

COLLECTIF "SOL-SCV"



SOLS TROPICAUX, PRATIQUES SCV, SERVICES ECOSYSTEMIQUES



AVEC LE SOUTIEN DE :



COLLECTIF « SOL-SCV »



SOLS TROPICAUX, PRATIQUES SCV, SERVICES ECOSYSTEMIQUES

AVEC LE SOUTIEN DE :



MAI 2008

AVANT-PROPOS

Le secrétariat du Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) a organisé, le 11 mars 2008, avec le Comité Scientifique et Technique du FFEM, une journée de présentation des principaux acquis scientifiques de l'agroécologie. Ce fut l'occasion de faire une restitution d'un séminaire international qui s'est tenu à Madagascar du 03 au 08 décembre 2007 :

« Les sols tropicaux en semis direct sous couvertures végétales »

Dans nombre de pays, et tout particulièrement dans les régions tropicales, on observe que les systèmes de production traditionnels mis en œuvre pour l'obtention des produits agricoles induisent un épuisement des sols que les faibles apports d'engrais ne peuvent compenser. Cette situation, parfois dramatique, conduit à une baisse sensible des rendements agricoles et, par conséquent, à un effondrement des revenus des paysans. De plus, la croissance démographique exponentielle à laquelle nous assistons aujourd'hui, nous impose de trouver rapidement des solutions durables capables de subvenir aux besoins alimentaires de plus de 9 milliards de personnes.

Conscients de cette situation, l'AFD et le FFEM soutiennent depuis plus d'une dizaine d'année, des programmes de développement de l'agroécologie à travers le monde. Ces programmes visent à démontrer qu'il est possible de produire autrement et de mettre en œuvre des systèmes de production performants et respectueux de la préservation des ressources naturelles. Ces nouvelles techniques de production agricole s'appuient sur l'idée qu'il est possible de s'affranchir du travail du sol (labours, sarclages) en laissant le soin à des plantes de couverture d'assurer un travail équivalent : techniques dites « Systèmes de cultures sous couverture végétale » (SCV). Ces techniques sont aujourd'hui largement développées en Amérique du Nord et du Sud. Elles se développent en Europe. Dans les régions tropicales, il est nécessaire de les adapter aux conditions particulières de ces zones : sols pauvres, petits producteurs, pluviométries irrégulières, etc.

Autour d'un public de chercheurs (CIRAD, IRD, INRA, CNRS, CEMAGREF, Ecole des Mines, etc.), de décideurs (MAEE, Min Agri, MEDAD) et d'agriculteurs impliqués dans ces actions, il a été possible, au cours de cette journée, de tirer un premier bilan des impacts de ces pratiques agricoles sur l'environnement :

- Les expérimentations mises en place dans les différents pays d'intervention démontrent clairement que les SCV jouent un rôle central dans l'amélioration de

la structure des sols et leur composition chimique. De ce fait, les SCV sont un moyen efficace de lutte contre la dégradation de la fertilité des sols.

- Les pratiques agricoles SCV peuvent avoir un effet sur la composition de la faune et de la flore des sols. Partant, ces pratiques peuvent conduire, d'une part, à lutter efficacement contre les agents pathogènes des cultures, d'autre part à restaurer une importante biodiversité faunique exerçant des effets très positifs sur de nombreuses propriétés des sols importantes pour la fertilité et la lutte contre le ruissellement et l'érosion.
- En assurant une couverture des sols sur la totalité de l'année, les pratiques SCV ont un impact positif sur l'érosion des sols. Elles permettent ainsi de maintenir les sols en place et de réduire les risques de dégradation de l'environnement en aval.
- Enfin, ces pratiques induisent une accumulation de carbone dans les sols, carbone provenant, via les restitutions végétales, du gaz carbonique (CO₂) de l'atmosphère. Ces pratiques exercent donc ce que l'on appelle la « séquestration du carbone » dans le cadre de la réduction globale des gaz à effet de serre de l'atmosphère.

Au cours de cette journée d'étude, il a ainsi pu être constaté que le sol, et les sols agricoles en particulier, représentent un capital précieux et fragile qu'il convient de protéger, voire d'améliorer. Si les techniques traditionnelles d'exploitation agricole ont fait la preuve de leurs limites, les techniques SCV sont une voie prometteuse de préservation de ce capital.

Les pages qui suivent sont quelques illustrations de la richesse des résultats présentés au cours du Séminaire de Madagascar.

A ce propos, permettez-moi au nom de l'ensemble de l'équipe FFEM et AFD en charge du financement et de la gestion de ces projets d'agroécologie, de remercier vivement l'ensemble du « Collectif SOL-SCV » qui a pu mener cette synthèse à partir de résultats obtenus pendant 5 ans sur un réseau de situations mises en place par le CIRAD et ses partenaires nationaux ou privés au Brésil, à Madagascar et au Laos et avec une très forte implication scientifique de l'IRD. J'adresse, en particulier, mes félicitations aux deux porte-paroles du « Collectif SOL-SCV » que sont les deux co-présidents du comité d'organisation du Séminaire de Madagascar : Christian Feller (IRD, UR 179 SeqBio) et Lilia Rabeharisoa (LRI, Université Antananarivo).



Signé : Christophe Du Castel

Chargé du projet AgroEcologie au Fond Français pour l'Environnement Mondial

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	9
2. Services en terme de fertilité	14
2.1. Propriétés chimiques des sols	14
2.2. Propriétés physiques des sols	17
2.3. Indicateurs biologiques globaux des sols	18
3. Services en terme de biodiversité faunique et de lutte contre la faune pathogène	20
3.1. Densités et diversités de la macrofaune non pathogène du sol	20
3.2. Densités et diversités de la macro- et mésofaune pathogène du sol	21
4. Services en terme de lutte contre le ruissellement et l'érosion	22
4.1. Erosion aratoire	22
4.2. Erosion hydrique et ruissellement	23
5. Services en terme de lutte contre l'effet de serre : SCV et « séquestration du carbone »	27
5.1. SCV et stockage du C dans le sol	28
5.1.1. Madagascar	28
5.1.2. Brésil	29
5.1.3. Laos	30
5.2. Flux de N ₂ O (et CH ₄)	30
5.2.1. Brésil	30
5.2.2. Madagascar	32
5.3. Formes du C stocké dans le sol (Brésil, Madagascar)	32
5.4. Le C érodé	34
Conclusions et perspectives : le sol comme un « capital »	35
Références	38

INTRODUCTION

Le sol est une ressource non renouvelable aux échelles humaines. Reconstituer la surface d'un sol après érosion demande des centaines à des milliers d'années. Or les sols sont fragiles, entre autres les sols tropicaux, et demandent à être gérés avec précaution, d'une part pour ne pas être soumis à l'érosion hydrique et éolienne, d'autre part pour conserver leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques essentielles à une productivité végétale optimum dans un contexte socio-économique donné.

Dans les pays tropicaux en voie de développement, la démographie croissante, l'insécurité alimentaire grandissante, se traduisent par une pression foncière de plus en plus forte. Il en résulte que les systèmes traditionnels de Défriche-Culture-Jachère, en particulier sur les pentes, qui étaient adaptés à une population faible ne sont plus appropriés maintenant à des systèmes à raccourcissement de la durée de jachère, ni à la nécessité d'une production végétale et animale plus élevées. La perpétuation de ces systèmes dans leur mode de gestion traditionnelle, impliquant aussi un faible niveau d'apport de fertilisants, conduit donc à une dégradation générale des sols : baisse de fertilité (agriculture dite « minière »), augmentation de l'érosion, perte de biodiversité faunique et microbienne.

Quand bien même le paysan aurait la possibilité de se fournir en engrais, comme dans certains pays émergents, le seul apport de fertilisant minéral est insuffisant pour restaurer un niveau correct de fertilité, car (i) quel que soit le niveau de l'apport, la plante prend une partie de ses éléments nutritifs aussi dans le sol (par exemple, 50 % pour l'azote), (ii) de très nombreuses propriétés des sols sont fortement corrélées aux stocks de matière organique du sol (MOS).

Par ailleurs, le travail du sol, s'il est mal géré, représente un risque important de dégradation physique du sol, en particulier vis-à-vis de l'érosion hydrique si le sol est nu en période de pluies, mais également par une accélération de la minéralisation de la matière organique du sol.

Il y a donc nécessité de proposer des alternatives de gestion des terres qui impliquent à la fois : (i) un niveau adéquat de restitution d'éléments fertilisants au sol, (ii) un maintien – voire une amélioration – du stock organique du sol, et (iii) une protection contre le ruissellement et l'érosion.

Enfin, l'agriculture d'aujourd'hui dans le monde entier doit prendre en compte aussi, à côté de sa fonction de production, les problèmes d'environnement, que ce soit aux niveaux locaux

(érosion, colmatage des drains et des barrages, etc.) ou globaux (effet de serre, séquestration du carbone, protection de la biodiversité, etc.)

On voit donc que le problème de la gestion des terres pour l'agriculture est complexe et pose des problèmes spécifiques dans les pays du Sud. Le sol y a une place majeure et représente un capital pour la production agricole, mais aussi pour la défense de l'environnement, capital qu'il faut conserver, voire améliorer. Le sol à travers ses PROPRIÉTÉS physiques, chimiques et biologiques va donc devoir remplir des FONCTIONS diverses comme :

- une réserve de nutriments pour la plante et les organismes vivants du sol,
- un support organisé et aéré pour les racines des plantes, la faune et la microflore et la circulation de l'eau et de l'air,
- un lieu de stockage d'éléments qui peuvent être nocifs pour la plante et l'homme comme les métaux lourds et les pesticides,
- une source ou un puits de gaz à effet de serre, une préoccupation récente mais majeure.

A ces FONCTIONS correspondent des SERVICES (que l'on qualifie d' « écosystémiques ») rendus par le sol pour les populations humaines, en particulier :

- le maintien ou l'amélioration de la fertilité,
- la régulation des flux d'eau qui conditionnent l'infiltration dans le sol ou au contraire le ruissellement à sa surface et qui donne naissance à l'érosion hydrique,
- la détoxification des polluants,
- la régulation de la composition de l'atmosphère et donc des effets sur les changements climatiques,
- le maintien ou l'amélioration de la densité et de la biodiversité des organismes dans le sol qui interviennent directement dans tous les points évoqués ci-dessus.

A l'interface de tous ces aspects se situent les rôles majeurs (et liés) joués par :

- les restitutions organiques au sol,
- le niveau du stock de matière organique existant dans le sol.

Sur ces bases, diverses alternatives de gestion des terres sont testées dans les régions inter-tropicales. Elles participent de ce qui est généralement dénommé l'« Agroécologie ». Elles sont toutes basées sur la nécessité : (i) de restituer au sol des quantités élevées de matières organiques (d'origine variées), (ii) de couvrir le sol le plus possible pour lutter contre l'érosion, (iii) de favoriser le stockage de matière organique dans le sol car celle-ci exerce un rôle capital aussi bien du côté de la fertilité que du côté environnemental (c'est elle qui est le compartiment de séquestration du carbone), (iv) de ne pas travailler le sol.

Figure 1



Systèmes Conventionnels et SCV :

- sur les Hautes Terres de Madagascar : préparation d'une parcelle en système conventionnel labouré manuellement (a) et système SCV en couverture vivante (b)
- au Brésil (Parana) : préparation d'une parcelle en système conventionnel labouré mécaniquement (c) et système SCV en couverture morte (d). Clichés O. Husson.



Parmi ces alternatives on peut citer : les plantations sylvicoles, l'agroforesterie, le non brûlis des terres que ce soit des jachères, des résidus de récolte ou de certaines cultures comme la canne à sucre et, plus récemment (au Brésil d'abord puis à Madagascar, au Laos et divers pays africains), les « systèmes de cultures en semis direct, sans travail du sol sous couverture végétale » communément désignés SCV (Fig. 1b,d), dont il sera question ici, et qui a donné lieu en décembre 2007 à un séminaire international à Madagascar¹, dont nous rapportons un certain nombre de résultats dans cette synthèse.

1. Le projet de recherche et le séminaire correspondants ont été fortement soutenus financièrement par le Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) de 2002 à 2007 (Contrats de service IRD/AFD/FFEM CZZ 1224.02.X et GSDM/AFD/FFEM N° CZZ 1224.08)

L'objectif de ce document est de montrer les potentialités que peuvent offrir les pratiques de type SCV (en comparaison de pratiques dites « Conventionnelles » impliquant le travail du sol, Fig. 1a,c) pour fournir des services écosystémiques optimum (fertilité, environnement) liés aux propriétés des sols.

Dans un certain nombre de pays tropicaux et subtropicaux tels le Brésil et l'Argentine, les systèmes SCV ont déjà fait leurs preuves sur le plan de la productivité végétale en comparaison des systèmes conventionnels avec travail du sol auxquels ils succèdent (Fig. 1c). Les expériences de moyenne à longue durée menées à Madagascar confirment cette tendance (Fig. 2) mais l'absence d'effets positifs, voire parfois des effets négatifs, peuvent être aussi être notés lorsque les pratiques n'ont pas encore été parfaitement mises au point ou pas encore totalement maîtrisés par le acteurs, ou lorsque que les systèmes sont jeunes et n'ont pas atteint leur équilibre (résultats non montrés).

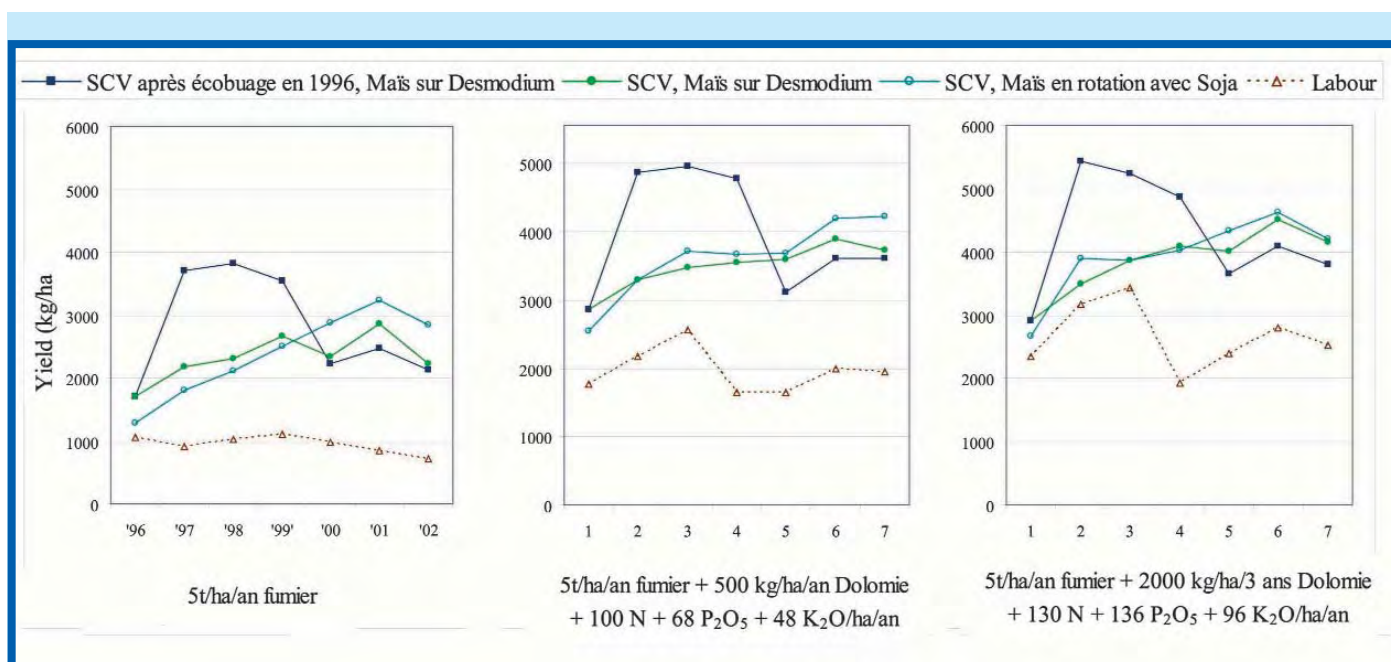


Figure 2

Rendements comparés en maïs de 3 traitements SCV et d'un traitement Conventionnel à Antsirabe (Madagascar).

Les pratiques SCV peuvent et doivent être très diverses selon le contexte bioclimatique et socioéconomique, en particulier dans le mode de gestion des matières organiques restituées au sol, qu'elles proviennent des résidus de récolte laissés sur le sol sous forme de mulch (Fig. 1d) ou de la matière végétale aérienne et racinaire d'une plante de couverture (Fig. 1b). Les effets alors en terme de productivité (effet précédent) peuvent varier fortement selon la qualité et/ou la quantité des matières végétales restituées et leur forme de restitution.

La figure 3 (Seguy et al., 2001) illustre cet aspect pour diverses pratiques SCV au Brésil.

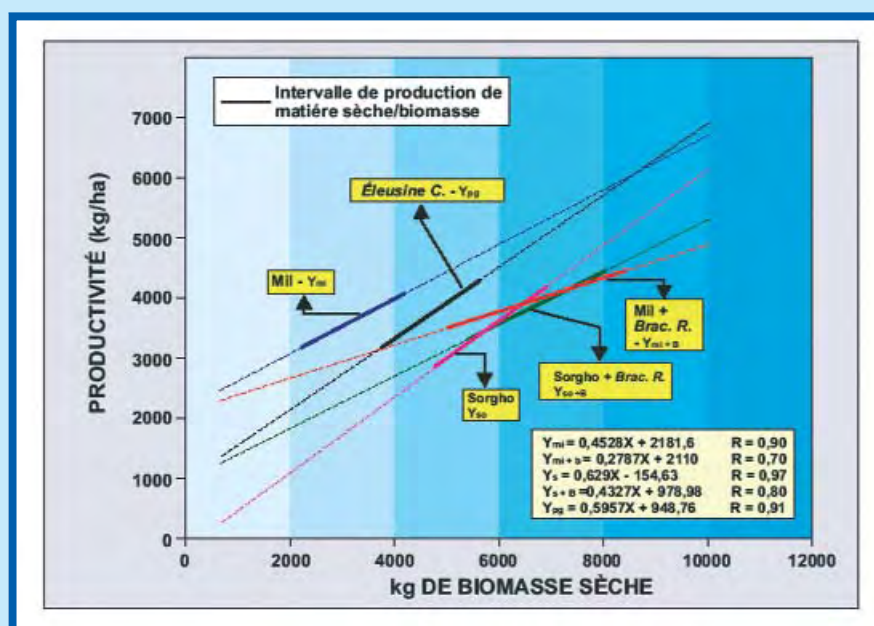


Figure 3

Régressions entre la quantité et la nature de la biomasse sèche et la productivité du soja de cycle moyen (FT114) sur 3 ans de semis direct - (Seguy et al., 2001, (1997/2000)-AGRONORTE - SINOP/MT, 2000).

On constate que : (i) pour chaque type de SCV la productivité du soja dépend du niveau de biomasse apportée au sol par le système, (ii) que pour une même biomasse végétale apportée (par ex. 5 tMS/ha) la productivité du soja varie fortement selon les systèmes : faible avec le système Sorgho, élevée avec le système Éleusine.

Quel sont les effets des pratiques SCV sur les propriétés des sols et les services écosystémiques associés ?

2. SERVICES EN TERME DE FERTILITE

Le niveau de productivité végétale va dépendre, pour un climat et une pratique donnée, de l'ensemble des propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol.

2.1. Propriétés chimiques des sols

Pour les propriétés chimiques, l'exemple choisi est celui des Hautes Terres de Madagascar (Antsirabe). Les données générales proviennent des analyses fournies par Michellon et al. (données non publiées), celles sur le carbone (C) de Razafimbelo et al. (2006). Le dispositif agronomique permet une comparaison statistique des propriétés d'un sol sous un système conventionnel avec labour au même sol sous trois systèmes différents SCV d'âge de 8 à 12 ans. On étés analysés : Carbone et Azote, pH, capacité d'échange cationique CEC (à pH7 et au pH du sol), les cations échangeables (H+Al, Al éch., Ca éch., Mg éch., K éch., Na éch.), la saturation en bases (rapport Ca+Mg+K+Na éch./CEC) et les taux de saturation individuels de chaque cation (rapport Cation éch./CEC), le rapport Ca+Mg/K, le phosphore assimilable, et ce pour les 5 couches suivantes : 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 cm.

Les teneurs en C de la couche de surface (0-5 et parfois 5-10 cm) sont systématiquement plus élevées pour les systèmes SCV que pour le système Conventionnel (Razafimbelo et al., 2006, et Fig. 4)

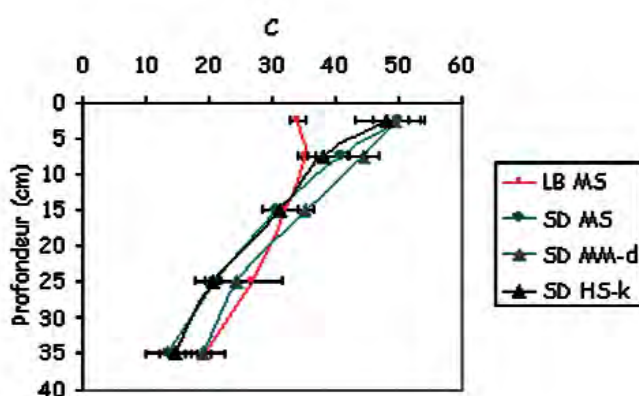


Figure 4

Variations des teneurs en C du sol avec la profondeur pour un système Conventionnel (LB-MS) et 3 systèmes SCV (SD MS, SD MM-d, SD HS-k).

Ces augmentations significatives des teneurs en C pour la couche de surface du sol sous SCV sont souvent retrouvées dans d'autres situations bioclimatiques étudiées que ce soit à Madagascar (Lac Alaotra, Tulear, Manakara) et au Brésil sous réserve de durées de SCV supérieures à 4 ans.

Par contre, pour l'ensemble des autres propriétés chimiques, pratiquement aucune différence entre traitement n'apparaît pour la situation des Hautes Terres de Madagascar. Les seules différences concernent des valeurs plus élevées en système conventionnel qu'en SCV pour : la CEC à pH du sol dans les horizons 10-20 et 20-40 et P assimilable pour l'horizon 10-20 cm (résultats non montrés).

Cette absence de variation de ces propriétés selon le traitement peut paraître surprenante car il est bien connu que de nombreuses propriétés édaphiques varient avec les teneurs en C (ou MO) comme le montre la figure ci-dessous pour des situations étudiées chez des petits producteurs par Corbeels et al. (données non publiées) au Brésil (Fig. 5)

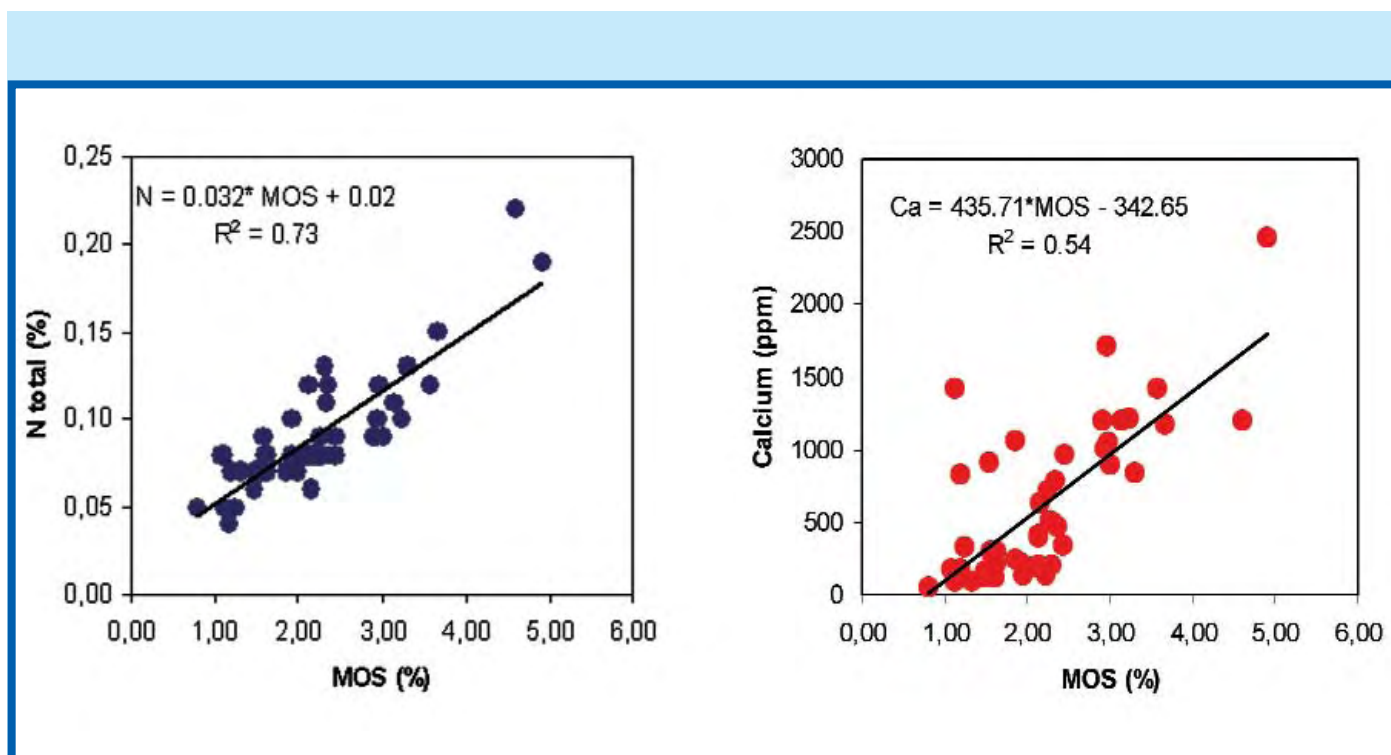


Figure 5

Variations des teneurs en azote total (N) et en calcium échangeable (Ca) selon le taux de matière organique du sol (MOS) pour des situations cultivées au Brésil (Cerrados) chez des petits producteurs. (Données non publiées Corbeels et al.)

Dans le cadre d'une étude visant à étudier l'effet de l'âge de parcelles en SCV (chronoséquence) au Brésil, Maltas et al. (2007) montrent que le stock d'azote total du sol peut augmenter de l'ordre de 80 à 90 kg N/ha/an (Fig. 6) dans des systèmes intensifs à forte restitution de biomasses. Toutefois, la disponibilité additionnelle en azote minéralisé due à cette augmentation de stock en N organique n'atteint, après 10 ans en SCV, que 21 kg/ha durant les 120 jours du cycle du maïs.

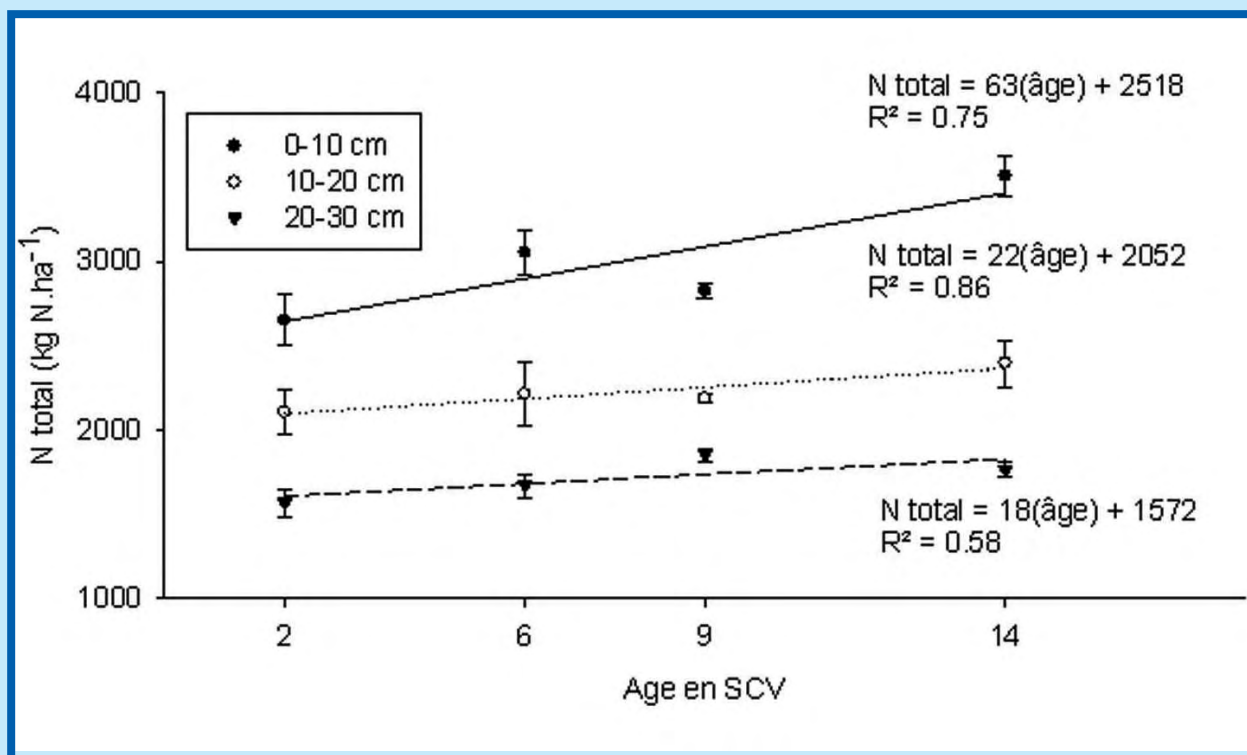


Figure 6

Augmentation de stocks d'azote sous systèmes SCV dans la région de Rio Verde (État de Goiás) pour un sol ferrallitique argileux.

Par ailleurs, de par l'utilisation de plantes de couverture recyclantes, les SCV sont plus efficaces que les systèmes conventionnels sur l'ensemble de la saison des pluies réduisant de moitié les pertes de nitrates par lixiviation (tableau 1). Malgré cela, les SCV peuvent quand même perdre de l'ordre de 100 à 120 Kg de N durant le cycle du maïs. Ces résultats mettent en défaut la thèse selon laquelle les SCV pourraient permettre de se passer complètement de fertilisation que l'on voit parfois évoquée dans certaines enceintes. Ce n'est pas le cas sous les climats tropicaux humides où, même en SCV, les pertes en N du système doivent être compensées, soit par des engrais azotés chimiques ou organiques, soit par l'incorporation systématiques de légumineuses dans les rotations.

Tableau 1

Bilan annuel en azote minéral pour des situations Conventiennel et SCV au Brésil (Etat de Goias, sol ferrallitique argileux) (Données Scopel et al. 2005)

	Conventionnel	SCV
N minéral initial	189	34
final	47	86
Apport N chimique	93	139
N minéralisé de la MO sol	121	187
N minéralisé des pailles	-	60
Pertes		
Exportation Plante	91	156
Volatilisation + Ruissellement	37	56
Lixiviation	228	122

Les mêmes tendances sont observées pour les situations des Hautes Terres de Madagascar (données Rakotoarisoa et al.) avec des stocks de N total plus élevés sous SCV que sous Conventiennel, et des migrations de N minéral dans le profil avec possibilités de pertes par lessivage.

Le phosphore (P) est un des facteurs limitants de la productivité végétale dans les sols tropicaux peu fertilisés, soit que les stocks de P soient naturellement faibles, soit que compte tenu de la richesse souvent élevée en oxydes de fer et d'aluminium, le P apporté par les engrais soit immédiatement immobilisé et non disponible pour la plante. La mobilisation du P dépend beaucoup des activités biologiques du sol, en particulier de la présence de champignons mycorhiziens à arbuscules (MA). Le potentiel infectieux de ces champignons va déterminer une partie de la mobilité de P et donc conditionner la fertilité phosphatée. Les études menées sur les Hautes Terres malgaches à Andronamelatra (Données non publiées de Rasoamampionona et al.) ont permis de montrer que le potentiel infectieux des mychorhizes est naturellement faible dans les sols étudiés mais est amélioré par les pratiques SCV, ce qui se manifeste sur la concentration en P dans la plante.

2.2. Propriétés physiques des sols

Les densités apparentes varient relativement peu selon les traitements (résultats non montrés). Par contre, la stabilité de l'agrégation, exprimée par le taux de macroagrégats stables (MA) – qui va conditionner de très nombreuses propriétés physiques du sol (porosité, aération, enracinement) – est généralement plus élevée sous pratiques SCV que sous Conventiennel. Cette propriété est dépendante des teneurs en MO (ou en C) du sol (Figure 7) (Données Razafimbelo et al., 2006).

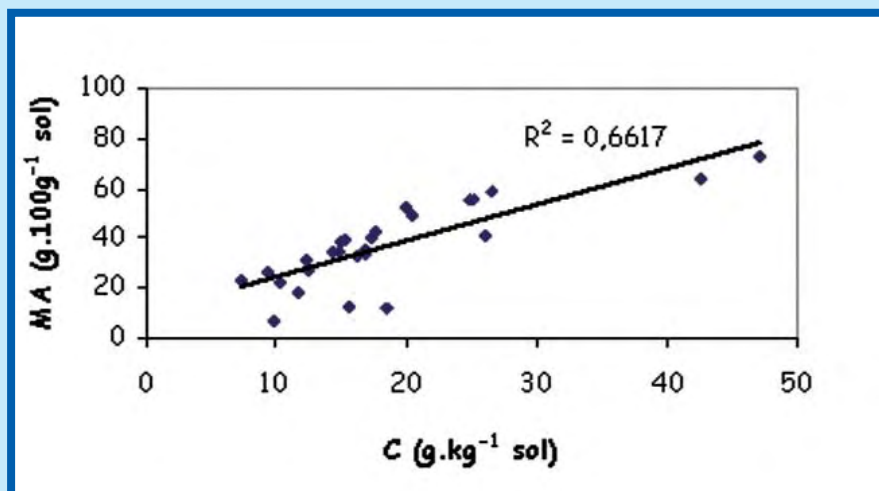


Figure 7

Relation entre teneur en Macroagrégats stables et en C du sol (couche 0-5 cm). Diverses situations de Madagascar (Antsirabe, Manakara, Alaotra, Tuléar). (Données Razafimbelo et al., 2006).

2.3. Indicateurs biologiques globaux des sols

Quelques indicateurs de propriétés biologiques globales (Biomasse microbienne, minéralisation du C et activités enzymatiques ont été mesurés par Rabary et al. (données non publiées) pour la situation des Hautes Terres de Madagascar et sont rapportés dans le tableau 2.

La biomasse microbienne, compartiment actif à renouvellement rapide du sol, peut donner une indication précoce de l'évolution des stocks organiques et permettre d'apprécier l'évolution du système. Les actions microbiennes sur les processus de minéralisation et de transformation de la matière organique sont des fonctions d'intérêt agronomique. La question posée ici est de savoir si les SCV améliorent la qualité du sol en termes de biomasse microbienne et leurs activités par rapport à la jachère et les systèmes sous labour, et ensuite de comparer, entre eux, les SCV sur résidus et sur plante de couverture vivante. Le tableau 2 indique que le système sous labour conventionnel donne une biomasse microbienne, une respiration et des activités enzymatiques plus faibles que la jachère. Les activités microbiennes sous SCV varient en fonction des systèmes et montrent en général des activités plus élevées que la jachère naturelle sauf pour l'activité uréasique. Le système SCV sur résidus de récolte est performant, tandis que pour les SCV sur couverture vive la performance dépend de la nature de la couverture et du système.

Tableau 2

Biomasse microbienne, respiration basale et activités enzymatiques du sol des systèmes de culture en SCV comparées au sol des systèmes sous labour conventionnel et en jachère à Madagascar. (Hautes Terres). (Données de Rabary et al., 2008)

Gestion du sol	Biomasse microbienne $\mu\text{g Cm g}^{-1}\text{ sol}$	Respiration $\mu\text{g CO}_2\text{-C g}^{-1}\text{ sol}$	β -glucosidase $\mu\text{g glucose g}^{-1}\text{ sol h}^{-1}$	Phosphatase acide $\mu\text{g PNP g}^{-1}\text{ sol h}^{-1}$	Uréase $\mu\text{g NH}_4^+\text{-N g}^{-1}\text{ sol}$
SCV couverture vive Kikuyu Haricot/soja	458a	349a	149ab	451b	52bc
SCV couverture vive Desmodium Maïs/maïs	236bc	193bc	131b	453b	72ab
SCV résidus de récolte Maïs/soja	439a	384a	172a	503a	51bc
Labour (CT) Maïs/soja	211c	120c	68c	406c	48c
Jachère naturelle (JN)	392ab	284ab	61c	155d	84a

CT : Labour conventionnel ; SCV : Semis direct sur couverture végétale.

Les moyennes suivies des mêmes lettres n'ont pas de différence significative pour chaque variable étudiée

De cet ensemble de résultats, on constate que les pratiques SCV permettent très souvent une augmentation des teneurs en C (ou MO) et en azote N, surtout grâce à une productivité primaire plus importante de par l'incorporation des résidus de plantes de couvertures, mais que les résultats sont variables sur les autres propriétés chimiques des sols (exemple de Madagascar). Les systèmes SCV améliorent aussi généralement l'ensemble des déterminants physiques, enzymatiques et microbiens de la fertilité.

3. SERVICES EN TERME DE BIODIVERSITE FAUNIQUE ET DE LUTTE CONTRE LA FAUNE PATHOGENE

3.1. Densités et diversités de la macrofaune non pathogène du sol

La faune du sol remplit diverses fonctions qui peuvent être considérées comme négatives (par exemple présence de faunes pathogènes vis-à-vis de la plante) ou positives si l'activité et biodiversité fauniques conduisent à améliorer les propriétés du sol.

L'effet des pratiques SCV sur la densité et la biodiversité de la macrofaune du sol a été étudié à la fois sur des situations du Brésil et de Madagascar. Les tendances générales étant les mêmes, nous montrons ici un exemple brésilien (d'après Blanchart et al., 2007).

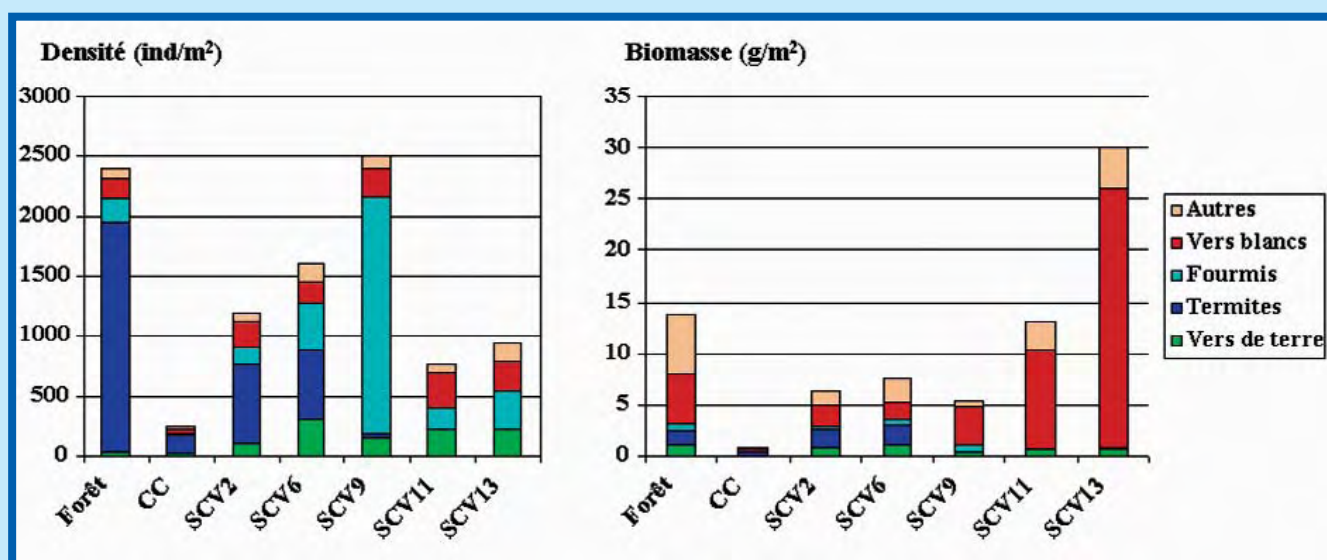


Figure 8

Densité (en individus/m²) et biomasse (en g/m²) des principaux taxons de la macrofaune du sol pour la chronoséquence Rio Verde sous Cerrados (Forêt), système conventionnel (CC) ou systèmes SCV de différentes durées (SCV). Le nombre suivant SCV indique la durée du système en années.

En densité, les principaux taxons observés sont les termites (36 % des individus collectés), les fourmis (32 %), les coléoptères (14 %, sous forme de larves de scarabées : « vers blancs ») et les vers de terre (11 %) (Fig. 8). Les résultats montrent clairement que les organismes de la faune du sol sont bien plus nombreux dans les systèmes SCV que dans le système traditionnel. On note aussi que les SCV entraînent une disparition des termites au bout de quelques années. En terme de biomasse, on note une augmentation spectaculaire des larves de Coléoptères (vers blancs) avec le semis direct, surtout à partir de 8 ans, alors que les vers de

terre, qui avaient disparu en système conventionnel, reviennent simplement à un niveau équivalent à celui de la végétation naturelle. Blanchart et al. (2007) ont mis en évidence, pour les parcelles en SCV, une corrélation significative et positive entre la biomasse des vers blancs et les stocks de C du sol. Les vers blancs peuvent être, soit des animaux rhizophages nuisibles pour les cultures (comme l'espèce *Phyllophaga*), soit être saprophages et avoir une action positive sur les propriétés physiques des sols, au même titre que les vers de terre. C'est cette dernière fonction qui est essentiellement exercée ici par ces « vers blancs » : les systèmes SCV permettent donc, dans cette situation du Brésil, le développement d'une biodiversité fonctionnelle très positive.

3.2. Densités et diversités de la macro- et mésofaune pathogène du sol

Certaines espèces de vers blancs ont été identifiées à Madagascar comme particulièrement pathogènes (*Heteronychus* sp. et des *Melolonthidae*) sur le riz et conduisent, sans traitement insecticide, à de fortes chutes de rendements (Antsirabe et Lac Alaotra). Les pratiques SCV ont des effets très variables, selon le type de système et les types de sol, sur la lutte contre ces pathogènes : aucun effet ou augmentation des pathogènes sur certains sites et selon ou non présence d'avoine dans le système SCV (Andranomanelatra), diminution sur d'autres (Ibity). Toutefois la lutte intégrée par un champignon (*Metarhizium anisopliae*) s'avère très efficace en système SCV au Lac Alaotra (Données non publiées de Razafindrakoto et al.).

Les nématodes représentent aussi un groupe faunique qui intervient à différents niveaux du fonctionnement du sol à travers des nématodes libres non pathogènes ou rhizopathogènes. Il a été montré pour les Hautes Terres de Madagascar (Andranomanelatra), que certaines pratiques SCV peuvent accroître le risque phytopathogène lié aux nématodes. C'est en particulier le cas des SCV avec couverture vivante de *Kikuyu*, le risque étant généralement plus élevé pour les couvertures vivantes que pour les couvertures mortes (Données non publiées de Villenave et al.).

De cet ensemble de résultats, on constate que les pratiques SCV améliorent fortement les densités, diversités et activités de la macrofaune et microflore du sol avec des effets considérés généralement positifs comme sur le cycle des éléments nutritifs et des propriétés physiques des sols, avec, à la fois, la création d'une macroporosité supplémentaire et l'amélioration de la stabilité de l'agrégation. Toutefois, en terme de lutte contre les insectes terricoles et les nématodes pathogènes, les premiers résultats indiqueraient que le service rendu serait globalement nul, voire négatif, pour les situations étudiées. Mais ce type d'étude nécessite d'être étendu et approfondi en raison de la très grande variabilité des situations et de leur évolution dans le temps.

4. SERVICES EN TERME DE LUTTE CONTRE LE RUISSELLEMENT ET L'ÉROSION

Parmi les formes d'érosion, il faut distinguer : l'érosion aratoire, l'érosion hydrique et l'érosion éolienne. Seules les deux premières formes seront commentées ici.

L'érosion aratoire est une forme généralement peu étudiée. C'est le transfert vers l'aval d'agrégats de sols sous l'effet du seul travail du sol et de la pesanteur. Elle existe particulièrement sur pentes fortes et peut représenter une quantité non négligeable de transfert de terre du haut vers le bas de la parcelle (Fig. 9). Dans le cadre du Projet FFEM, ceci a été quantifié au Laos (Données non publiées de De Rouw et al.).

4.1. Erosion aratoire



Figure 9

L'érosion aratoire due au travail du sol sur pentes fortes au Laos (cliché De Rouw). Noter (dans le cercle) le « nuage » d'agrégats emportés en aval.

Cette érosion peut atteindre pour des systèmes fortement sarclés des valeurs de 4, 6 et 11 t/ha/an pour des pentes respectivement de 30, 60 et 90 %. Il est clair que des pratiques SCV, avec un travail du sol réduit, vont permettre d'éviter une grande partie de cette forme d'érosion.

Les pratiques SCV, aux USA puis en Amérique du Sud ont été promues et appropriées dans l'optique de lutter contre l'érosion hydrique et éolienne en évitant que le sol soit nu au moment des fortes pluies ou des vents forts.

4.2. Érosion hydrique et ruissellement



Figure 10

Exemple d'érosion hydrique au Brésil. À gauche sur parcelles en système Conventuel, à droite sous système SCV (cliché Séguy)

Au-delà de la perte en sol, et particulièrement des couches de surface les plus riches en MO et en éléments nutritifs (Figure 10), l'érosion conduit aussi à des risques environnementaux en aval problématiques comme la pollution des eaux (Fig. 11) ou l'envasement des barrages.



Figure 11

Pollution d'une rivière au Brésil suite à une érosion en amont (cliché Cogo).

Le service rendu par les pratiques SCV en terme de lutte contre l'érosion est très souvent spectaculaire comme le montre le Tableau 3 avec de très fortes diminutions des pertes en terre.

Tableau 3
 Pertes en terre par érosion hydrique selon la rotation et le type de sol
 (données présentées par Cogo)

Sol	Culture	Age (an)	Conventionnel	Conventionnel	Labour minimum	Non Labour
			Résidus brulés	Résidus incorporés		
			—Mg.ha ⁻¹ .an ⁻¹ —			
Latossol	B/S	6	10,9	3,6	-	1,5
Latossol	B/S	4	-	3,2	-	1,1
Latossol	JS	6	9,0	6,0	-	5,0
Argissol	B/S	9	-	13,1	3,2	0,5
Argissol	B/S	4	-	5,3	-	1,0
Argissol	B/S	4	51,5	39,5	-	2,2
Nitossol	B/S	11	-	34,0	11,3	8,8
Nitossol	B/S	4	-	6,0	-	0,2

B/S: Blé/Soja; J/S: Jachère/Soja

Ce sont des résultats tout aussi spectaculaires qui se retrouvent aussi au Bénin pour un système SCV Maïs-Mucuna (Barthès et al., 2004) ou au Mexique (Données Scopel et al.).

Il n'empêche (Données présentées par Cogo) que les seules pratiques SCV, dans des contextes de forte pente et/ou de climat semi-aride sont insuffisantes à elles seules pour régler complètement les problèmes d'érosion et doivent rester associées à d'autres techniques plus traditionnelles de lutte anti-érosive (terrasses en courbes de niveau, etc.). Ceci est parfois oublié.

A Madagascar, sur les Hautes Terres (Andranomanelatra), des dispositifs d'étude du ruissellement et de l'érosion ont été installés dans les parcelles d'essai SCV / Conventionnel (Données non publiées de Douzet et al.), et ce à différentes échelles : microparcelles de 1 m², parcelles dites Wischmeyer de 21 m² sur pente (Fig. 12).



Figure 12

Parcelles d'érosion,
Antsirabe, Madagascar
(Cliché Douzet).

Les résultats à l'échelle du m^2 (Fig. 13, données non publiées de Douzet et al.) indiquent clairement le rôle extrêmement positif des pratiques SCV sur la diminution du ruissellement et de l'« érosion » (en fait c'est l'érodibilité qui est appréhendée à cette échelle). L'érodibilité passe de 8-14 t/ha/an pour les systèmes conventionnels à 1-3 t/ha/an pour les systèmes SCV.

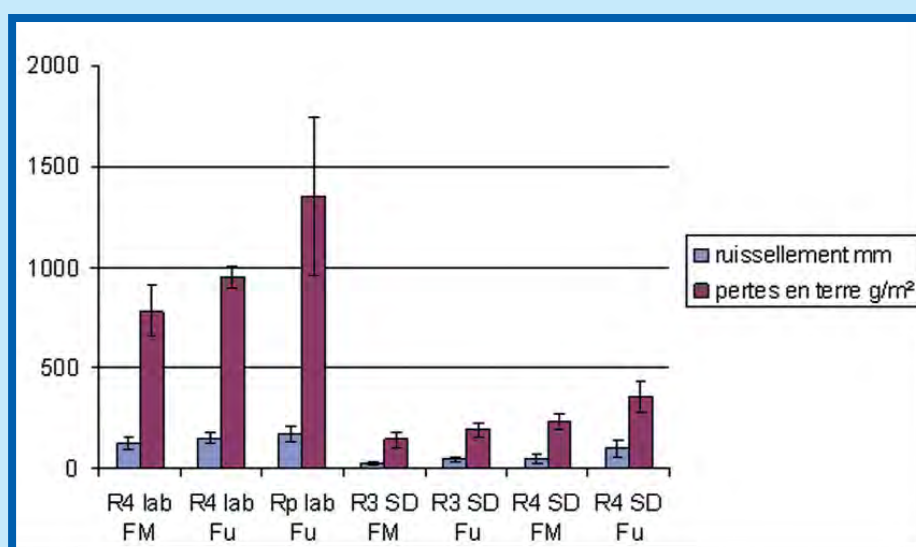


Figure 13

Ruissellement (mm/an) et pertes en terre ($g \cdot m^{-2} \cdot an^{-1}$) mesurés sur des parcelles d'érosion d' $1 m^2$, Antsirabe, Madagascar : lab : labour, SD : système SCV, R4 : rotation maïs+soja/riz, R3 : rotation maïs+brachiaria/riz, Rp : rotation maïs+haricot/riz ; FM : fumure organo-minérale, Fu : fumure organique

Sur les parcelles de pente, les mêmes tendances sont observées avec un effet positif des SCV sur la réduction du ruissellement et donc de l'érosion, les pertes en terre passant de 1 à 3 t/ha/an pour conventionnel à 0,5 à 1 t/ha/an pour SCV.

La liaison inverse entre recouvrement du sol et pertes en terre est souvent établie, on la retrouve ici (Fig. 14, données non publiées de Douzet). Cette figure montre, toutes situations confondues, que l'érosion décroît exponentiellement avec le taux de recouvrement du sol.

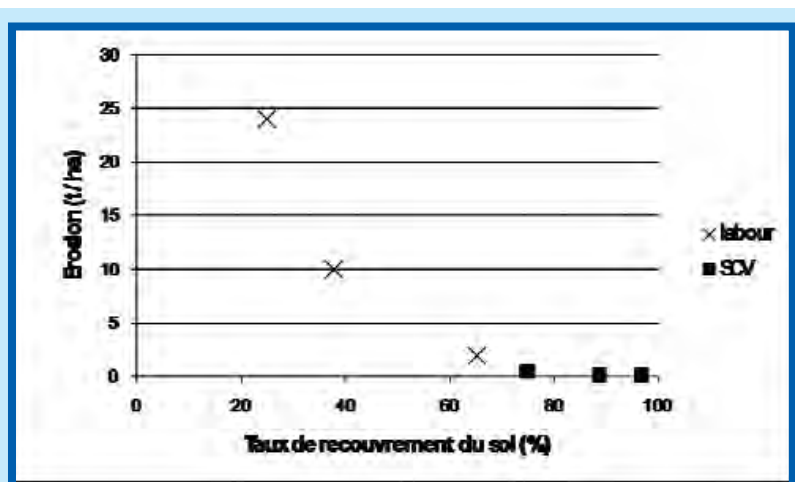


Figure 14

Relation entre taux de recouvrement du sol et pertes en terres par érosion (Antsirabe, Madagascar).



Figure 15

Exemple d'agroforesterie (Kenya) : jachère agroforestière intercalaire de *Tephrosia Candida* planté (18 mois) avant coupe et exportation du bois suivie d'une culture vivrière en semis direct bénéficiant des restitutions organiques de la jachère (cliché Albrecht).

Les pratiques SCV peuvent aussi être associées à d'autres alternatives agroécologiques comme l'agroforesterie dans le cadre de successions culture-jachère améliorée. C'est ce qui a été testé au Kenya (Données de Albrecht et Kanji, 2003) (Fig. 15). Dans ce contexte, l'érosion est fortement diminuée dès que la parcelle est dans sa phase jachère par suite de l'existence du couvert arboré, mais on n'observe pas un effet notable du non travail du sol dans les parcelles avec pratiques SCV.

Ces quelques résultats montrent l'efficacité généralement reconnue des pratiques SCV pour lutter contre l'érosion aratoire, puisque absence de pratiques de travail du sol, et pour lutter contre l'érosion hydrique, raison d'ailleurs première du développement de ces pratiques. Il faut toutefois être attentif, comme au Brésil, à ne pas négliger d'associer aux systèmes SCV les techniques de lutte traditionnelle (cultures en courbes de niveau, terrasses, etc.) dans le cas de certaines contraintes climatiques (semi-aride) et/ou topographiques (fortes pentes).

5. SERVICES EN TERME DE LUTTE CONTRE L'EFFET DE SERRE : SCV ET « SEQUESTRATION DU CARBONE »

La notion de « séquestration de carbone dans le sol » réfère à la fois à celle de stockage de C dans le sol provenant du CO₂ atmosphérique via la photosynthèse et les restitutions végétales au sol, mais aussi aux modifications des flux à l'interface sol-atmosphère des autres gaz à effet de serre (GES) comme le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O), ces flux étant exprimés en « équivalent C- CO₂ » selon un calcul prenant en compte le pouvoir de réchauffement de chacun de ces deux gaz par rapport à celui du CO₂ : environ 20 et 300 fois plus élevé pour CH₄ et N₂O respectivement. Le bilan de la « séquestration du C » est donc la somme arithmétique des bilans des 3 gaz CO₂, CH₄ et N₂O exprimés en équivalents (eq.) C- CO₂ (Bernoux et al., 2006). Il arrive que des systèmes SCV conduisent à un stockage significatif de C dans le sol, mais que parallèlement on observe des émissions accrues et notables de N₂O, qui, exprimées en eq. C- CO₂, peuvent parfois annuler l'effet positif du seul stockage de C dans le sol (Six et al., 2002).

Le bilan pluriannuel en C pour CO₂, lié à un changement de gestion des terres, est estimé par les différences en stocks de C du sol entre un temps zéro (date du changement) et un temps x (x, nombre d'années de l'alternative testée) (approche diachronique) ou entre une parcelle témoin et la situation alternative testée (approche synchronique). Il s'obtient à partir de prélèvements d'échantillons de sols et dosages des densités apparentes et teneurs en C des échantillons.

Le bilan pluriannuel en eq.C- CO₂ pour CH₄ et N₂O est estimé à partir de mesures ponctuelles et intra-annuelles au champ des flux de gaz à la surface du sol, et par différences entre la parcelle témoin et la situation alternative testée.

Les contraintes méthodologiques et conceptuelles liées à ces déterminations sont explicitées en détail par Bernoux et al. (2006) et ne sont pas rapportées ici.

Une fois le C séquestré dans le sol se pose le problème de la durabilité de cette séquestration. Celle-ci est dépendante, pour un système donné, en particulier de la forme et de la localisation du C stocké.

Enfin, un terme important du bilan, est celui lié à l'érosion du C. En effet les augmentations de C du sol apparemment observées pour l'alternative testée peuvent être dues : (i) à un stockage de C d'origine atmosphérique via les restitutions végétales, (ii) un apport de C par érosion de parcelles en amont, (iii) à une perte de C par érosion sur la parcelle témoin. Si le processus (i) correspond bien à la définition de la « séquestration de C », les processus (ii) et (iii) n'y correspondent pas puisque le C stocké ou perdu au niveau de la parcelle ne

provient pas de l'atmosphère mais est seulement redistribué au niveau du paysage². Il est donc important de pouvoir évaluer, a priori, la part du C sédimenté ou érodé dans le bilan C-sol établi.

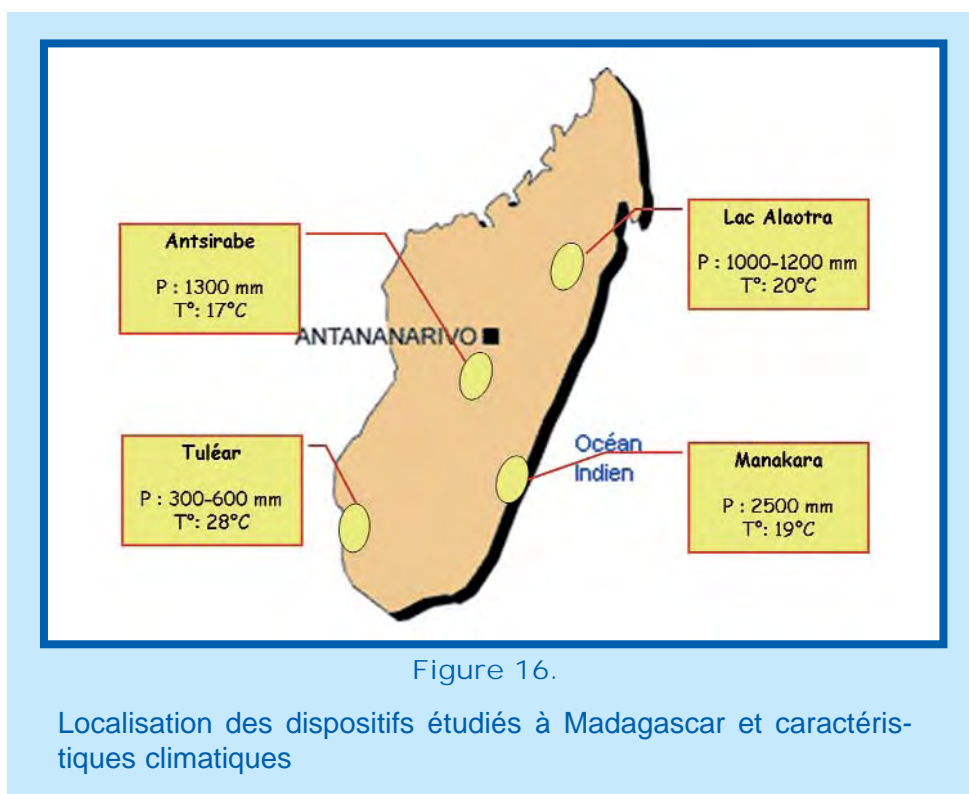
De ces réflexions, ressort la nécessité pour l'étude de la « séquestration du C » de prendre en compte les points suivants :

- variations des stocks de C du sol ou stockage du C (qui simule les flux de CO₂),
- variations des flux de CH₄ et N₂O exprimés en eq. C- CO₂,
- formes du C stocké et niveau de protection du C dans le sol,
- bilans de C érodé à différentes échelles : du m² au petit bassin-versant.

Ces différents aspects sont illustrés à partir de résultats obtenus dans le cadre du projet FFEM déjà mentionné pour des situations au Brésil, à Madagascar et au Laos.

5.1. SCV et stockage du C dans le sol

5.1.1. Madagascar



Plusieurs situations ont été étudiées qui sont présentées à la figure 16

Les principaux résultats pour les différences de stocks de C entre situations conventionnelles (LB) et systèmes SCV (SD) sont rapportés au tableau 4 (données non publiées de Razafimbelo et al.)

2. Toutefois ce C associé aux particules de sol, et mobilisé au niveau du paysage, peut-être considéré comme plus ou moins facilement minéralisable au cours du transport et du dépôt que lorsqu'il était en place, et dans cette perspective, peut participer malgré tout du bilan de « C séquestré ». Cette question est toutefois très difficile et débattue actuellement, et n'a pas été considérée ici.

Tableau 4

Taux de stockage annuel du C sous différents systèmes SCV en conditions pédoclimatiques variées par rapport aux systèmes avec labour (LB) correspondants. (Données Razafimbelo et al., non publiées)

Localité	Sol	Age	Systèmes	tC/ha/an
Manakara	H	8	SCV-LB, Riz-Stylosanthes F0	0,80
	H	8	SCV-LB, Riz-Stylosanthes Fm	1,82*
	Ft1	4	SCV-LB, Riz Stylosanthes F0	0,53
	Ft2	4	SCV-LB, Riz Stylosanthes Fm	0
Lac Alaotra	Fr	8	SCV-LB, Maïs+nibe/riz+leg Fu	0,14
	Fr	8	SCV-LB, Maïs+nibe/riz+leg Fm	0,22
	Fhy	8	SCV-LB, Riz+leg/maïs+leg Fu	0,29
	Fhy	8	SCV-LB, Riz+leg/maïs+leg Fu+Fm	0,44
	PE	8	SCV-LB, Riz+leg/maïs+leg Fu	0,73*
	PE	8	SCV-LB, Riz+leg/maïs+leg Fu+Fm	0,60
Antsirabe	Fhu	11	SCV-LB, maïs/soja	0,32
	Fhu	11	SCV-LB, maïs/maïs-desmodium	1,09*
	Fhu	11	SCV-LB, haricot/soja-kikuyu	0,49

H : sol hydromorphe à pseudo-gley ; Ft1 : sol ferrallitique argileux ; Ft2 : Sol ferrallitique très argileux ; Fr : Sol ferrallitique rajeuni ; Fhy : sol ferrallitique hydromorphe ; PE : sol peu évolué d'apport ; Fhu : Sol ferrallitique humifère.

SCV-LB : Différence de stocks entre un traitement conduit en semis direct (SCV) et le même traitement conduit en labour conventionnel (LB).

* Différence significative à 5%.

On note que les stockages de C sous SCV (couche 0-15 cm) sont positifs et varient de 0 à 1,8 tC/ha/an, mais les seules différences significatives sont celles concernant Manakara H8, Alaotra PE et Antsirabe Fhu 11 (maïs/maïs-desmodium). La valeur 0 correspond à un système de seulement 4 ans. La moyenne de ces valeurs est de 0,52 tC/ha/an.

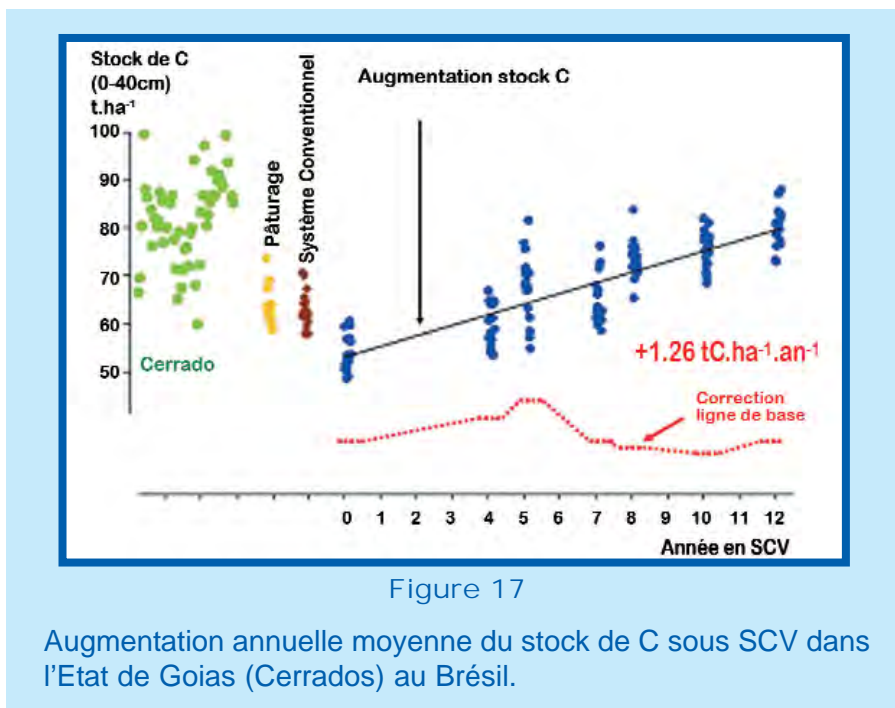
Différents niveaux de fertilisation (fumure minérale et/ou organique) ont aussi été testés dans certaines situations (résultats non montrés). Il y a généralement peu d'effet de la fertilisation sur le stockage du C au sein d'un même système.

5.1.2. Brésil

Diverses situations ont été aussi étudiées au Brésil. Nous ne présenterons ici que l'étude concernant une chronoséquence dans l'Etat de Goiás à Rio Verde.

La figure 17 (Données Bernoux non publiées, d'après Siqueira, 2006) montre l'accroissement significatif des stocks de C du sol (couche 0-40 cm) avec l'âge des systèmes SCV.

Le stockage moyen, après diverses corrections, est calculé comme étant égal à 1,26 tC/ha/an. Ce niveau de valeur est confirmé par simulation à partir d'un modèle de dynamique de C et N (Modèle G'DAY) testé par Corbeels et al. (2006) pour ces mêmes situations.



5.1.3. Laos

Un essai agronomique de 4 ans avec SCV a été suivi au Laos pour des sols sableux. Les résultats ne montrent (i) aucune différence significative entre Conventionnel (labour) et SCV, (ii) toutefois entre l'année 0 et 4 ans on note une légère diminution des stocks de C initiaux sous Conventionnel et un maintien sous SCV alors que les rendements ont été équivalents (mais faibles) dans les deux cas. Cette absence d'augmentation sous SCV s'explique à la fois par la faible durée du système (4 ans seulement) et par le faible niveau de restitution organique, voire peut-être un système pas encore bien adapté aux conditions du milieu.

5.2. Flux de N₂O (et CH₄)

5.2.1. Brésil

Les flux de N₂O (et CH₄) à la surface d'un sol ferrallitique argileux ont été suivis pendant 1 an sur différentes parcelles sous Conventionnel et SCV dans la zone des Cerrados (Goiania) au Brésil (Metay et al., 2007b).

Rappelons que N₂O dans les sols apparaît au cours de 2 processus fondamentaux : la dénitrification et la nitrification.

Les résultats pour N₂O sont présentés à la Figure 18 (d'après Metay et al., 2007b).

Le graphique montre que les flux de N₂O sont très variables au cours de l'année et non significativement différents entre Conventionnel et SCV, mais surtout qu'ils sont inférieurs à la valeur-seuil de 1g N- N₂O /ha/jour, considérée comme valeur négligeable dans les travaux de la littérature. Cette très faible émission de N₂O tient au fait que le sol étudié est très drainant (excellente microstructure), pratiquement jamais engorgé et donc dans des conditions non favorables aux émissions de N₂O.

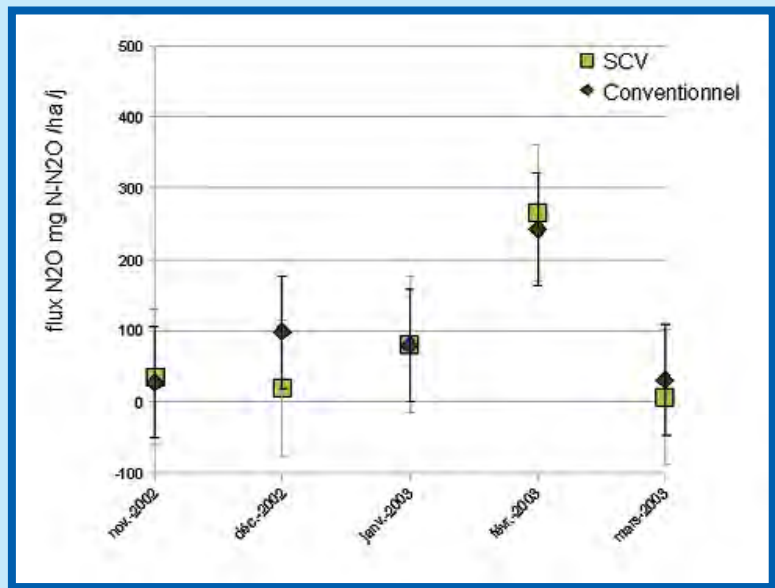


Figure 18

Emissions mesurées de N₂O (mg N-N₂O/ ha/ j) à la surface d'un sol ferrallitique argileux au Brésil (Goiania, État de Goias), n= 12 (d'après Metay et al., 2007 b)

Or, il a bien été montré en laboratoire, en imposant les conditions favorables aux émissions de N₂O (humidité du sol à 80 % de la capacité de rétention, fortes teneurs en nitrates), qu'il existe un potentiel non négligeable d'émissions de N₂O pour ces sols d'environ 1000 fois supérieur à celui mesuré in situ (Tableau 5, d'après Metay et al., 2007b). Ces valeurs de l'ordre du kgN/ha/jour concernent le potentiel de dénitrification, alors que l'ordre de grandeur reste du même ordre (du gramme) que celui in situ pour le processus de nitrification, qui est donc probablement le processus opérant in situ dans le sol étudié.

Tableau 5.

Potentiel d'émissions de N₂O par dénitrification (kg N/ha/jour) ou par nitrification (g N/ha/jour) d'un sol ferrallitique argileux au Brésil (Goiania, Etat de Goias). (Données Metay et al., 2007b).

Traitement	Dénitrification potentielle kg N-N ₂ O ha ⁻¹ jour ⁻¹	Nitrification potentielle g N ha ⁻¹ jour ⁻¹
SCV	1,072 (0,0004)	1,515 (0,970)
Conventionnel	0,987 (0,0349)	0,648 (0,405)

Les flux obtenus pour CH₄, tant pour Conventionnel que pour SCV, sont aussi très faibles, de l'ordre de l'erreur de mesure et donc considérés comme négligeables pour la situation étudiée. Ils ne sont pas présentés ici.

5.2.2. Madagascar

Les flux de N₂O à la surface d'un sol ferrallitique humifère argileux des Hautes Terres de Madagascar (Antsirabé) ont été suivis pendant la saison des pluies (4 mois) sur différentes parcelles sous Conventionnel et SCV. L'étude est encore en cours.

Les résultats, tant pour les mesures au champ in situ que au laboratoire pour l'étude des potentiels, sont du même ordre de grandeur et vont dans le même sens que ceux du Brésil, le sol étudié étant aussi un sol très structuré et filtrant, ce qui peut expliquer ces résultats similaires.

5.3. Formes du C stocké dans le sol (Brésil, Madagascar)

Le C stocké dans le sol l'est sous la forme de matières organiques (MO) dont la nature, l'origine et le turn-over peuvent être très différents.

Il est clair que le stockage de la MO dans des compartiments à turn-over lent est un avantage en terme de séquestration de C.

On distingue souvent (Figure 19, d'après Feller et Beare, 1997) :

- les MO de la taille des sables (20-2000 ou 50-2000 µm) : dominance de résidus végétaux à divers degrés de décomposition,
- les MO de la taille des limons (2-20 ou 2-50 µm) : mélange formé de débris végétaux et fongiques très humifiés et d'un complexe organo-limono-argileux (MO amorphes),
- les MO de la taille des argiles (0-2 µm) : dominance de MO amorphes fortement associées aux constituants minéraux argileux. mélange formé de débris végétaux et fongiques très humifiés et d'un complexe organo-limono-argileux (MO amorphes).

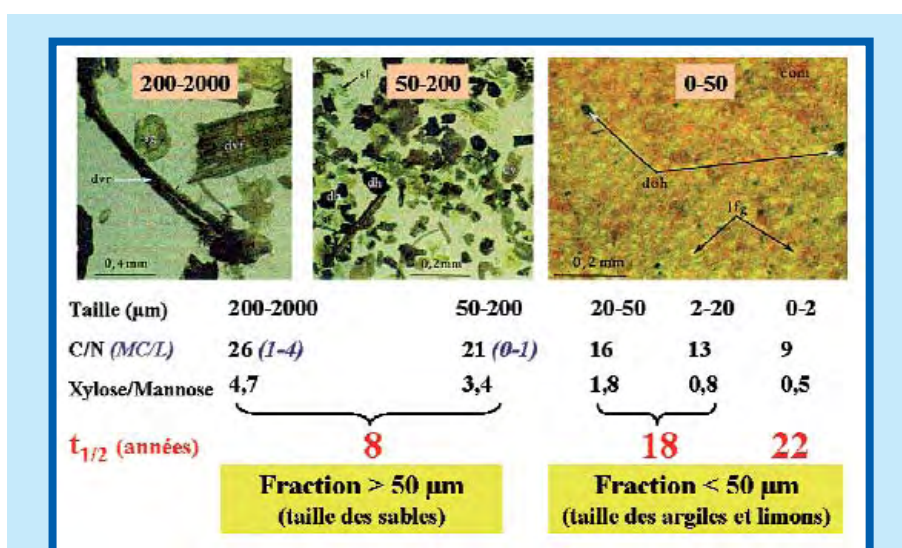


Figure 19

Caractéristiques des différentes formes de MO du sol (cas d'un sol sableux du Sénégal). (Clichés Feller, d'après Feller, 1995)

La Figure 19 indique que les MO les plus stables sont celles associées aux fractions argileuses et limoneuses avec une durée de demi-vie d'environ 20 ans par rapport à la fraction « débris végétaux » de demi-vie de 8 ans seulement.

Cette approche a été appliquée aux 2 situations du Brésil (Etat de Goias, Metay et al., 2007a) et de Madagascar (Hautes Terres, Grandière et al., 2007) et sont présentées aux figures 20a et 20b respectivement.

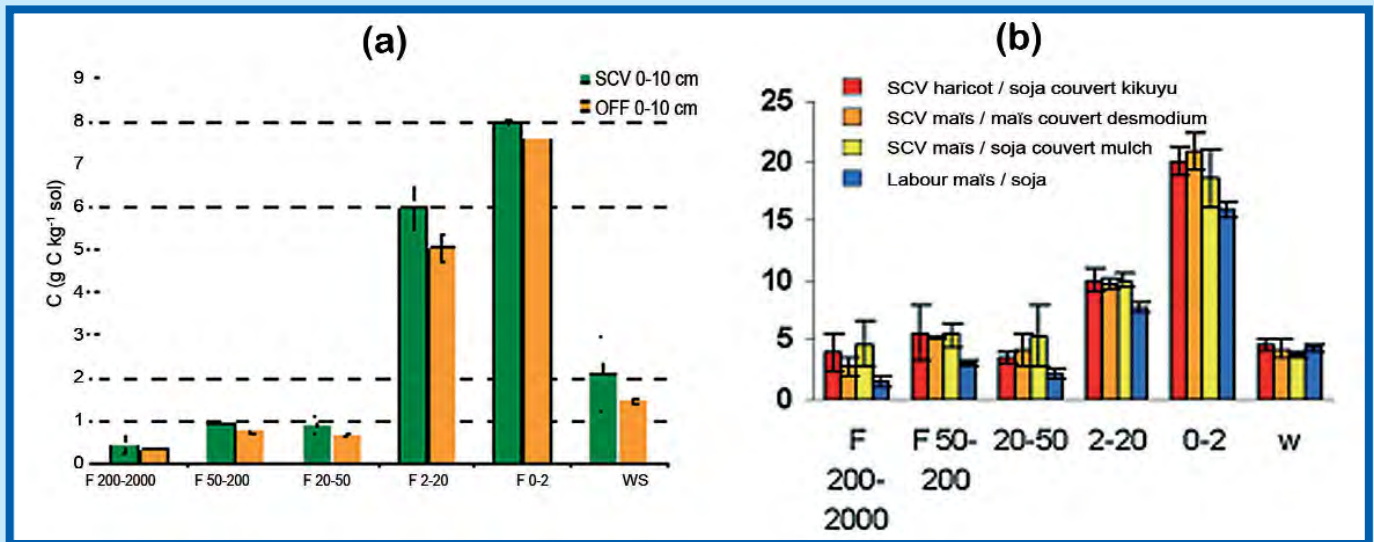


Figure 20

Contenus en C (g C kg⁻¹ sol) des fractions 200-2000, 50-200, 20-50, 2-20, 0-2 μm et WS (water soluble) obtenues pour les 2 traitements SCV et OFF (sol 0-10 cm) : (a) Brésil, (b) Madagascar. (Données Metay et al. 2007a et Grandière et al. 2007)

On constate, dans les deux cas, que l'essentiel du C est localisé dans les fractions inférieures à 20 μm, et que l'augmentation des stocks de C par le traitement SCV se retrouve aussi dans ces fractions pour la couche 0-10 cm. Le C supplémentaire ainsi stocké par le système SCV devrait donc avoir une certaine durabilité.

5.4. Le C érodé

Comme expliqué en introduction de cette section, il est important, pour mieux cerner le bilan de « C séquestré », de connaître la part du C érodé dans ce bilan, ceci tant au niveau de la parcelle qu'à des échelles plus petites comme le petit bassin-versant.

A l'échelle de la parcelle, on note généralement des stocks de C plus importants sous SCV que sous Conventionnel (avec labour). Toutefois la différence ne correspond pas nécessairement uniquement à une accumulation de C sous SCV provenant du CO₂ atmosphérique, mais peut-être simplement du à une perte par érosion du C sur le traitement Conventionnel, ce qui

est tout à fait envisageable et probablement courant. Un colloque international a eu lieu sur le sujet récemment (Roose et al., 2006a) qui a conclu (Roose et al., 2006b) que les pertes en C érodé sur traitements de type Conventionnel pouvaient varier de 50 à facilement 500 kgC/ha/an, cette dernière valeur étant du même ordre que les potentialités de séquestration de C avec les pratiques SCV et, dans certains cas de l'ordre de grandeur des valeurs fournies au cours de ce programme. Il se pourrait donc, sans évaluation de ce processus, que les valeurs de C « séquestré » dans le sol (provenant de CO₂ atm.) soient souvent surestimées. Sur la situation étudiée du Laos, l'érosion du C a été estimée entre 500 et 1000 kgC/ha/an selon le mode de gestion des terres.

Si ce C érodé est seulement redistribué au niveau du bassin-versant, il n'a donc pas à être comptabilisé dans le bilan de séquestration à cette échelle, à moins qu'il ne soit démontré que sa minéralisation est accrue au cours du transport ou dans la nouvelle situation de dépôt. Il n'y a pratiquement pas de données à ce sujet dans la littérature, les valeurs des variations de la minéralisation du C, rarement estimées dans de telles conditions, s'échelonnent entre 0 et 100 % ! Pour la situation du Laos étudiée ici, il a été démontré que le C érodé au niveau parcelle était, pour les petits bassins versants de 0,6 ha, seulement redistribué au niveau du petit bassin versant. Toutefois pour les bassins-versants de plus grande surface (jusqu'à 60 ha), la fraction la plus fine de la terre érodée des horizons de surface (argile et limon) peut être retrouvée à l'exutoire et donc participer à la sédimentation au niveau des paysages. Il a bien été montré à l'aide du Césium 137 que cette fraction était dominée par du « C récent » (postérieur à 1963).

Les systèmes SCV ont été d'abord développés pour lutter contre l'érosion des sols, mais ils s'avèrent être des systèmes favorables au stockage du C dans le sol avec des valeurs annuelles pouvant varier de 0 à 1,6 tC/ha/an pour les situations présentées, les valeurs élevées correspondant aux systèmes à forts niveaux de restitution végétale. Toutefois ces seuls résultats sont insuffisants pour conclure automatiquement à un effet positif dans la lutte contre l'effet de serre car il faut s'assurer que ces systèmes ne favorisent pas par ailleurs des émissions significatives de gaz à effet de serre comme CH₄ et N₂O. Pour les 2 situations de sols argileux et bien structurés analysées ici au Brésil et à Madagascar, les émissions sous SCV de ces deux gaz sont pratiquement négligeables, mais ce ne sont que 2 types de sols tropicaux parmi tant d'autres. Il y a donc nécessité d'élargir les études à bien d'autres types de sols.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES : LE SOL COMME UN « CAPITAL »

Les systèmes SCV sont, et doivent être, très divers pour être adaptés aux conditions bioclimatiques très variables des pays du Sud. Quand il est techniquement adapté (productif, maîtrisable et appropriable par l'exploitant), il remplit généralement toute une série de services écosystémiques dont la plupart sont dépendants des changements de propriétés des sols. C'est ce que nous avons illustré ci-dessus avec des effets souvent positifs de ces systèmes :

- En tout premier lieu, il est bien confirmé que c'est un moyen de lutte extrêmement efficace contre l'érosion. Toutes les situations le montrent, que ce soit au Brésil, au Bénin, à Madagascar ou au Laos.
- En relation avec la productivité végétale, dans d'assez nombreux cas, en particulier lorsqu'il s'agit de restaurer des terres dégradées, les effets des systèmes de type SCV peuvent être spectaculaires. C'est le cas, au Bénin, de l'association du maïs avec *Mucuna* en culture relais pour laquelle les rendements sous SCV ont régulièrement augmenté pendant douze ans, passant d'environ 500 kg/ha en début d'expérience à 3 t/ha après 12 ans, le *Mucuna* permettant une restitution de 10 tC/ha/an et une variation de stock de carbone du sol de 1,3 t C/ha/an.
- Pour les déterminants de la fertilité chimique du sol, il faut insister sur le fait que si les SCV peuvent conduire à une augmentation importante du stock d'azote organique total du sol (80 à 95 kg N/ha/an), cet azote nouvellement stocké n'est toutefois que partiellement minéralisable (+ 2 kg/ha/an en SCV) et ne peut fournir tout l'azote nécessaire à la plante au cours de sa période de croissance. De plus, sous climat tropical humide, même en SCV, une partie significative de cet azote minéral est perdue par lixiviation. Il faut donc la plupart du temps continuer à envisager une fertilisation minérale ou organique (fumier, légumineuses) pour compenser ces pertes.
- La mise en place de systèmes SCV derrière des systèmes conventionnels s'accompagne d'une quasi-explosion des activités biologiques dans les sols, et ce souvent dès la première ou la deuxième année suivant l'installation. Ce résultat est généralement observé pour tous les systèmes à mulch en milieu tropical. Concernant la faune du sol, les conséquences peuvent en être positives avec les animaux qui ont un rôle d'« ingénieur du sol » (comme les vers de terre, fourmis, termites), en particulier, sur ce qui concerne les

propriétés physiques (agrégation, porosité). Mais elles peuvent être aussi négatives avec le développement de pathogènes des cultures comme les vers blancs en systèmes rizicoles à Madagascar.

- Enfin, l'ensemble des résultats obtenus tant au Brésil qu'à Madagascar et au Laos montrent une forte tendance générale à une augmentation des stocks de carbone sous SCV, donc à une séquestration du CO₂ atmosphérique, avec des valeurs variant de 0 à 1,5 tC/ha/an stocké dans le sol selon les systèmes étudiés. Ces valeurs sont d'autant plus fortes que les quantités de matière végétale restituées au sol sont importantes, ce qui explique les fortes valeurs observées dans certains cas par rapport aux résultats souvent plus faibles citées dans la littérature internationale. Toutefois ces niveaux de stockage de C provenant (via la plante) du CO₂ atmosphérique doit être mis en regard avec les bilans des deux autres gaz à effet de serre (GES) les plus importants : le méthane CH₄ et le l'oxyde nitreux N₂O. Il faut en effet s'assurer que les systèmes SCV ne conduisent pas à des émissions accrues des ces deux gaz. Les deux situations testées à ce sujet à Madagascar et au Brésil (pour des sols argileux bien agrégés) montrent que ce risque n'existe pas. Toutefois, de nombreux autres types de sols tropicaux restent à étudier pour généraliser ou non de telles observations, car l'on sait que ce risque est réel dans une certain nombre de situations sous climat tempéré (Six et al., 2002).

La plupart des situations étudiées dans ces dispositifs étaient soit des situations contrôlées en station, soient des situations chez des producteurs extrêmement intensifs avec forte production et donc restitution de biomasses. Elles illustrent donc un potentiel des services écosystémiques que les SCV peuvent remplir. On est en droit de se demander toutefois dans quelles mesures ces résultats sont extrapolables à d'autre situations tropicales non étudiées, ou dans un contexte de plus faible production de biomasse qui est celui généralement des petits producteurs des pays en voie de développement. Pour cela, des travaux de modélisation pourront contribuer à mieux cerner les impacts quantitatifs de ces SCV en fonctions de leurs conditions d'application.

De même, la plus grande partie des résultats présentés ici ont été obtenus aux échelles de la parcelle (Brésil, Madagascar). Une petite partie (bilans pertes en terre et en carbone érodé) a été étudiée au niveau du bassin-versant. Il y aurait lieu aussi de s'interroger sur le mode de gestion et de localisation dans le paysage des SCV ou d'autres systèmes agro-écologiques afin qu'ils fournissent le plus efficacement leurs services écosystémiques de lutte contre le ruissellement et l'érosion et de restauration des terres dégradées. Cette réflexion est en cours pour les systèmes rizicoles à Madagascar (Mietton, 2006 ; Seguy comm. orales, 2007, 2008).

Le sol est donc un compartiment très important de l'écosystème et il est essentiel, au niveau des économies nationales de lui attribuer une valeur économique comptable, de le considérer comme un « capital naturel ». Ceci implique d'établir la perte de capital lors de la dégradation des sols ou au contraire le gain de capital lors de leur restauration en prenant en compte, à côté des seules pertes ou gains liées aux variations de productivité végétale ou animale, les coûts ou gains gagnés ou perdus par les autres services écosystémiques alors rendus ou non par le sol. L'exercice est important à faire dans l'avenir concernant les systèmes SCV.

REFERENCES

- Albrecht A., Kandji T.S. 2003 Agroforestry practices and carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 99 :, 15-27.
- Barthès B., Azontonde A., Blanchart E., Girardin C., Villenave C., Lesaint S., Oliver R., Mariotti A., Feller C., 2004. Effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on soil carbon in an Ultisol under maize cultivation in southern Benin. *Soil Use and Management*, 20 : 231-239.
- Bernoux M., Feller C., Cerri C.C., Eschenbrenner V., Cerri C.E.P., 2006. Soil carbon sequestration. In Roose E., Lal R., Feller C., Barthes A.B. Stewart R. (eds.) "Soil erosion and carbon dynamics" pp. 13-22. *Advances in Soil Science*, vol.15, CRC Press, 352p.
- Blanchart E., Bernoux M., Sarda X., Siqueira Neto M., Cerri C.C., Piccolo M., Douzet J.M., Scopel E., Feller C., 2007. Effect of direct seeding mulch-based systems on soil carbon storage and macrofauna in Central Brazil. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 72 (1): 81-87.
- Corbeels M., Scopel E., Cardoso A., Bernoux M., Douzet J.M., Siqueira Neto M. 2006. Soil carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil. *Global Change Biology*. 12, 1773-1787. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01233.x
- Feller C., 1995. La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1:1. Recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. Coll. TDM, n° 144, ORSTOM, 393 p. + Annexes, 236 p., Paris.
- Feller C. Beare M.H., 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79: 69-116.
- Grandière I., Razafimbelo T., Barthès B., Blanchart E., Louri J., Ferrer H., Chenu C., Wolf N., Albrecht A., Feller C., 2007. Distribution granulo-densimétrique de la matière organique dans un sol argileux sous semis direct avec couverture végétale des Hautes Terres malgaches. *Étude et Gestion des Sols* 14 (2): 117-133.
- Maltas A., Corbeels M., Scopel E., Oliver R., Douzet J.M., da Silva F.A.M., Wery J., 2007. Long-term effects of continuous direct seeding mulch-based cropping systems on soil nitrogen supply in the Cerrado region of Brazil. *Plant and Soil* 298: 161-173.
- Metay A., Moreira J.A.A., Bernoux M., Boyer T., Douzet J.M., Feigl B., Feller C., Maraux F., Oliver R., Scopel E., 2007a. Storage and forms of organic carbon in a no-tillage under cover crop system on clayey Oxisol in dryland rice production (Cerrados, Brazil). *Soil & Tillage Research* 94: 122-132.
- Metay A., Oliver R., Douzet J.M., Scopel E., Moreira J.A.A., Maraux F., Feigl B., Feller C., 2007b. N₂O and CH₄ emissions from soils under conventional and direct seeding cropping systems in Goïania. (Cerrados, Brazil). *Geoderma*, 141, 78–88.
- Mietton M. 2006. Rapport de fin de mission à Ambatondrazaka (Madagascar) auprès du Projet BVLac – CIRAD – AFD. Rapp. Mult., 10-20 juillet 2006. Avec la collaboration de J. Erismann, 21 p.
- Rabary, B., Sall, S., Letourmy, P., Husson, O., Ralambofetra, E., Moussa, N., Chotte, J-L., 2008. Effects of living mulches or residue amendments on soil microbial properties in direct seeded cropping systems of Madagascar. *Appl. Soil Ecol.* 39, 236-243.

Razafimbelo T., Albrecht A., Basile I., Borschneck D., Bourgeon G., Feller C., Ferrer H., Michellon R., Moussa N., Muller B., Oliver R., Razanamparany C., Seguy L., 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 (2) : 113-127.

Roose E., Lal R., Feller C., Barthes A.B., Stewart R. (eds.), 2006a. Soil erosion and carbon dynamics. *Advances in Soil Science*, vol. 15, CRC Press, Boca Raton, FL, 352p.

Roose E., Meybeck M., Lal R., Feller C., 2006b. Erosion and carbon dynamics: conclusions and perspectives. In Roose E., Lal R., Feller C., Barthes A.B. Stewart R. (eds.) "Soil erosion and carbon dynamics" pp.331-337. *Advances in Soil Science*, vol.15, CRC Press, 352p.

Scopel E., Douzet J.M., Cardoso A., Macena F.A., Alves Moreira J.A., Findeling A., Bernoux M. 2005. Impacts des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale (SCV) sur la dynamique de l'eau, de l'azote minéral et du carbone du sol dans les Cerrados brésiliens. *Cahiers d'études et de recherche francophones/Agricultures*, 14 (1): 71-76.

Séguy L., Bouzinac S., Maronezzi A.C., 2001. Systèmes de culture et dynamique de la matière organique. Un dossier du semis direct. CIRAD-CA/Agronorte pesquisas/Groupe Maeda/ONG Tafa/FOFIFA/ANAE, 320 p.. Disponible sur <http://www.agroecologie.cirad.fr>

Siqueira Neto M. 2006. Estoque de carbono e nitrogênio do solo com diferentes usos no Cerrado em Rio Verde (GO). Thèse Université de São Paulo, CENA, Piracicaba, Brésil,

Six J., Feller C., Denef K., Ogle S.M., Sa J.C.M., Albrecht A., 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. *Agronomie* 22, 755-775.



*Les participants au Séminaire International « Les sols tropicaux en semis direct sous couvertures végétales (Madagascar, 3-8 décembre 2007) »
Cliché : Samran Sombatpanit*

Une grande partie des résultats scientifiques publiés dans ce document, ainsi que toute l'organisation du Séminaire International où ces résultats ont été montrés
« Les sols tropicaux en semis direct sous couverture végétale
(Madagascar, 3-8 décembre 2007) »
ont été financées avec le soutien de :

