Afrique SCIENCE *13(3) (2017) 341 - 353*
ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.info

Effet des systèmes de culture en semis direct pour contrôler les pertes en carbone, azote et phosphore totaux par érosion hydrique sur les Hautes-Terres de Madagascar

Norosoa Christine RAZAFINDRAMANANA[1*], Jean - Marie DOUZET[2] et Alain ALBRECHT[3]

[1] Université d'Antananarivo, Mention Agriculture Tropicale et Développement Durable (AT2D), Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, BP 175 - 101 Antananarivo, Madagascar
[2] Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), Département PERSYST, UR AIDA, TA B 102 / 07, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier cedex 5, France
[3] IRD, UMR Eco&Sols c / o CIRAD / AIDA Station Ligne Paradis 7, Chemin de l'IRAT 97410 Saint-Pierre, La Réunion

* Correspondance, courriel : *soamananjara@gmail.com*

Résumé

Cette étude a pour objectif principal de tester l'effet des systèmes de culture en semis direct pour contrôler le carbone érodé et les pertes d'azote et de phosphore totaux par érosion hydrique. Elle a été conduite sur un dispositif expérimental d'érosion dans le District d'Andranomanelatra-Antsirabe, Région du Vakinankaratra, Madagascar sous pluies naturelles. Deux systèmes de culture ont été comparés : (i) systèmes de culture en semis direct (avec couverture végétale permanente morte ou vivante à base de *Brachiaria ruziziensis*) et (ii) systèmes labourés (avec ou sans enfouissement des résidus des cultures). Durant quatre saisons des pluies, des prélèvements d'échantillons des sédiments ont été réalisés systématiquement le lendemain de chaque événement pluvial érosif. Des analyses conventionnelles aux laboratoires et spectroscopiques en moyenne infrarouge ou SMIRS ont été combinées afin de déterminer les teneurs en carbone, azote et phosphore totaux des sédiments. Les résultats de l'étude indiquent que par rapport aux systèmes labourés, les systèmes de culture en semis direct réduisent d'une manière significative la quantité de carbone érodé, les pertes d'azote et de phosphore totaux. Le carbone érodé, les pertes d'azote et phosphore totaux sous-systèmes labourés sont respectivement de 335,69, 25,69 et 6,63 $Kg.Ha^{-1}.an^{-1}$, alors qu'ils sont de l'ordre de 6,35, 0,53 et 0,14 $Kg.Ha^{-1}.an^{-1}$ sous-systèmes de culture en semis direct. L'effet combiné du non-travail du sol et de la présence de résidus en surface des parcelles cultivées constituent un élément clé permettant aux systèmes de culture en semis direct de limiter les pertes en nutriments par érosion hydrique. Ils relèvent donc une des pratiques culturales adéquates pour la conservation durable des sols sur les Hautes-Terres de Madagascar.

Mots-clés : *spectrométrie en moyen infrarouge (SMIR), Andranomanelatra, systèmes labourés, résidus des cultures.*

Abstract

Effect of direct seeding mulch-based cropping systems to control total carbon, nitrogen and phosphorus losses by water erosion in the highlands of Madagascar

The purpose of this study is to test the effect of Direct seeding Mulch-based Cropping systems ou DMC systems to control eroded carbon, total nitrogen and phosphorus losses by water erosion. The experiment is carried out in the district of Andranomanelatra, in the Vakinankaratra Region, in Madagascar under natural rainfall conditions. Two cropping systems were compared : (i) DMC systems (with permanent dead mulch or living plant cover using *Brachiaria ruziziensis*), and (i) conventional tillage systems (with and without burying crop residues). Sediments samples were systematically collected during four rainfall seasons, after every raifall event. Conventional laboratory analysis along with spectral data obtained from Mid Infrared Spectrometry (MIRS) were used to develop models to predict sediment organic carbon, total nitrogen and phosphorus contents. Findings showed that compared to conventional tillage systems, DMC systems can help reduce significantly eroded carbone, total nitrogen and phosphorus losses from water erosion. Eroded carbon, total nitrogen and phosphorus losses from conventional tillage plots were 335.69, 25.69 and 6.63 $Kg.Ha^{-1}.year^{-1}$ respectively, while those from DMC systems plots were 6,35, 0,53 and 0,14 $Kg.Ha^{-1}.Kg.Ha^{-1}.year^{-1}$ respectively. No-till system combined with maintained crop residues on the soil surface has been identified as an important key for DMC systems to control nutrient losses by water erosion. Such combination is therefore among the appropriate farming practices for sustainable soil conservation on the highlands of Madagascar.

Keywords : *mid infrared reflectance spectroscopy (MIRS), Andranomanelatra, tillage systems, crop residues.*

1. Introduction

L'érosion hydrique constitue une des sources de dégradation des sols dans le monde. Les risques d'érosion sont plus élevés sur les sols agricoles en pente, car sur ces sites érodés, l'érosion hydrique occasionne toujours des pertes en terres et nutriments. Les pertes du sol arable contribuent en partie à la diminution de la potentialité de production des sols cultivés, suite à l'exportation par le ruissellement et les particules érodées des éléments et nutriments essentiels de la fertilité du sol tels que les matières organiques, le calcium, le potassium, l'azote, le phosphore [1, 2]. Ces risques d'érosion hydrique sont les résultats de l'adoption de modes de gestion inappropriée [3], en occurrence la pratique de labour sur les terrains en pente sans dispositifs antiérosifs et l'exportation des résidus des cultures hors des parcelles cultivées pour subvenir à l'alimentation du bétail [4]. Au regard de cette situation, l'érosion hydrique met donc en danger la durabilité des sols agricoles et constitue une menace pour la production alimentaire mondiale [5]. Les sols agricoles en versant des collines des Hautes-Terres de Madagascar ne sont pas en reste. Pour leur conservation durable, au début des années 1990, les systèmes de culture en semis direct ont été proposés à Madagascar. Ils respectent trois principes fondamentaux (i) la minimisation des perturbations mécaniques du sol ; (ii) la protection permanente du sol par une couverture végétale morte ou vivante ; et (iii) l'adoption d'une rotation culturale judicieuse [6]. Depuis leur introduction dans la Grande-Ile, des nombreuses études en sciences du sol et agronomiques ont été réalisées montrant les effets des systèmes de culture en semis direct pour réduire le ruissellement et les pertes en terre par érosion hydrique [7], augmenter le stock de carbone du sol [8], améliorer les propriétés biologiques du sol [9], limiter les effets des insectes ravageurs des cultures [10], et bien d'autres. Cependant, la littérature scientifique locale relative à la quantification du carbone érodé et des pertes en nutriments par érosion hydrique sous-systèmes de culture en semis direct n'est pas encore abordée. Au vu de ce constat, une étude a été entreprise à Andranomanelatra-Antsirabe-Région du Vakinankaratra durant quatre campagnes culturales successives et qui a eu pour objectif principal de tester l'effet des systèmes de culture en semis direct pour contrôler le carbone érodé, l'azote et le phosphore totaux exportés par les particules des sols érodés.

2. Méthodologie

2-1. Situation géographique

L'expérimentation a été menée sous condition naturelle sur un dispositif expérimental d'érosion à Andranomanelatra, situé à 17 km au Nord-Est d'Antsirabe à une altitude de 1 645 m, à la latitude 19°46'45"S et la longitude 47°06'25"E -Région du Vakinankaratra-Madagascar. Le climat est de type tropical d'altitude, avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1 373 mm et une température moyenne annuelle de 17 °C. Le sol d'Andranomanelatra est un type ferrallitique argileux à variante andique ou ferralsols. Les résultats de l'analyse d'échantillons du sol prélevé sur une profondeur de 0-5 cm, avant la mise en place du dispositif expérimental d'érosion montrent que le pH du sol est légèrement acide ; la texture est argileuse, avec une forte teneur en éléments fins de l'ordre de 75 % ; la densité apparente est faible, avec une valeur moyenne inférieure à $1t.m^{-3}$; le sol a une stabilité structurale élevée ; et la teneur moyenne en carbone organique total est de l'ordre de 38 $gC.kg^{-1}$sol [7].

2-2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental a été mis en place en novembre 2004 par le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD) et le Centre National de la recherche Appliquée au développement Rural (FOFIFA), sur un versant exposé au nord, avec une pente variant de 10 à 13 %, et a été installé sur une jachère spontanée de chiendent *(Cynodon dactylon)* d'une dizaine d'années. Le dispositif expérimental d'érosion est composé de vingt parcelles élémentaires (R01-R20), placées les unes à côtés des autres, de 4 m de large et 12 m de long, à l'exception de la première parcelle (R01) qui est de 4 m de large et de 11 m de long. Les vingt parcelles sont groupées en quatre blocs incomplets randomisés ***(Figure 1)***. Le dispositif expérimental comporte plusieurs systèmes labourés (systèmes LAB) et systèmes de culture en semis direct (systèmes SCV). Pour les systèmes LAB, l'opération de labour est effectuée manuellement à l'aide de l'*angady* (sorte de bêche à fer plat et étroit) jusqu'à 25 cm de profondeur. Pour les systèmes SCV, les résidus des cultures précédentes sont laissés sur les parcelles et le semis est effectué manuellement à travers le *mulch* ou / et la couverture vivante.

Le dispositif expérimental comporte cinq systèmes : (i) LAB-exp : système labouré avec exportation des résidus des cultures ; (ii) LAB-enf : système labouré, les résidus des cultures sont enfouis sur place; (iii) LAB-SCV : système mixte ; il a été labouré lors de la mise en place du dispositif expérimental (2004 - 2005), puis à partir de la deuxième campagne culturale (2005 - 2006), il a été converti en système SCV ; (iv) SCV-morte : système SCV avec couverture végétale permanente morte, les résidus des cultures précédentes sont laissés en surface ; et (v) SCV-vivante : système SCV avec couverture végétale vivante à base de *Brachiaria ruziziensis*. Le bracharia est installé par bouture. Il est contrôlé à l'herbicide avant semis de la culture principale. Pour mesurer l'érosion, quinze parcelles d'érosion de superficie 21 m² sont intégrées dans le dispositif : une partie de chaque parcelle n'est pas ceinturée de tôles, afin de réaliser des prélèvements et mesures sans perturber la parcelle d'érosion. Celle-ci est ceinturée par de tôles légèrement enfoncées dans le sol pour éviter les entrées d'eau de l'extérieur et les sorties des eaux du ruissellement de l'intérieur. Par le biais d'un exutoire-tuyau, les eaux ruisselées dans les parcelles d'érosion sont déversées directement dans des fûts collecteurs équipés de partiteurs 1 / 5. Le trop plein est déversé à travers un partiteur dans le second fût.

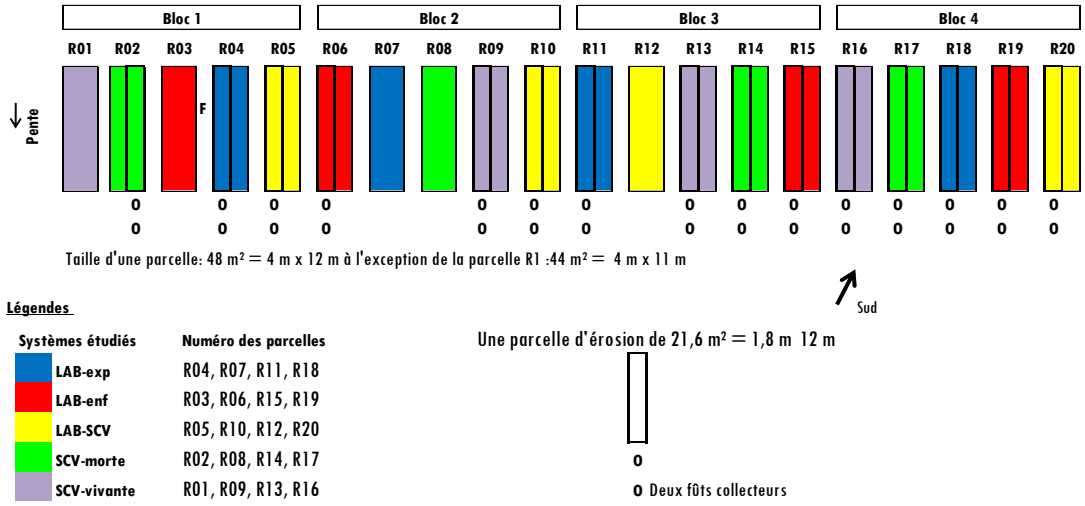

Figure 1 : *Plan du dispositif expérimental d'érosion à Andranomanelatra*

2-3. Prélèvement des sédiments

Durant quatre saisons des pluies consécutives : 2005 - 2006, 2006 - 2007, 2007 - 2008 et 2008 - 2009 des prélèvements des sédiments exportés par le ruissellement sont réalisés systématiquement après chaque événement pluvial érosif. Ces prélèvements sont effectués en récupérant les charges solides contenues dans le fût. Deux lots d'échantillons sont collectés par parcelle. Le premier est filtré puis séché à l'étuve à 105°C pendant 48 heures, il est utilisé pour quantifier les pertes en terre. Le deuxième lot est aussi filtré mais est séché à l'air libre et à l'ombre. Ce dernier est employé pour déterminer les teneurs en carbone, azote et phosphore totaux contenues dans les sédiments. Après séchage, les filtres sont regroupés par décade pour constituer un échantillon composite. Les sédiments ainsi groupés par décade sont homogénéisés, puis broyés à 0,2 mm.

2-4. Mesures des teneurs en carbone, azote et phosphore totaux

2-4-1. Analyse au laboratoire

Les teneurs en carbone et azote totaux sont mesurées par combustion au microanalyseur élémentaire CHN Fisons / Carlo Erba NA 2000, Milano, Italy. Celle de phosphore total est mesurée selon la méthode au vert. Les résultats de l'analyse au laboratoire ont servi comme étalons à la construction des modèles de prédiction des teneurs en carbone, azote et phosphore totaux. L'ensemble des échantillons de sédiments recueillis durant la saison pluvieuse 2005 - 2006 et les échantillons des sédiments représentatifs des saisons des pluies 2006 - 2007 et 2007 - 2008 sont analysés au laboratoire. Les échantillons de sédiments ayant une quantité inférieure à 0,5 g sont également analysés au laboratoire, selon la méthode conventionnelle.

2-4-2. Mesure par spectrométrie en moyen infrarouge

507 échantillons des sédiments broyés à 0,2 mm ont été passés à l'étuve réglée à 40-45 °C pendant 12 heures. Cette opération est effectuée afin d'éliminer l'humidité qui pourrait avoir des effets sur la réflectance [11]. Ils ont été ensuite scannés dans le moyen infrarouge (MIR) entre 401 et 4004 cm^{-1} avec un intervalle de 4 cm^{-1}, à l'aide d'un spectromètre de réflexion moyen infrarouge visible (spectromètre UV-visible) : Perkin-Elmer Lambda 3 UV / VIS spectrophotomètre-Nicolet 6700 FT-IR.

2-4-3. Analyse exploratoire de données par l'analyse en composante principale

L'ensemble des spectres collectés a été traité à l'aide du logiciel The Unscrambler © 9.7 (CAMO, Oslo, Norvège). Avant l'élaboration des modèles de prédiction des teneurs en carbone, azote et phosphore totaux, une analyse exploratoire des données par l'analyse en composante principale (ACP) est réalisée. Elle permet d'observer la structure d'ensemble des données spectrales brutes et de calculer la distance de Mahalanobis[1] H de chaque échantillon [12]. Elle est employée pour détecter les échantillons aberrants ou atypiques. Pour les échantillons utilisés pour élaborer les modèles, les teneurs en carbone, azote et phosphore totaux, les systèmes étudiés (labourés et non labourés, exportation des résidus des cultures ou non), l'année de prélèvements d'échantillons devront être suffisamment variables pour être représentatifs de l'ensemble des échantillons à prédire.

2-4-4. Construction des modèles de prédiction des teneurs en carbone et azote totaux

73 échantillons sont utilisés pour élaborer les modèles de prédiction des teneurs en carbone et azote totaux. Les spectres bruts sont rarement exploitables de suite, ils doivent subir une correction avant d'être analysés. Le lissage, la méthode de la moyenne mobile sur de segments de points de données 7 et le Standard Normal Variate ou SNV conviennent bien pour traiter les données spectrales brutes. La dernière portion des spectres, correspondante à la zone spectrale 1002,8 à 401,1 cm^{-1} est inexploitable, car elle contient des bruits (forte vibration). Afin que les modèles de prédiction soient précis, lors de l'analyse cette partie des spectres est éliminée. Après l'élimination des outliers, 55 spectres des sédiments ont été utilisés. Ils ont été divisés en deux lots : (i) les trois quarts (75 %) sont utilisés pour l'étalonnage (calibration), soit 42 spectres ; et (ii) le quart restant est réservé à la validation (25 %), soit 13 spectres. La même procédure a été adoptée pour prédire la teneur en azote total. Le modèle de prédiction de la teneur en carbone total est présenté dans la ***Figure 2 a-b.***

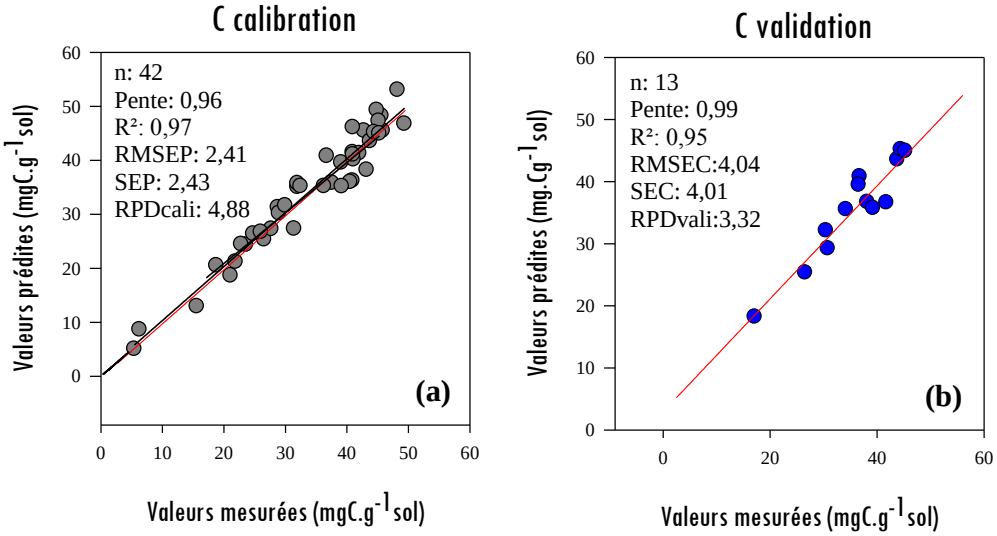

Figure 2 : *Teneurs en carbone total - valeurs mesurées vs prédites en calibration et validation*

[1] La distance de Mahalanobis de X à la quantité μ : dM (X,μ) = (X-μ)'C-1 (X - μ). Cette distance permet de mesurer la distance d'une réalisation

Le modèle de prédiction de la teneur en carbone total a une pente s'approchant de 1, un coefficient de variation (R^2) élevé, une racine carrée de l'erreur quadratique de prédiction (RMSEP) et une racine carrée de

l'erreur quadratique de calibration (RMSEC) supérieures à 2. Les valeurs de l'erreur standard de prédiction (SEP) et de l'erreur standard de calibration (SEC) se rapprochent et le ratio performance / déviation ou RPD est supérieur à 2. Une tendance similaire est constatée sur le modèle de prédiction de la teneur en azote total ***(Figure 3 a-b)***. Par rapport aux critères précités, les modèles de prédiction des teneurs en carbone et azote totaux sont robustes [13, 14].

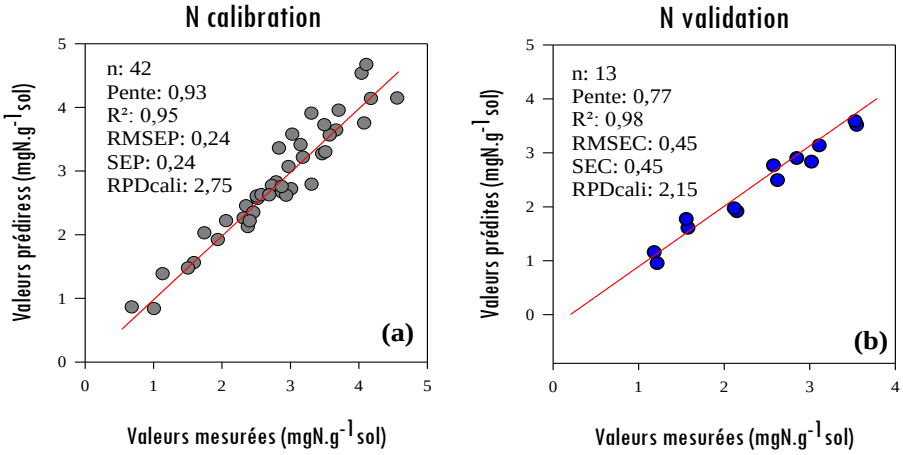

Figure 3 : *Teneurs en azote total - valeurs mesurées vs prédites en calibration et validation*

2-4-5. Construction des modèles de prédiction de la teneur en phosphore total

Le modèle de prédiction de la teneur en phosphore total trouvé par [15] a un coefficient de corrélation bas et un RPD faible. Pour améliorer le modèle de prédiction de phosphore total, le nombre de d'échantillons servant à élaborer le modèle de prédiction a été augmenté. 240 spectres de sédiments sont utilisés pour l'élaborer. Toutes les données spectrales ont subi les mêmes prétraitements que celles pour élaborer les modèles de prédiction de teneurs en carbone et azote totaux : le lissage 7, le SNV et la transformation de valeurs de la teneur en phosphore total en fonction logarithme népérien. Après l'élimination des outliers, 206 spectres sont utilisés pour élaborer le modèle. Les spectres sont divisés en deux lots : (i) les trois quarts (75 %) sont utilisés pour l'étalonnage (calibration), soit 155 spectres ; et (ii) le quart restant est réservé à la validation (25 %), soit 51 spectres. Comme ceux des modèles de prédiction des teneurs en carbone et azote totaux, lors de l'analyse des données spectrales, les régions spectrales comprises entre 1002,8 et 401,1 cm^{-1} ont été également exclues de l'analyse. Le modèle de prédiction de la teneur en phosphore total ***(Figure 4 a-b)*** a une pente avoisinante de 1, le R^2 supérieur à 0,80, les RMSEP et SEP sont supérieurs à 0,11 et le RPD est supérieur à 2.

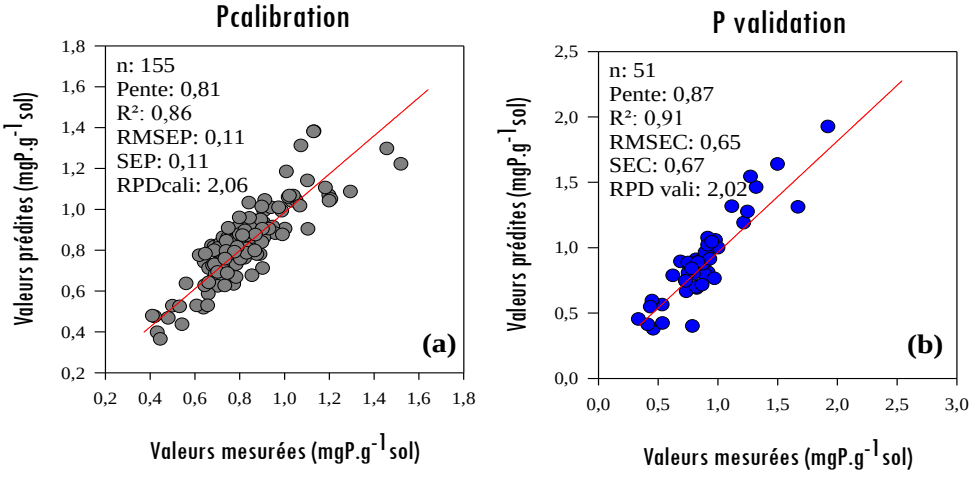

Figure 4 : *Teneurs en phosphore total - valeurs mesurées vs prédites en calibration et validation*

2-5. Mesures de carbone érodé et des pertes en nutriments

Le carbone érodé, les pertes en azote et phosphore totaux sont exprimés en $kg.Ha^{-1}$. Les pertes en nutriments et le carbone érodé sont calculés à partir de la ***(Formule 1)*** classique de Schick [16] :

$$Pn = TSed \times Pt \quad (1)$$

avec, Pn : pertes en nutriment exprimées en $kg.Ha^{-1}$; Tsed : teneurs en carbone, azote et phosphore totaux des sédiments, exprimées en $g.kg^{-1}$ de sol ; et Pt : pertes en terre, exprimées en $t.Ha^{-1}$.

2-6. Traitements statistiques des données

L'analyse statistique des données est effectuée à l'aide du logiciel XLSTAT 2008. L'effet particulier des systèmes de culture sur les pertes en carbone, azote et phosphore totaux est analysé statistiquement par une analyse de variance (ANOVA) à deux critères de classification : effets (i) du mode de gestion, et (ii) de l'année. Les données sont comparées entre elles par le test paramétrique de Tukey. Le test t consiste à vérifier si la moyenne de la variable dépendante varie selon l'état de la variable indépendante et à vérifier si la différence de moyennes de deux groupes est significative. Les différences sont considérées comme significatives pour une probabilité inférieure à 0,05.

3. Résultats

3-1. Teneurs en carbone, azote et phosphore totaux des sédiments

Les résultats des teneurs en carbone, azote et phosphore totaux pour tous les systèmes comparés durant la période d'expérimentation sont regroupés dans le ***Tableau 1.***

Tableau 1 : *Teneurs en carbone, azote et phosphore totaux dans les sédiments durant la période d'expérimentation* : 2005 - 2006 à 2008 - 2009

MDG	2005 - 2006	2006 - 2007	2007 - 2008	2008 - 2009	Moyenne
Teneur en carbone total (mg C.g-1sol)					
LAB-exp	36,43 ± 1,12 A a	42,81 ± 6,65 A abc	43,64 ± 1,01 A b	51,04 ± 4,93 A c	43,48 ± 6,52 A
LAB-enf	41,98 ± 0,47 B a	44,54 ± 5,94 A ab	48,60 ± 9,78 A ab	48,86 ± 1,87 AB b	45,99 ± 5,98 AB
LAB-SCV	39,41 ± 2,46 AB a	48,94 ± 16,83 A ab	62,46 ± 2,71 B b	58,55 ± 5,10 B b	52,34 ± 12,63 AB
SCV-morte	50,27 ± 10,67 BC ab	50,37 ± 4,06 A a	72,34 ± 11,96 BC b	57,55 ± 3,15 B ab	57,63 ± 12,38 AB
SCV-vivante	52,60 ± 4,65 C a	54,91 ± 7,17 A a	74,72 ± 3,75 C b	64,09 ± 9,42 B ab	61,58 ± 11,18 B
Teneur en azote total (mg N.g-1sol)					
LAB-exp	3,13 ± 0,11 A a	3,55 ± 0,61 A a	3,06 ± 0,17 A ab	3,61 ± 0,34 AB b	3,34 ± 0,42 A
LAB-enf	3,72 ± 0,14 B a	3,53 ± 0,73 A a	4,01 ± 0,98 AB a	3,49 ± 0,18 A a	3,69 ± 0,60 AB
LAB-SCV	3,67 ± 0,28 B a	4,43 ± 1,58 A ab	5,48 ± 0,77 BC b	4,42 ± 0,55 BC ab	4,50 ± 1,09 AB
SCV-morte	5,24 ± 2,24 AB ab	4,63 ± 0,98 A a	6,47 ± 0,71 C b	4,40 ± 0,20 C a	5,18 ± 1,41 B
SCV-vivante	4,22 ± 0,35 B a	4,63 ± 0,82 A ab	6,48 ± 1,15 C b	4,81 ± 0,56 C ab	5,03 ± 1,17 B
Teneur en phosphore total (mg.Pg-1sol)					
LAB-exp	1,64 ± 0,11 A c	1,00 ± 0,22 A ab	0,82 ± 0,07 A b	1,16 ± 0,16 A b	0,88 ± 0,27 A
LAB-enf	1,81 ± 0,03 B b	0,90 ± 0,17 A a	0,96 ±0,02 B a	1,06 ± 0,07 A a	0,88 ± 0,20 A
LAB-SCV	2,45 ± 0,10 C c	0,91 ± 0,28 A a	1,00 ± 0,14 AB ab	1,42 ± 0,29 AB b	1,04 ± 0,31 A
SCV-morte	1,56 ± 0,45 AB a	1,07 ± 0,32 A a	1,24 ± 0,30 BC a	1,47 ± 0,08 B a	1,07 ± 0,46 A
SCV-vivante	2,68 ± 0,11 C c	0,95 ± 0,07 A a	1,25 ± 0,05 C b	1,73 ± 0,45 B b	1,21 ± 0,37 A

MDG : mode de gestion - Moyennes ± écart-type (n = 3).

Les lettres majuscules (A, B, C) se rapportent aux différences entre systèmes pour une année, les lettres minuscules (a, b, c) se rapportent aux différences entre années pour un même système, une même lettre indique une absence de différence significative au seuil de 5 % d'après le test de Tukey. Les teneurs moyennes de carbone total pour les systèmes comparés sont proches, sauf celles des systèmes LAB-exp et SCV-vivante. La teneur en carbone total obtenue sous-système LAB-exp est plus faible (43,5 ± 6,5 mg C.g-^{1}sol) que celle sous-système SCV-vivante (61,6 ± 11,2 mg C.g-^{1}sol). Concernant, la teneur en azote total, une nette différence est également signalée entre les systèmes LAB-exp et les deux systèmes SCV : SCV-morte et SCV-vivante. Elle est plus faible sous-système LAB (3,3 ± 0,4) mg.Ng-^{1}sol) que sous-systèmes SCV (5,2 ± 1,4 et 5,0 ± 1,2) mg.Ng-^{1}sol. Le mode de gestion n'a pas d'influence sur la teneur en phosphore total. Quels que soient les systèmes étudiés et l'année des mesures, la teneur en phosphore total est d'environ 1 mg.Pg-^{1}sol. Pour l'ensemble, l'évolution temporelle de la teneur en carbone total des sédiments varie suivant l'année, avec une tendance à la hausse pour les systèmes labourés, en se référant à la situation des années 2006 - 2007 et 2008 - 2009. Une variabilité annuelle est également constatée au niveau des teneurs en azote ; mais en se référant à la situation des années 2006 - 2007 (début de l'expérimentation) et 2008 - 2009 (fin de l'expérimentation); la teneur en azote total dans les sédiments se stabilise. Une variabilité annuelle est aussi observée sur la teneur en phosphore total; mais avec une tendance à la baisse à la fin de l'expérimentation, sauf pour le système SCV-morte.

3-2. Carbone érodé

Les résultats de carbone érodé pour tous les systèmes comparés durant la période d'expérimentation sont consignés dans le ***Tableau 2.***

Tableau 2 : *Carbone érodé, exprimé en Kg C.Ha^{-1}.an^{-1} durant la période d'expérimentation*

MDG	2005 - 2006			2006 - 2007			2007 - 2008			2008 - 2009			Moyenne		
LAB-exp	340,99 ± 65,7	C	c	44,09 ±19,57	C	a	176,29 ± 16,30	B	b	769,62 ± 39,00	B	d	332,75 ± 315,55	C	
LAB-enf	396,74 ± 74,23	C	c	61,46 ±18,09	C	a	158,43 ± 44,08	B	b	737,24 ± 47,9	B	d	338,47 ± 300,87	C	
LAB-SCV	7,49 ± 0,90	B	a	5,87 ± 0,65	B	a	7,50 ± 0,96	A	a	11,12 ± 5,55	A	a	7,96 ± 2,15	B	
SCV-morte	3,52 ± 0,90	A	a	3,53 ± 0,52	A	a	7,96 ± 1,50	A	b	10,93 ± 2,70	A	b	6,48 ± 3,62	AB	
SCV-vivante	4,21 ± 0,87	A	a	3,33 ± 0,30	A	a	5,20 ± 1,55	A	a	5,72 ± 2,50	A	a	4,61 ± 1,06	A	

MDG : mode de gestion - Moyennes ± écart-type (n = 3).

Les lettres majuscules (A, B, C) se rapportent aux différences entre systèmes pour une année, les lettres minuscules (a, b, c) se rapportent aux différences entre années pour un même système, une même lettre indique une absence de différence significative au seuil de 5 % d'après le test de Tukey. Les valeurs moyennes obtenues au cours de l'expérimentation montrent que la quantité de carbone érodé sur les parcelles labourées est supérieure à celle en semis direct. Sous-systèmes labourés, les valeurs sont d'environ 42 à 72 fois plus élevée que celles sous-systèmes SCV. La comparaison de la quantité moyenne de carbone érodé entre les deux systèmes labourés (LAB-enf, LAB-exp) ne montre pas de différence significative. Une observation similaire est constatée d'une part entre les systèmes LAB-SCV (8,0 ± 2,2) Kg C.Ha^{-1}.an^{-1} et SCV-morte (6,5 ± 3,6) Kg C.Ha^{-1}.an^{-1} et d'autre part entre les systèmes SCV-morte (6,5 ± 3,6) Kg C.Ha^{-1}.an^{-1} et SCV-vivante (4,6 ± 1,1) Kg C.Ha^{-1}.an^{-1}. Mais, la quantité moyenne de carbone érodé enregistrée sur les parcelles LAB-SCV est presque 2 fois plus grande que celle des parcelles SCV-vivante. Quant à l'évolution temporelle de la quantité de carbone érodé sur les parcelles labourées, une forte variabilité annuelle est constatée. Elle est 17 fois moindre en année 2006 - 2007 (44,1 ± 19,6 Kg C.Ha^{-1}.an^{-1}) qu'en année 2008-2009 (769,6 ± 39,0 Kg C.Ha^{-1}.an^{-1}). Pour les parcelles LAB-SCV et SCV-vivante, il ressort que la quantité de carbone

érodé reste stable durant la période d'expérimentation quelle que soit l'année des mesures. Enfin sur les parcelles SCV-morte, durant les deux premières années des mesures (2005 - 2006 et 2006 - 2007), elle est faible par rapport à celle des deux dernières années des mesures (2007 - 2008 et 2008 - 2009).

3-3. Pertes en azote total

Les résultats des pertes en azote total pour tous les systèmes comparés durant la période d'expérimentation sont résumés dans le ***Tableau 3.***

Tableau 3 : *Pertes en azote total, exprimées en Kg N.Ha^{-1}.an^{-1} durant la période d'expérimentation*

MDG	2005 - 2006		2006 - 2007		2007 - 2008		2008 - 2009		Moyenne	
LAB-exp	29,31 ± 3,59 C	c	3,65 ± 2,18 C	a	12,35 ± 1,62 B	b	54,50 ± 1,58 B	d	24,95 ± 22,39	C
LAB-enf	35,15 ± 7,72 C	c	4,87 ± 1,30 C	a	13,07 ± 3,69 B	b	52,69 ± 11,00 B	d	26,44 ± 21,61	C
LAB-SCV	0,70 ± 0,09 B	a	0,53 ± 0,08 B	a	0,66 ± 0,36 A	a	0,84 ± 0,30 A	a	0,68 ± 0,13	B
SCV-morte	0,37 ± 0,09 A	a	0,32 ± 0,08 A	a	0,71 ± 0,55 A	a	0,75 ± 0,44 A	a	0,54 ± 0,22	AB
SCV-vivante	0,34 ± 0,08 A	a	0,28 ± 0,02 A	a	0,45 ± 0,30 A	a	0,45 ± 0,27 A	a	0,38 ± 0,08	A

MDG : mode de gestion - Moyennes ± écart-type (n = 3).

Les lettres majuscules (A, B, C) se rapportent aux différences entre systèmes pour une année, les lettres minuscules (a, b, c) se rapportent aux différences entre années pour un même système, une même lettre indique une absence de différence significative au seuil de 5 % d'après le test de Tukey. Quelle que soit l'année des mesures, la quantité des pertes en azote total sur les deux parcelles labourées est élevée par rapport à celle des parcelles en semis direct. En ce qui concerne la différence de la quantité moyenne de perte en azote total entre les deux systèmes labourés (LAB-exp et LAB-enf), il n'y a pas de différence significative observée. Une tendance similaire est constatée d'une part entre les systèmes LAB-SCV (0,7 ± 0,1) Kg N.Ha^{-1}.an^{-1} et SCV-morte (0,6 ± 0,3) Kg N.Ha^{-1}.an^{-1} et d'autre part entre les systèmes SCV-morte (0,6 ± 0,3) Kg N.Ha^{-1}.an^{-1} et SCV-vivante (0,4 ± 0,1) Kg N.Ha^{-1}.an^{-1}. Cependant, une différence significative est enregistrée entre les parcelles LAB-SCV (0,7 ± 0,1) N.Ha^{-1}.an^{-1} et SCV-vivante (0,4 ± 0,1) N.Ha^{-1}.an^{-1}. Concernant l'évolution des pertes en azote total au cours du temps sur les parcelles labourées, une variation annuelle est observée, avec des valeurs minimale et maximale de l'ordre de (3,7 ± 2,2) Kg N.Ha^{-1}.an^{-1} en 2006 - 2007) et (54,5 ± 1,6) Kg N.Ha^{-1}.an^{-1} en (2008 - 2009). Pour les systèmes SCV (LAB-SCV, SCV-morte et SCV-vivante), le calcul de variance n'a pas révélé de différence significative des pertes en azote total entre les différentes années des mesures.

3-4. Pertes en phosphore total

Les résultats des pertes en phosphore total sur tous les systèmes étudiés, durant quatre saisons des pluies consécutives, sont réunis dans le ***Tableau 4***.

Tableau 4 : *Pertes en phosphore total, exprimées en Kg P.Ha^{-1}.an^{-1} durant la période d'expérimentation*

MDG	2005 - 2006		2006-2007		2007-2008		2008-2009		Moyenne	
LAB-exp	5,12 ± 3,17 C	c	1,04 ± 0,51 B	a	3,31 ± 0,55 B	b	17,49 ± 0,4 B	d	6,74 ± 7,36	B
LAB-enf	5,68 ± 3,20 C	c	1,23 ± 0,22 B	a	3,14 ± 1,07 B	b	16,06 ± 3,6 B	d	6,53 ± 6,61	B
LAB-SCV	0,20 ± 0,04 B	b	0,10 ± 0,02 A	a	0,10 ± 0,04 A	a	0,31 ± 0,07 A	b	0,18 ± 0,10	A
SCV-morte	0,04 ± 0,03 A	a	0,10 ± 0,03 A	b	0,10 ± 0,02 A	b	0,30 ± 0,06 A	c	0,13 ± 0,12	A
SCV-vivante	0,10 ± 0,03 A	a	0,09 ± 0,01 A	a	0,10 ± 0,08 A	a	0,19± 0,10 A	a	0,12 ± 0,05	A

MDG : mode de gestion - Moyennes ± écart-type (n = 3).

Les lettres majuscules (A, B, C) se rapportent aux différences entre systèmes pour une année, les lettres minuscules (a, b, c) se rapportent aux différences entre années pour un même système, une même lettre indique une absence de différence significative au seuil de 5 % d'après le test de Tukey. Comme les deux autres éléments étudiés, les pertes en phosphore total varient également en fonction du mode de gestion. Sous systèmes de culture en semis direct, elles sont faibles par rapport à celles des systèmes labourés. Quant à la différence des pertes en phosphore totale entre les deux systèmes labourés, une absence de différence significative est observée. Une tendance similaire est trouvée entre les trois systèmes SCV comparés. Concernant l'évolution temporelle des pertes en phosphore total, les valeurs obtenues sur les parcelles labourées montrent une forte variabilité durant l'expérimentation, passant de (1,0 $\pm$ 0,5) Kg $P.Ha^{-1}.an^{-1}$ en 2006 - 2007 à (17,5 $\pm$ 0,4) Kg $P.Ha^{-1}.an^{-1}$ lors de la saison des pluies 2008 - 2009. Cette variabilité s'observe également sur les parcelles LAB-SCV et SCV-morte, mais assez faiblement. À l'inverse, sur les parcelles SCV-vivante, quelle que soit l'année considérée, la quantité des pertes en phosphore est la même.

4. Discussion

Sur les Hautes-Terres centrales malgaches, l'intérêt des systèmes de culture en semis direct pour contrôler le carbone érodé, les pertes en azote et phosphore totaux par l'érosion hydrique a pu être mis en évidence grâce à une étude entreprise durant quatre ans sur le dispositif expérimental d'érosion à Andranomanelatra Antsirabe. Cette observation rejoint celles réalisées par d'autres études antérieures [17 - 19], avec des chiffres variables en fonction des conditions expérimentales : type du sol, teneurs en nutriments dans le sol, et topographique du terrain. La performance des systèmes SCV pour limiter les pertes en nutriments est attribuée à la minimisation de la perturbation du sol durant toute la campagne culturale : suppression de labour, sarclage, binage et buttage. Par suite de l'élimination de ces opérations culturales, les particules solides disponibles à la surface du sol pouvant être transportées par le ruissellement vers l'aval sont négligeables, voire quasi nulles. Ceci explique les faibles pertes en terre sous - systèmes SCV enregistrées sur les parcelles en semis direct durant la période d'expérimentation [7], et qui vont de pair avec la diminution des pertes en nutriments. Car il y a une plus forte corrélation entre les pertes en terre et nutriments [20] qu'entre les teneurs en éléments dans les particules du sol ***(Tableau 1)*** et les pertes en nutriments ***(Tableaux 2, 3, 4)***. A titre illustratif, lors de la campagne culturale 2008 - 2009, les pertes en terres sont les plus importantes.

Sur les parcelles LAB, elles atteignent 15 $t.Ha^{-1}.an^{-1}$; alors qu'en 2006 - 2007 elles ne dépassent pas le 2 $t.Ha^{-1}.an^{-1}$ [7]. L'élévation des pertes en terre en 2008 - 2009 se traduit par une augmentation des pertes en carbone, azote et de phosphore totaux enregistrées au cours de cette campagne par rapport aux autres, particulièrement années des mesures. Les arrière-effets du labour sur les parcelles LAB-SCV ne sont pas encore complétement éliminés lors des deux premières campagnes (2005 - 2006 et 2006-2007) après la mise en place de système SCV. L'Effet de labour antérieur permet de mieux expliquer la différence des valeurs moyennes des pertes de carbone et d'azote totaux entre les parcelles LAB-SCV et SCV-vivante à la fin de l'expérimentation ***(Tableaux 2 et 3)***. Ce n'était pas le cas pour les pertes de phosphore total, la différence significative entre les systèmes LAB-SCV, SCV-morte et SCV-vivante a eu lieu uniquement un an après la conversion des systèmes labourés en SCV ***(Tableau 4)***, par voie de conséquence la variabilité des valeurs de phosphore total entre les trois systèmes SCV est gommée. En systèmes labourés, l'enfouissement des résidus des cultures (LAB-enf) n'a pas eu d'effet sur les pertes en nutriments. Par rapport aux résultats obtenus au cours de cette étude, seule la présence des résidus des cultures en surface permettent d'enrayer l'érosion hydrique, une observation similaire est rapportée par d'autres études antérieures, réalisées ailleurs dans le monde [21 - 23]. Dans la présente étude, les parcelles SCV sont totalement protégées par la couverture

végétale et les résidus des cultures. Dès le début de la saison pluvieuse, ainsi que pendant la période la plus érosive de l'année, en décembre et janvier, sur les parcelles SCV, le taux de couverture végétale est supérieur à 92 % [7]. Cette forte biomasse laissée en surface du sol exerce un effet favorable pour l'interception de l'énergie cinétique des gouttes de pluies, diminue la quantité, l'intensité et modifie la distribution de la taille des précipitations qui atteignent la surface du sol [24] et ainsi l'effet de *«splash »* [25], qui a beaucoup d'incidence sur l'érosion hydrique, car chaque litre d'eau de pluie arrivant au sol détache environ 10 g de sol [26]. La couverture végétale piège et retient aussi les sédiments érodés, même lors d'un épisode pluvial très intense [27]. L'effet combiné du non-travail du sol et de la présence de résidus des cultures en surface des parcelles cultivées constitue un élément clé permettant aux systèmes SCV de limiter les pertes en nutriments par érosion hydrique d'une façon hautement significative. Quel que soit le type de la couverture végétale (morte ou vivante), la tendance est la même. Au fil du temps, cette technique pourrait augmenter la teneur en éléments sur les parcelles SCV, au détriment de la fertilité des sols colluvionnaires en bas de pente et des bas-fonds par absence du transfert de fertilité vers le bas. Cette réflexion mérite d'être considérée pour la pérennisation de la pratique des systèmes de cultures en semis direct à Madagascar.

5. Conclusion

L'analyse des effets des différents systèmes étudiés montre la performance des systèmes de culture en semis direct pour contrôler le carbone érodé et les pertes d'azote et de phosphore totaux. Cette performance des systèmes s'est maintenue quelle que soit l'année des mesures. Sur les parcelles labourées, l'enfouissement des résidus de cultures (LAB-enf) n'a pas d'influence visible sur la réduction des pertes en nutriments. Le recoupement de ces informations amène à déduire que la présence de couverture végétale en surface et l'absence de perturbation du sol constituent une des solutions prometteuses pour la conservation durable du sol en pente sur les Hautes-Terres de Madagascar.

Références

[1] - M. I. AGUIAR, S. M. F. MAIA, S. A. D. F. XAVIER, E. S. MENDONÇA, J. A. ARAUJO FILHO et T. S. OLIVEIRA, Sediment, nutrient and water losses by water erosion under agroforestry systems in the semi-arid region in northeastern Brazil. *Agrofor. Syst.,* 79 (2010) 277 - 289

[2] - MA XIAO, LI YE, LI BOLIN, HAN WEIYI, LIU DONGBIN et GAN XIAOZE, Nitrogen and phosphorus losses by runoff erosion: Field data monitored under natural rainfall in Three Gorges Reservoir Area, China. Catena, 147 (2016) 797 - 808

[3] - I. S. MIR, I. SAHID, M. B. GASIM, ABD. SAHIBIN. S. A. RAHIM et M. E. TORIMAN, Prediction of Soil and Nutrient Losses from the Lake Chini Watershed, Pahang, Malaysia, *Journal of Physical Science*, Vol. 26 (1) (2015) 53 - 70

[4] - M. CORBEELS, J. DE GRAAFF, T.H. NDAH, E. PENOT, F. BAUDRON, K. NAUDIN, N. ANDRIEU, G. CHIRAT, J. SCHULER, I. NYAGUMBO, L. RUSINAMHODZI, K. TRAORE, H. D. MZOBA et I. S. ADOLWA, Understanding the impact and adoption of conservation agriculture in Africa: a multi-scale analysis. *Agric. Ecosyst. Environ. In press*, (2013)

[5] - D. PIMENTEL et M. BURGESS, Soil Erosion Threatens Food Production. Agriculture, 3 (2013) 443 - 463

[6] - FAO, Investing in Sustainable Agricultural Intensification. The Role of Conservation Agriculture. A Framework for Action. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, (2008)

[7] - N. C. RAZAFINDRAMANANA, M. H. RAKOTOALIBERA, R. R. N. REMAMY, H. ANDRIAMANIRAKA et J. M. DOUZET, Effets des systèmes en semis direct sur l'érosion hydrique et les rendements des cultures pluviales sur les Hautes-Terres centrales malgaches. *Afrique Science*, 11 (5) (2015) 227 - 240

[8] - T. RAZAFIMBELO, A ALBRECHT et C. FELLER, Stockage de carbone dans les sols sous-systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal (SCV) dans différents contextes pédoclimatiques à Madagascar. Etude et Gestion des sols ,17 (2010) 139 - 154

[9] - B. RABARY, S. SAIDOU, P.LETOURMY, O. HUSSON, E. RALAMBOFETRA, N. MOUSSA et J. L. CHOTTE, Effects of living mulches or residue amendments on soil microbial properties in direct seeded cropping systems of Madagascar. *Applied soi l ecology*, 39 (2008) 236 - 243

[10] - L. S. RAFARASOA, P. LETOURMY, K. NAUDIN, A. ANDRIANANTOANDRO, T. E. RAJAONERA R. RANDRIAMANANTSOA et A. RATNADASS, Effect of cover crop residues on white grubs and adults of Heteronychus bituberculatus (Coleoptera : Dynastidae) and on the damage they cause to upland rice. *African Entomology*, 24 (1) (2016) 75 - 79

[11] - G. M. VASQUES, S. GRUNWALD et J. O. SICKMAN, Comparison of multivariate methods for inferential modeling of soil carbon using visible/near-infrared spectra. *Geoderma*, 146 (2008) 14 - 25

[12] - H. L. MARK et D. TUNNELL, Qualitative near-infrared reflectance analysis. Analytical Chemistry, 58 (1985) 379 - 384

[13] - R. ZORZONA, C. GUERRERO, J. MATAIX-SOLERA, K. M. SCOW, V. ARCENEGUI et J. MATAIX-BENEYTO, Near infrared spectroscopy for determination of various physical, chemical and biochemical properties in Mediterranean soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 40 (2008) 1923 - 1930

[14] - K. MICHEL, T. TERHOEVEN-URSELMANS, P. STEFFAN et B. LUDWIG, Use of near- and mid-infrared spectroscopy to distinguish carbon and nitrogen originating from char and forest-floor material in soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.,* 172 (2009) 63 - 70

[15] - B. MINASNY, G. TRANTER, MACBRATNEY, B. ALEX, BROUGH, M. DANIEL, MURPHY et W. BRIAN, Regional transferability of mid-infrared diffuse reflectance spectroscopic prediction for soil chemical properties. *Geoderma*, 153 (2009) 155 - 162

[16] - I. BERTOL, E. LEMOS MELLO, J. C. GUADAGNIN, A. L. VEDANA ZAPAROLLI et M. R. CARRAFA, Nutrient loss by water erosion. *Scientia Agricola*, 60 (3) (2003) 581 - 586

[17] - E. Z. NYAKATAWA, D. A. MAYS, V. R. TOLBERT, T. H. GREEN et L. BINGHAM, Runoff, sediment, nitrogen, and phosphorus losses from agricultural land converted to sweetgum and switchgrass bioenergy feedstock production in north Alabama. *Biomass and Bioenergy*, 30 (2006) 655 - 664

[18] - I. BERTOL, F. L. ENGEL, A. L. MAFRA, O. J. BERTOL et S. R. BERTOL RITTER, Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth. *Soil & Tillage Research*, 94 (2007) 142 - 150

[19] - D. DIALLO, D. ORANGE et E. ROOSE, Influence du labour, du semis direct et du type de sol sur le stock de carbone, les pertes en terre et les rendements d'une rotation intensive (coton / maïs) au Mali Sud. In Lutte antiérosive, réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles. Editeurs scientifiques Eric Roose, Hervé Duchaufour et Georges De Noni, (2012)

[20] - M. LAL et S. K MISHRA, Characterization of Surface Runoff, Soil Erosion, nutrient Loss and their Relationship for Agricultural Plots in India. *Current World Environment*, 10 (2) (2015) 593 - 601

[21] - P. SCHULLER, D. E. WALLING, A. SEPULVEDA, A. CASTILLO et I. PINO, Changes in soil erosion associated with the shift from conventional tillage to a no-tillage system, documented using 137Cs measurements. *Soil Till. Res.*, 94 (2007) 183 - 192

[22] - X. ZHAO, X. CHEN, J. HUANG, P. WU et M. J. HELMERS, Effects of vegetation cover of natural grassland on runoff and sediment yield in loess hilly region of China. J. Sci. Food Agric., 94 (2014) 497 - 503

[23] - N. MHAZO, P. CHIVENGE et V. CHAPLOT, Tillage impact on soil erosion by water : Discrepancies due to climate and soil characteristics. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 230 (2016) 231 - 241
[24] - W.D. ELLISON, Studies of raindrop erosion. *Agricultural Engineering*, 25 (1944) 131 - 136
[25] - F. BERGER, F. REY et C. CHENOST, Synthèse bibliographique de l'état des connaissances sur le rôle de protection des forêts contre les risques naturels. Grenoble : Cemagref, Unité de recherche Ecosystèmes Montagnards, (2006) 66 p.
[26] - S. LEGUEDOIS, Mécanismes de l'érosion diffuse des sols : modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés. Thèse en doctorat en Sciences Agronomiques Spécialité : Science du Sol - Université d'Orléans, (2003) 156 p.
[27] - F. REY, J. L. BALLAIS, A. MARRE and G. ROVERA, Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Geoscience de surface*, 336 (2004) 991 - 998