol au 15 janvier (*figure 4*). L'érosion est la plus forte pour la campagne 2004-05, où le semis avait été effectué très tardivement, laissant le sol préparé et donc peu protégé au moment des plus grandes précipitations (décembre et janvier). Par contre, les effets relatifs sont moins importants pour le ruissellement, puisque celui-ci dépend avant tout de l'intensité et du volume des pluies, indépendants du recouvrement, et de la capacité du sol à infiltrer l'eau.

Figure 3: Pluviométrie décadaire des 3 campagnes étudiées.

Figure 3: Rainfall per decade for the three studied growing periods.

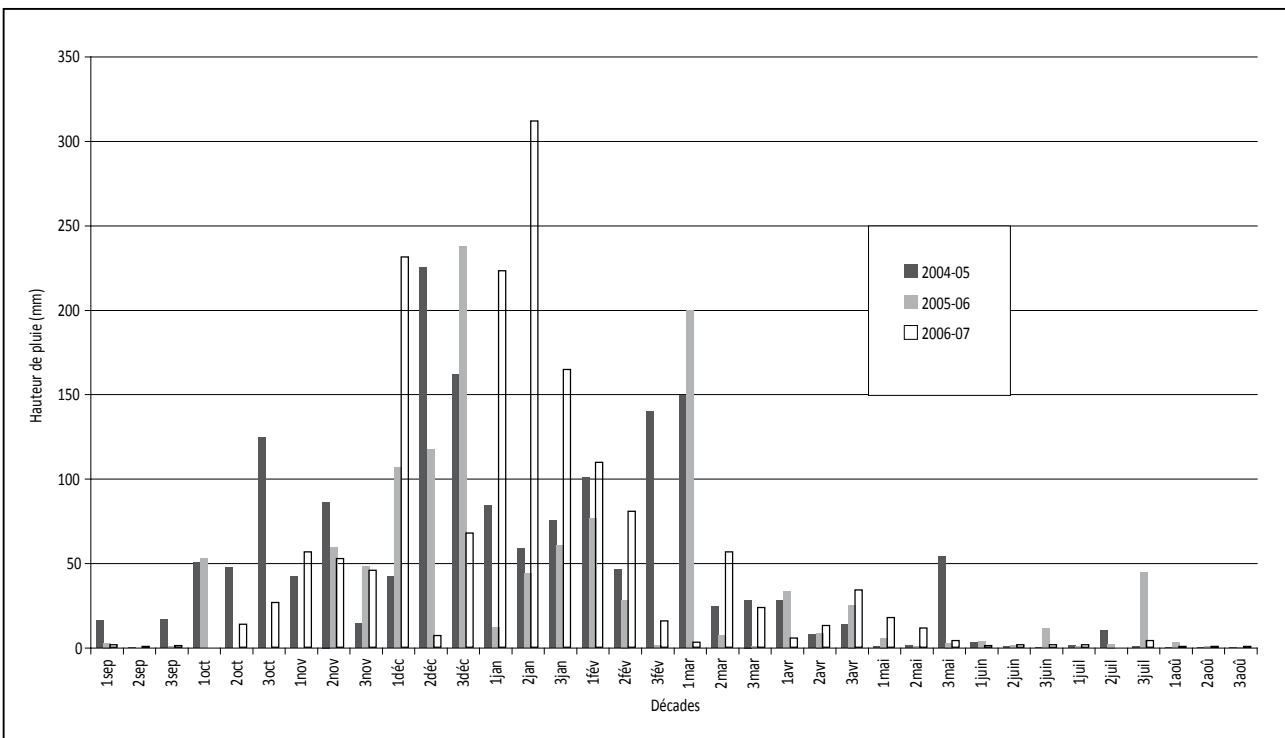


Tableau 3: Résultats des 3 campagnes sur a) le ruissellement total b) l'érosion totale et c) la turbidité mesurés dans les lots; moyenne \pm écart-type, n=3.
Table 3: Results from the 3 growing periods about a) total runoff, b) total erosion and c) turbidity measured in the plots; mean \pm standard deviation, n=3.

a)		S1	S2	S3	S4	S5	Tp	Te
Campagne 04-05	Gestion sol	labour	labour	SCV				
	Gestion résidus	enfouis	enfouis					
	Culture	M + H	M + H	M + H				
	Coefficient de ruissellement	3.7	3.6	1.6				
	Ruissellement (mm)	valeur 43.6 \pm 9.9 a % S1 100	42.7 \pm 13.4 a 98	19.2 \pm 13.4 a 44				
Campagne 05-06	Gestion sol	labour	SCV	SCV	labour	SCV		
	Gestion résidus	enfouis			enfouis			
	Culture	Riz	Riz	Riz	Riz	Riz		
	Coefficient de ruissellement	7.9	1.4	0.8	7.5	1.3	9.9	2.4
	Ruissellement (mm)	valeur 84.4 \pm 10.4 a % S1 100	14.6 \pm 5.3 b 17	8.5 \pm 1.8 b 10	80.1 \pm 5.7 a 95	13.9 \pm 0.2 b 16	105.5 125	25.7 30
Campagne 06-07	Gestion sol	labour	SCV	SCV	labour	SCV		
	Gestion résidus	exportés			enfouis			
	Culture	M + H	M + H	M + H	M + H	M + B		
	Coefficient de ruissellement	4.2	1.2	0.9	3.1	1.4	14.8	1.5
	Ruissellement (mm)	valeur 64.6 \pm 13.2 a % S1 100	17.9 \pm 1.2 c 28	13.6 \pm 1.8 c 21	48.6 \pm 0.3 b 75	21.0 \pm 3.5 c 33	227.8 353	22.4 35
b)		S1	S2	S3	S4	S5	Tp	Te
Campagne 04-05	Gestion sol	labour	labour	SCV				
	Gestion résidus	enfouis	enfouis					
	Culture	M + H	M + H	M + H				
	Erosion (g m ⁻²)	valeur 2140 \pm 449 a % S1 100	2723 \pm 1429 a 127	43 \pm 52 b 2				
Campagne 05-06	Gestion sol	labour	SCV	SCV	labour	SCV		
	Gestion résidus	enfouis			enfouis			
	Culture	Riz	Riz	Riz	Riz	Riz		
	Erosion (g m ⁻²)	valeur 958 \pm 182 a % S1 100	20 \pm 4 b 2	7 \pm 2 b 1	823 \pm 233 a 86	8 \pm 3 b 1	1495 156	8 1
Campagne 06-07	Gestion sol	labour	SCV	SCV	labour	SCV		
	Gestion résidus	exportés			enfouis			
	Culture	M + H	M + H	M + H	M + H	M + B		
	Erosion (g m ⁻²)	valeur 270 \pm 228 a % S1 100	12 \pm 4 b 5	8 \pm 3 b 3	106 \pm 32 ab 39	6 \pm 5 b 2	2433 903	4 1
c)		S1	S2	S3	S4	S5	Tp	Te
Campagne 04-05	Gestion sol	labour	labour	SCV				
	Gestion résidus	enfouis	enfouis					
	Culture	M + H	M + H	M + H				
	Turbidité max (g l ⁻¹)	207	263	60				
	Turbidité moy (g l ⁻¹)	valeur 49 \pm 5 a % S1 100	61 \pm 24 a 124	3 \pm 2 b 5				
Campagne 05-06	Gestion sol	labour	SCV	SCV	labour	SCV		
	Gestion résidus	enfouis			enfouis			
	Culture	Riz	Riz	Riz	Riz	Riz		
	Turbidité max (g l ⁻¹)	51	14	11	42	15	47	5
	Turbidité moy (g l ⁻¹)	valeur 11 \pm 2 a % S1 100	1.4 \pm 5 b 13	0.8 \pm 0 b 7	10 \pm 3 a 91	0.6 \pm 2 b 5	14 124	0.3 3
Campagne 06-07	Gestion sol	labour	SCV	SCV	labour	SCV		
	Gestion résidus	exportés			enfouis			
	Culture	M + H	M + H	M + H	M + H	M + B		
	Turbidité max (g l ⁻¹)	44	6	8	46	2	50	1
	Turbidité moy (g l ⁻¹)	valeur 4 \pm 3 a % S1 100	0.7 \pm 0.2 b 17	0.6 \pm 0.2 b 14	2 \pm 0.6 ab 55	0.3 \pm 0.1 b 8	11 267	0.2 4

Les valeurs suivies par des lettres différentes sont significativement différentes (test Newman-Keuls, $p < 0.05$)

M + H = maïs + haricot; M + B = maïs + Brachiaria; max = maximum; moy = moyenne

Tableau 4 : comparaison entre les systèmes au 15/01, pour les 3 campagnes.**Table 4:** comparison between systems on 01/15, for 3 years.

Campagne	Culture	Date semis	Pluie jusqu'au 15/01 (mm)		Labour	SCV	Student
2004-05	Maïs + haricot	09/12/04	538.0	Taux de recouvrement au 15/01 (%)	25	75	
				Ruissellement cumulé au 15/01 (mm)	32	10	S
				Ruissellement de la campagne (mm)	43	19	S
				Turbidité campagne (g l ⁻¹)	55	2.5	S
				Erosion cumulée au 15/01 (t ha ⁻¹)	24	0.4	S
				Erosion de la campagne (t ha ⁻¹)	24	0.4	S
2005-06	Riz	10/11/05	614.5	Taux de recouvrement au 15/01 (%)	38	89	
				Ruissellement cumulé au 15/01 (mm)	70	8	S
				Ruissellement de la campagne (mm)	82	12	S
				Turbidité campagne (g l ⁻¹)	11	0.9	S
				Erosion cumulée au 15/01 (t ha ⁻¹)	9	0.1	S
				Erosion de la campagne (t ha ⁻¹)	10	0.1	S
2006-07	Maïs + haricot	24/11/06	902.0	Taux de recouvrement au 15/01 (%)	65	97	
				Ruissellement cumulé au 15/01 (mm)	41	12	S
				Ruissellement de la campagne (mm)	57	18	S
				Turbidité campagne (g l ⁻¹)	3	0.5	S
				Erosion cumulée au 15/01 (t ha ⁻¹)	2	0.1	S
				Erosion de la campagne (t ha ⁻¹)	2	0.1	S

Student : S : moyennes significativement différentes à 0.05 (test de Student); NS : moyennes non différentes significativement.

De même, l'influence du taux de recouvrement sur la turbidité des eaux de ruissellement est très importante: même si les turbidités évoluent entre 0.4 et 51 g.l⁻¹ sur labour contre 0.1 et 15 g.l⁻¹ sur SCV, elles sont plus importantes, en moyenne annuelle, sur le témoin Tp. Ainsi, si la turbidité diminue avec le temps au cours d'une campagne sur les parcelles cultivées en labour, du fait du recouvrement progressif des parcelles par la culture, elle ne semble pas diminuer avec le temps sur la parcelle Tp. Sur cette parcelle, elle est plus liée à l'érosivité des événements pluvieux, et dépendra donc de la hauteur d'eau, de l'intensité maximale et de l'eau dans le sol (donc des pluies tombées antérieurement). Ainsi, en 2005-06, avec des intensités de pluie dépassant 100 mm.h⁻¹, en début de campagne, sur sol humide, on atteint des turbidités de presque 50. g.l⁻¹ sur Tp, et de plus de 25 g.l⁻¹ sur labour cultivé, alors qu'en fin de campagne, sur sol sec, les turbidités descendent à 13 g.l⁻¹ sur Tp, et à moins de 2 g.l⁻¹ sur labour cultivé (figure 5 a). En 2006-07, les intensités maximales sont moins importantes (une seule fois supérieure à 100 mm.h⁻¹; cette intensité étant isolée en début de campagne sur sol sec, les turbidités résultantes sont de 25 g.l⁻¹ au maximum sur un traitement labouré). Les turbidités sur Tp deviennent supérieures à toutes les autres dès décembre, et atteignent des maxima de presque 50 g.l⁻¹ avec une série de pluies quotidiennes qui ont totalement saturé le sol. Alors que les turbidi-

tés des parcelles labourées restent inférieures à 3 g.l⁻¹ à partir de fin décembre, les turbidités atteignent encore 28 g.l⁻¹ en fin mars et 18 g.l⁻¹ en fin avril (figure 5 b).

Des différences sur l'infiltration ont pu être relevées entre des parcelles en SCV et des parcelles en labour sur lesquelles des mesures ont été faites en pleine saison des pluies durant deux campagnes différentes (4 répétitions en décembre 2004 et 3 répétitions en janvier 2007). Les vitesses d'infiltration à saturation, mesurées par la méthode Beerkan, ont donné des résultats significativement différents selon les 2 types de gestion du sol (figure 6).

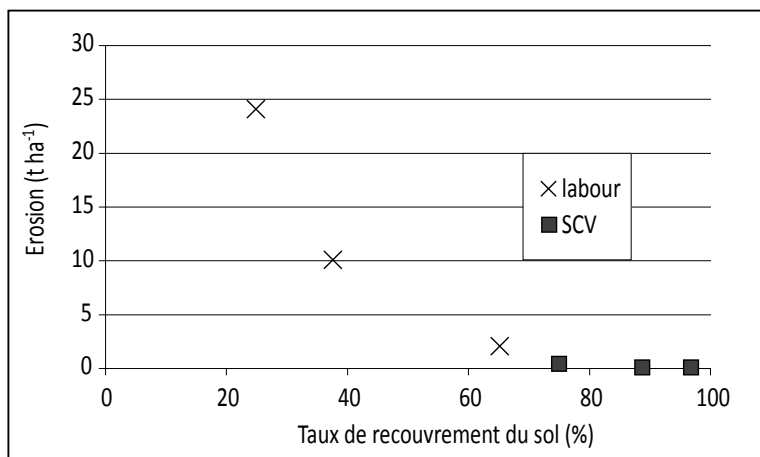
DISCUSSION

De nombreux travaux indiquent l'effet positif des SCV sur la diminution du ruissellement et de l'érosion, par rapport au labour (Barthès *et al.*, 2002; Scopel *et al.*, 2005; Tengberg *et al.*, 1997; Zheng *et al.*, 2004).

Les coefficients de ruissellement que nous avons obtenus, qui vont de 1.1 à 1.6 % en moyenne sur SCV, de 3.7 à 7.7 % sur labour (le plus élevé étant obtenu avec une culture de riz), et de 9.9 à 14.8 % sur le témoin toujours propre (Tp) restent inférieurs

Figure 4: Relation érosion et taux de recouvrement moyen sur 3 campagnes, au 15 janvier.

Figure 4: Relationship between erosion and cover rate during 3 years, in the middle of January.



à ceux obtenus par Scopel *et al.* (2005) qui vont de 7 % pour les meilleurs SCV à 49 % pour les témoins Tp. De même, Barthès *et al.* (2002) obtiennent des coefficients de ruissellement allant de 28 % sur un maïs labouré non fertilisé à 8 % sur un maïs en SCV avec mucuna; il cite toutefois des résultats sur maïs ou sorgho (Gachene *et al.*, 1997), sur sols argileux, avec des coefficients de 1 ou 2 %, nettement plus proches de ceux d'ici. Tengberg *et al.* (1997), sur Sol ferrallitique, trouvent des coefficients de 20 % pour un sol nu, et de 8 % pour un sol couvert de résidus sur 30 % de sa surface. La réduction du coefficient de ruissellement obtenue avec SCV par rapport au labour suit donc bien la même tendance que d'autres résultats de la littérature, mais cette réduction est plus faible pour notre étude. Les sols de la région sont sans doute peu sensibles au ruissellement, car souvent riches en matière organique; les labours permettent d'enfouir de grandes quantités de résidus, garantissant ainsi une bonne porosité. Il est d'ailleurs intéressant de noter que les seuls cas (un autre essai non présenté ici), où nous obtenons des coefficients de ruissellement importants sont pour les parcelles en labour depuis 10 ans sans restitution de résidus: on arrive alors à des taux de ruissellement de 38 % en riz non fertilisé, et 26 % en riz fertilisé.

Pour les pertes en terre, nos résultats se rapprochent de ceux de la littérature; sur la parcelle nue, les pertes en terre vont de 15 à 24 t ha⁻¹ an⁻¹; pour Scopel *et al.* (2005), ces pertes vont de 10 à 120 t ha⁻¹ an⁻¹, et pour Tengberg *et al.* (1997), on a 51 t ha⁻¹ an⁻¹ en moyenne sur 7 ans. Pour les parcelles avec mulch de 4.5 t ha⁻¹, on passe à des valeurs très faibles des pertes en terre chez Scopel *et al.* (2005), tandis que Zheng *et al.* (2004) citent des études avec des réductions de pertes en terre entre labour et SCV de 90 à 99 %. Nos quantités de résidus restant sur les parcelles en début de campagne varient entre 12 t ha⁻¹ après défriche et 4 à 6 t ha⁻¹ après culture (données non montrées ici). Elles semblent donc très suffisantes pour diminuer notablement les pertes en terre.

Comme indiqué dans de nombreuses études, le taux de recouvrement a une très forte influence sur les pertes en terre. Ainsi, chez Tengberg *et al.* (1997), un taux de couverture de 18 %

diminue les pertes en terre de 25 %, alors qu'un taux de 30 % les fait diminuer de 70 %. Comme nous l'avons vu, par rapport à un labour avec un taux de recouvrement de 25 %, le SCV avec 75 % de recouvrement à la même date fait passer les pertes en terre de 24 à 0,4 t ha⁻¹.

Nos résultats sur la turbidité des ruissellements au cours de la campagne confirment également les résultats obtenus par ailleurs sur l'effet du couvert du sol qui diminuent l'érosivité des pluies du fait de la diminution de l'effet splash et de l'interception d'une partie de la précipitation par les plantes ou les résidus (Bonham, 1989; Gutierrez et Hernandez, 1996; Roose, 1986; Seeger, 2007).

Même si l'effet du couvert végétal sur le ruissellement semble moins important, il est très lié à celui du couvert sur les pertes en terre. Il est montré (Findeling *et al.*, 2003; Gilley et Finkner, 1987) que même un mulch partiel permet de faire barrière et ainsi ralentir le ruissellement et en diminuer l'énergie cinétique; il permet aussi de diminuer le détachement du sol par les gouttes d'eau. Mais les différences de pertes en terre et surtout de ruissellement ne sont pas dues uniquement aux différences sur le taux de recouvrement au moment des pluies les plus érosives. Les caractéristiques physico-chimiques des sols peuvent également être modifiées, comme l'indiquent nos résultats sur les vitesses d'infiltration, qui montrent un avantage certain des parcelles en SCV sur les parcelles labourées, rejoignant les études de Findeling *et al.* (2003).

CONCLUSION

L'expérimentation présentée a confirmé l'intérêt des SCV (systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale permanente) sur la réduction du ruissellement et de l'érosion sur les parcelles en pente des Hautes Terres malgaches. Si les coefficients de ruissellement restent dans tous les cas assez faibles (de 1 à 15 %), les réductions de ruissellement par les SCV vont néanmoins jusqu'à un facteur 10 par rapport au traitement

Figure 5: Turbidité des ruissellements sur labour cultivé (moyenne S1 et S4) ou non (Tp) tout le long de la campagne
 a) 2005-06 en riz et b) 2006-07 avec maïs + haricot.

Figure 5: Runoff turbidities on plots with culture and tillage (average of S1 and S4), or tillage without culture (Tp), during year
 a) 2005-06 with rice and b) 2006/07 with maize + bean.

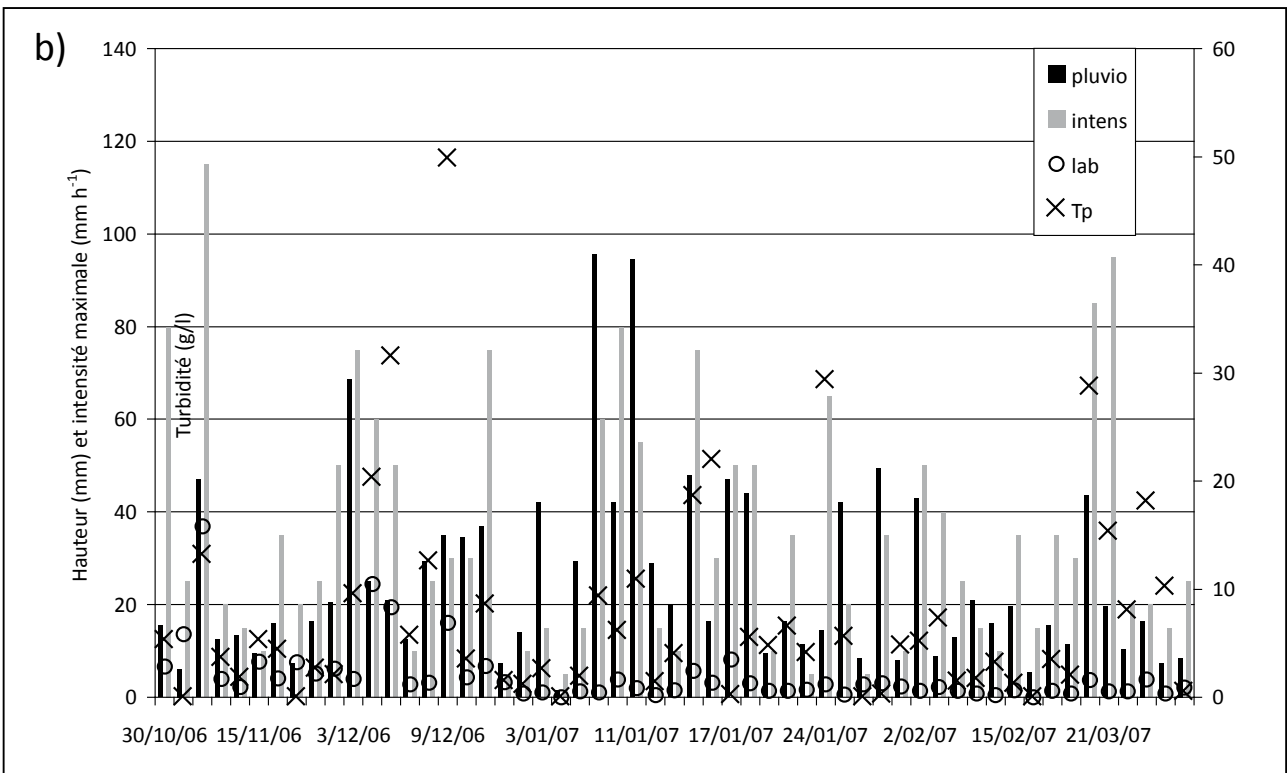
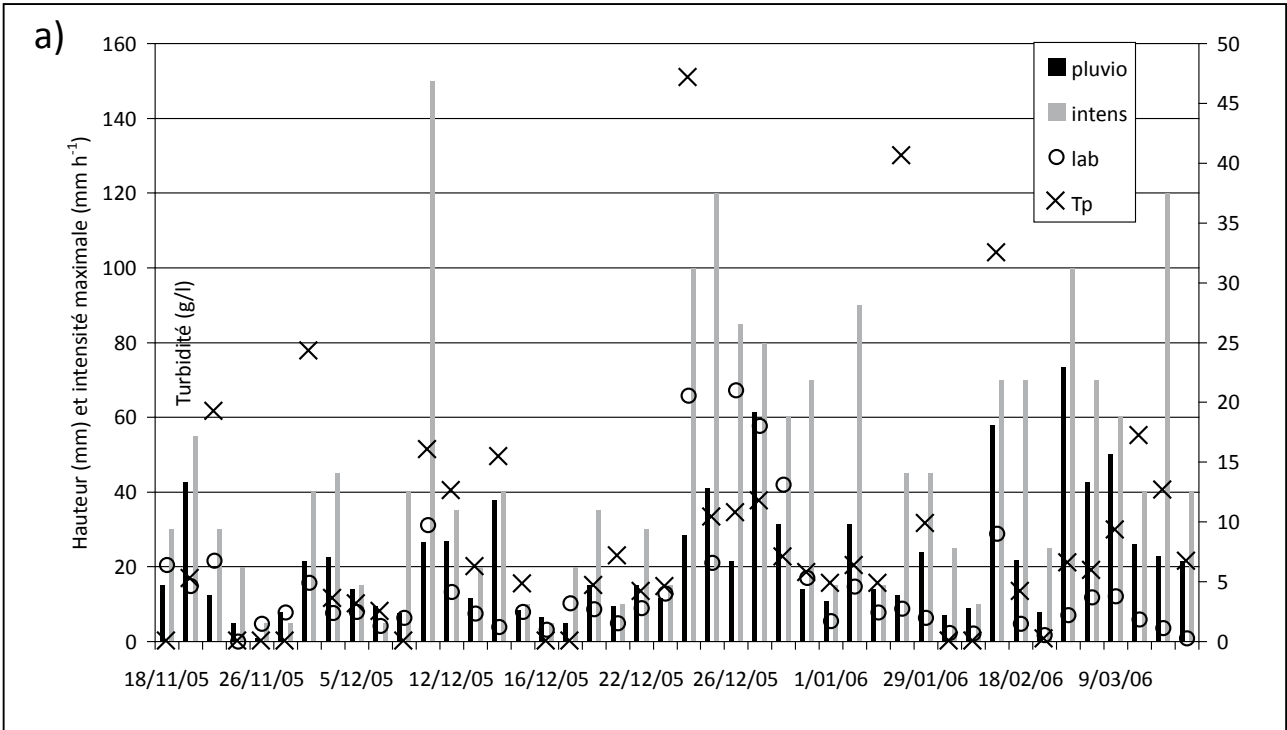
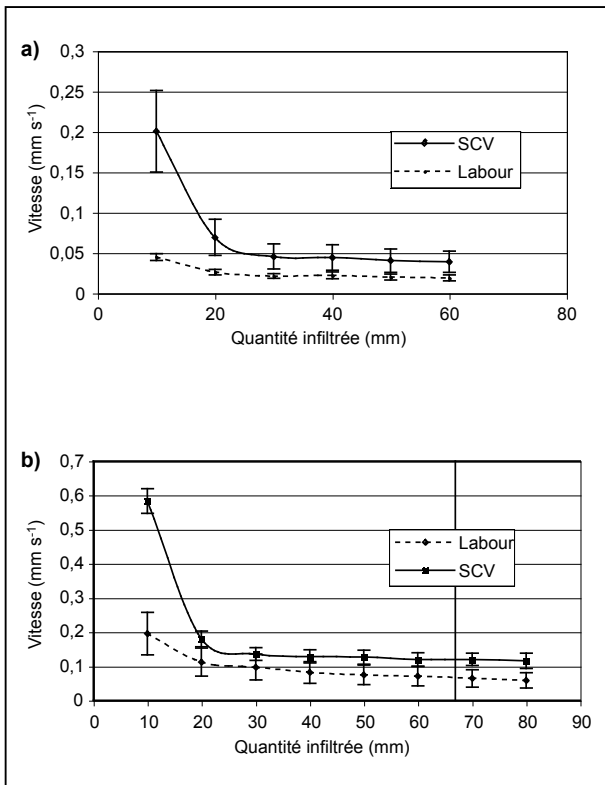


Figure 6: Vitesse d'infiltration mesurée par la méthode Beerkan durant a) la 1^{re} année et b) la 3^e sur SCV vs labour, sous maïs + haricot.

Figure 6: infiltration rate measured by Beerkan method during a) the first year, and b) the third year, with SCV vs tillage, maize + bean.



labour. Comme d'autres études l'ont montré, la réduction des pertes en terre par ces systèmes est très importante, dès la première année. Ceci est dû en grande partie au recouvrement du sol par la couverture végétale, qui assure une protection de celui-ci contre la pluie. D'autres effets sont à confirmer, comme l'effet sur les porosités et donc les vitesses d'infiltration sous SCV, ou l'influence positive sur la diminution du ruissellement et de l'érosion de la restitution des résidus même dans les parcelles labourées, tendance constatée sur une seule année dans l'étude.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le laboratoire d'analyse du sol du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (Cirad) pour les analyses effectuées sur les sols de l'expérimentation; l'ONG Tafa pour ses conseils techniques sur la gestion des systèmes en SCV; le personnel du Foffa, et les étudiants de l'ESSA qui ont participé à cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- Alberts E. E., et Neibling W.h., 1994 - Influence of crop residues on water erosion. In "Managing Agricultural Residues" (P. W. Unger, ed.), pp. 20-39. Lewis Pub.
- Bailly C., Malvos C., Sarrailh J.-M., Rakotomanana J. I., Rampanana L., et Ramanahadray, 1976 - Etude de la sensibilité des sols de Madagascar à l'érosion: expérimentation en parcelles élémentaires. Bois et forêts des tropiques 169, pp. 15-28.
- Barthès B., Azontonde A., Blanchart E., Girardin C., Villenave C., Oliver R., et Feller C., 2002 - Effect of a Legume Cover Crop on Carbon Storage and Erosion in an Ultisol under Maize Cultivation in Southern Benin. In "SOIL EROSION AND CARBON DYNAMICS", pp. 143-154.
- Barthès B., et Roose E., 2002 - Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. Catena 47, pp. 133-149.
- Bonham C. D., 1989 - "Measurements for Terrestrial Vegetation," John Wiley & Sons, New York.
- De Condappa D., 2000 - Illustration de la méthode de Beer-Kan" en vue de la caractérisation hydrodynamique d'un sol, Mémoire de DEA, Université Joseph Fourier Grenoble 1, LTHE-UMR5564, Grenoble, 49 p.
- Dunjo G., Pardini G., et Gisbert M., 2004 - The role of land use-land cover on runoff generation and sediment yield at a microplot scale, in a small Mediterranean catchment. Journal of Arid Environments 57, pp. 99-116.
- Findeling A., 2001 - Etude et modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs pluvial au Mexique, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts, Montpellier.
- Findeling A., Ruy S., et Scopel E., 2003 - Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. Journal of Hydrology 275, pp. 49-66.
- Gachene C. K. K., Jarvis N. J., Linner H., et Mbuvi J. P., 1997 - Soil erosion effects on soil properties in a highland area of Central Kenya. Soil Science Society of America Journal 61, pp. 559-564.
- Gilley J. E., et Finkner S. C., 1987 - Slope length and surface residue influences on runoff and erosion. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 30, 148.
- Gutierrez J., et Hernandez I. I., 1996 - Runoff and interrill erosion as affected by grass cover in a semi-arid rangeland of northern Mexico. Journal of Arid Environments 34, pp. 287-295.
- Le Bissonnais Y., Cerdan O., Lecomte V., Benkhadra H., Souchère V. et Martin P., 2005 - Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. Catena 62, pp. 111-124.
- Martinet, M., 2007 - La gestion des résidus de récolte dans les systèmes de culture des Hautes Terres malgaches, ISTOM, Cergy-Pontoise.
- Michellon R., et Razanamparany C., 2005 - Projet d'appui à la diffusion des techniques agro-écologiques à Madagascar: rapport de campagne 2003-04, Hautes Terres (bibliothèque de Lavalette, Cirad Montpellier).
- Muller B., Douzet J. M., Rabeharisoa R. L., Razafimiroe R. R. N., Rakotoarisoa J., Razakamiaramanana, et Albrecht A., 2005 - Erosion et évolution des conditions culturales après défriche sous différents systèmes de culture en labour et semis direct sur couverture végétale. In « Actes des journées scientifiques du réseau érosion et GCES de l'AUF », pp. 193-198, Antananarivo, Madagascar.
- Rakotofiringa A., and Tokarski Y., 2007 - Caractérisation des exploitations agricoles dans la commune rurale d'Andranomanelatra Région Vakinankaratra, hauts plateaux de Madagascar, mémoire pour le diplôme d'Agronomie Tropicale de l'Institut des régions chaudes de Montpellier SupAgro, ESAT, Montpellier.
- Raunet M., Séguy L., et Fovet-Rabot C., 1998 - Semis direct sur couverture végétale permanente du sol: de la technique au concept. In « Gestion

- agrobiologique des sols et des systèmes de culture » (F. Rasolo and M. Raunet, eds.), Antananarivo, Madagascar.
- Razafimbelo T. M., Albrecht A., Basile I., Borschneck D., Bourgeon G., Feller C., Ferrer H., Michellon R., Moussa N., Muller B., Oliver R., Razanamparany C., Seguy L., et Swarc M., 2006 - Effet de différents systèmes de culture à couverture végétale sur le stockage du carbone dans un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols* 13, pp. 113-127.
- Roose E., 1986 - Runoff and erosion before and after clearing depending on the type of crop in western Africa. *In* "Land clearing and development in the tropics" (R. Lal, ed.), pp. 317-330.
- Scopel E., Findeling A., Guerra E. C., et Corbeels M., 2005 - Impact of direct sowing mulch-based cropping systems on soil carbon, soil erosion and maize yield. *Agronomy Journal for Sustainable Development* 25, pp. 425-32.
- Scopel E., Silva F. A. M. D., Corbeels M., Affholder F., et Maraux F., 2004 - Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. *Agronomy Journal for Sustainable Development* 24, pp. 383-395.
- Seeger M., 2007 - Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations. *Catena* 71, pp. 56-67.
- Seguy L., Bouzinac S., Maronezzi A. C., Scopel E., Belot J.-L., et Martin J. 2003 - The success of no tillage with cover crops for savannah regions "from destructive agriculture with soil tillage to sustainable agriculture with direct seeding mulch based systems: 20 years of research of Cirad and its brazilian partners in cerrados in Brazil". *In* "II Congresso Mundial sobre Agricultura conservacionista", Ponta Grossa, Brazil.
- Tassin J., 1995 - L'homme gestionnaire de son milieu face à l'érosion en lavaka du lac Alaotra (Madagascar). *Akon'ny Ala* 17, pp. 40-49.
- Tengberg A., Stocking M., et Dechen S. C. F. 1997 - The impact of erosion on soil productivity - an experimental design applied in São Paulo state, Brazil. *Geografiska Annaler* 79, pp. 95-107.
- Zebrowski C., Bourgeat F., and Vicariot F., 1973 - Les sols et le modèle dans le massif volcanique de l'Ankaratra. Aptitudes culturales. *In* "Association des géographes" (ORSTOM, ed.), Antananarivo.
- Zheng F.-l., Merrill S. D., Huang C.-H., Tanaka D. L., Darboux F., Liebig M. A., et Halvorson A. D., 2004 - Runoff, Soil Erosion, and Erodibility of Conservation Reserve Program Land under Crop and Hay Production. *Soil Science Society America Journal* 68, pp. 1332-41.