

P.Autfray Cirad UR SCV Couvert Permanents Novembre 2008

Rapport de Formation UEPG /Cirad Novembre 2006 Ponta-Grossa Brésil (PTA 1 Financement MAE)

« Soil Organic Matter Management : The Relationship with Cropping Systems and Cover crops »

" Il faut changer de système de pensée pour changer le système "
<http://www.agriculture-de-conservation.com/>

1. L'UEPG, le laboratoire DE J.C.M. SA et l'historique de la collaboration UEPG / L.Séguy ..	2
2. Situation actuelle des SCV	3
2.1. Un petit bilan dans le monde ; du concept SCV ou « no-tillage » aux pratiques	3
2.2. La situation des projets SCV dans les différents pays d'intervention de l'UR	4
3. La diversité des écosystèmes ET DES SCV cultivés au Brésil	4
3.1. Grands types de sol et climats	4
3.2. Les SCV chez les pionniers du semis-direct en culture motorisée	5
3.3. Les SCV dans les systèmes d'exploitation familiale en culture attelée	6
4. LE matériel de semis	8
5. La création des SCV au Brésil sur les fronts pionniers	10
5.1. Les principes.....	10
5.2. La spécificité des plantes de couverture.....	11
5.3. Evolution de la démarche de création des SCV en zone tropicale brésilienne	13
5.4. Analyses des performances agroéconomiques	14
6. Qualité des matières organiques du sol (MOS)	14
6.1. Les différents compartiments des MOS	14
6.2. Effets des systèmes de culture sur les MOS	16
7. Relation entre agrégation et MOS	17
7.1. Les différents types d'agrégats	17
7.2. Séparation et test de stabilité sur les agrégats.....	17
7.3. L'importance des systèmes racinaires sur la macroagrégation	17
8. Relation entre CEC et MOS.....	18
9. Relation entre rétention en eau et MOS ; Physique des SOLS SOUS SCV	18
10. Etudes sur les stocks.....	19
10.1. Etudes sur 0-5 et 0-20 cm	19
10.2. Modélisation d'évolution des stocks à partir du modèle Hénin-Dupuis	19
10.3. Intérêt du modèle Hénin-Dupuis sur l'évolution à long terme des SCV.....	20
10.4. Etudes d'évolution des stocks sous cultures	22
10.5. Restauration des sols dégradés.....	22
11. Etudes sur les litières de surface	23
11.1. Etude de la décomposition de la couverture du sol	23
11.2. Qualité des litières et impacts	24
12. Microorganismes du sol et biomasse microbienne.....	25
13. Utilisation des radio-isotopes	26
13.1. Cas du ¹³ C	26
13.2. Cas du ¹⁵ N	26
14. Conclusion et perspectives de collaboration	27
14.1. La gestion des MOS et le fonctionnement biologique du sol	27
14.2. Certains à priori revus	27
14.3. Echanges entre pays	28
14.4. Le devenir de la formation.....	29
15. Bibliographie.....	29

1. L'UEPG, LE LABORATOIRE DE J.C.M. SA ET L'HISTORIQUE DE LA COLLABORATION UEPG / L.SEGUY

14 participants ont participé à cette première formation étalée sur 3 semaines (128 heures) au sein de l'UEPG et financée par le MAE dans le cadre du PTA 1^{ière} phase. L'UEPG (*Universidade Estadual de Ponta Grossa*) est située dans l'Etat du Parana (sud Brésil, 12° sud latitude, 900 à 1000 m d'altitude, 1500 mm pluies / an). Cette région est le berceau du semis - direct au Brésil.

La formation a été le fruit d'une collaboration ancienne de J.C.M. Sa (enseignant chercheur du Département des Sciences du Sol et de l'Ingénierie Agricole) et de L. Séguy (agronome animateur de l'UR SCV).

J.C.M. Sa (ou *Juca*) est responsable d'un Laboratoire d'analyse de sol où sont actuellement analysés des échantillons provenant de terrains divers où intervient l'UR SCV (Madagascar, Cameroun, bientôt Laos). Cette équipe de recherche est également reliée à celle de C.Cerri (Responsable du CENA de Sao Paolo), réputée pour ces travaux sur les radio-isotopes du carbone. *Juca* est un auteur actuellement connu internationalement par ces nombreux articles sur l'évolution de la fertilité des sols sous SCV (voir bibliographie). Il a participé en juin dernier à l'évaluation de l'UR SCV au Laos.

13 des 14 participants sont sur des terrains SCV au sein d'institutions nationales :

- 4 participants pour le Laos (PRONAE) ;
- 1 pour le Vietnam (NAFRI);
- 2 pour Madagascar (ANAE, GSDM) ;
- 3 pour le Cameroun (SODECOTON);
- 3 pour le Mali (IER).

Un chercheur argentin a également suivi la formation (Institut National de Techniques Agricoles). Il travaille actuellement sur l'agrégation des sols et le fractionnement des MOS.



Photo 1. Lancement de la formation à l'UEPG : les participants.

Le programme de la formation a été équilibré fort judicieusement en cours théoriques, visites de champs et travaux au laboratoire. La période coïncidait avec la phase d'implantation des cultures ce qui a permis de voir les modalités d'implantation des SCV dans différents types de couverts (phase cruciale pour la qualité des SCV).

Les principaux intervenants et leurs principaux thèmes d'intervention ont été les suivants :

- Sa Joao Carlos de Moraes : UEPG Responsable et Coordinateur de la formation; chercheur/enseignant ; matières organiques du sol et SCV (10 jours)
- Séguy Lucien : CIRAD Co-Responsable de la formation ; création de systèmes (3 jours).
- Neyde Fabiola Giardola : UEPG chercheur/enseignant ; physique des sols et alimentation hydrique sous SCV (1 jour) ;
- Altair Justino : IAPAR chercheur/enseignant ; physique des sols ; mécanisation (1 jour) ;
- Nono Pereira : agriculteur ; consultant privé (1/2 journée) ;
- Luiz Claudio Garcia : ingénieur, Société SOCIDISCO (1/2 journée) ;
- Fatima Ribeiro : chercheur ; SCV et exploitations familiales (1/2 journée).

L'accueil a été excellent et l'organisation de la formation parfaite. Le recteur de l'Université, présent à la remise des certificats de suivi de la formation, a insisté sur l'intérêt qu'il porte à ce type de formation internationale et de collaboration future entre équipes de recherche de terrain.

A l'unanimité, les 14 participants ont apprécié l'intérêt de mêler « science et pratique » dans le cadre de cette formation avec toujours un soucis d'associer les considérations agronomiques, économiques et environnementales.

Il convient de préciser que le terme *no-tillage* utilisé au Brésil signifie SCV, c'est-à-dire avec une couverture du sol importante au moment de l'implantation, dans tous les cas de figure supérieure à 50 %.

Le fait que cette formation soit de longue durée a permis des échanges entre les différents projets SCV.

2. SITUATION ACTUELLE DES SCV

2.1. Un petit bilan dans le monde ; du concept SCV ou « no-tillage » aux pratiques

Les premiers systèmes à travail simplifié du sol sont apparus en mécanisé aux USA dans les années 1960 pour faire face à des contraintes d'érosion éolienne. Actuellement les systèmes pratiqués par les agriculteurs ne sont pas *sens-stricto* des SCV puisque souvent au cours des successions culturales des travaux du sol sont effectués. Les systèmes pratiqués s'apparentent plus aux TCS (Techniques Culturelles Simplifiées) comme ceux pratiqués en Europe à une échelle beaucoup plus petite.

Le terme d'agriculture de conservation (*Conservation Agriculture*) était au départ associé aux principes des SCV, à savoir :

- couverture permanente du sol ;
- travail du sol limité au lit de semences ;
- rotation de culture.

Il a été ensuite étendu à un grand nombre de pratiques, semis-direct (parfois sans aucune couverture qui est une pratique très fréquente d'implantation des céréales, notamment en Afrique), travail superficiel du sol, systèmes agroforestiers, ce qui occasionne dans les évaluations des superficies dans le monde sous le terme d'agriculture de conservation un grand nombre de systèmes fort différencié.

Il est clair que les SCV *sensus-stricto* sont véritablement appliqués sur de grandes superficies et en forte proportion des terres totales cultivées dans 3 pays, le Brésil, l'Argentine et l'Uruguay. Le Brésil présente l'avantage d'avoir une grande diversité de climat et d'avoir un secteur industriel qui s'est adapté à ces techniques, même pour des petits agriculteurs en culture attelée. Ainsi ce pays est devenu une référence sur ces systèmes. On estime actuellement plus de 17 millions d'hectares en SCV au Brésil en 2003 dont 0.17 million d'ha chez de petits exploitants (38.000).

Actuellement on estime que 95 millions ha sont réalisés en SD, dont 84% en Amériques du nord et du sud et 13% en Australie. Les superficies cultivées en SD par rapport en systèmes conventionnels sont de 55% au Brésil, 46% en Argentine, 60% au Paraguay, 15% aux USA.

2.2. La situation des projets SCV dans les différents pays d'intervention de l'UR

L'état actuel des Projets SCV représentés à la formation est synthétisé dans le tableau suivant.

Tableau 1. Quelques données sur les projets SCV représentés.

Pays	Premières parcelles SCV	Origine des SCV	Nombre agriculteurs actuels concernés (2006)	Nombre d'hectares (2006)	Force de travail dominante	Systèmes dominants
Brésil	1972 en motorisé	Agriculteurs	+ 200.000	+ 17 millions	Motorisée	Cultures annuelles commerciales : soja, maïs, riz, coton,.... Elevage
	1990 en attelée	Recherche	20.000	180.000	Attelée	
Madagascar	1995	Recherche	2000	200	Manuelle	Cultures annuelles vivrières et commerciales : riz, maïs, légumineuses
Laos	2000	Recherche	200	100	Manuelle et motorisée	Cultures annuelles vivrières et commerciales : riz, maïs.
Cameroun	2001	Développement	200	100	Manuelle	Coton/céréales/élevage
Mali	2005	Recherche	40	20	Attelée	Coton/céréales/élevage

3. LA DIVERSITE DES ECOSYSTEMES ET DES SCV CULTIVES AU BRESIL

3.1. Grands types de sol et climats

Le Brésil comporte tous les grands types de sol et de climat du monde tropical et subtropical. La classification la plus courante est celle reliée au type de régime pluviométrique (tableau suivant).

Tableau 2. Classification des sols selon le régime pluviométrique.

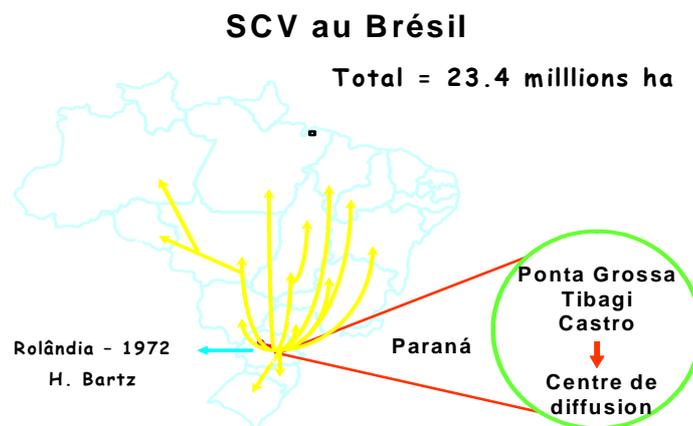
Classification des sols utilisée au Brésil	Humidité du sol
<i>Higher udic moisture regime</i>	Sols toujours humides
<i>Udic moisture regime</i>	Sécheresse au maximum sur 1 mois
<i>Ustic moisture regime</i>	Sécheresse 1 mois à 4 mois
<i>Aridic moisture regime</i>	Sécheresse > 6 mois

Au niveau de l'état du Parana, la roche dominante est de nature gréseuse et la principale différenciation se fait en fonction de la toposéquence avec du sommet vers le bas, des lithosols (peu épais à forte contrainte hydrique, suivi des Entisols, Cambisols, plus épais, puis des Podzols (très forte teneur en aluminium libre). Tous les sols se caractérisent par une forte acidité nécessitant un redressement à la chaux. Les meilleurs sols de cette région se sont développés à partir d'intrusions de dolérites donnant des sols chimiquement plus riches.

3.2. Les SCV chez les pionniers du semis-direct en culture motorisée

Les SCV ont commencé par des motorisés qui dans les années 70 rencontraient d'énormes difficultés de mise en valeur de leurs nouvelles terres sur des pentes fortes en relation avec une grande sensibilité des sols à l'érosion hydrique (forte agressivité des pluies au moment des semis).

Cela a commencé en 1972 dans le nord du Parana à Rolândia; puis dans la région de Ponta-Grossa en 1976 chez Nono Pereira, grâce à l'importation de semoir spécifique du Texas. Les 20 premières années l'extension du semis-direct a été très faible et de la seule volonté des agriculteurs, réunis en départ en groupement pour faciliter la reproduction de matériel spécifique. La propagation a été très rapide à partir des années 90, notamment grâce à la baisse continue du *glyphosate* (en 1970, 25 USD ; actuellement 3.4 USD), à l'efficacité de fabricants de matériel de semis en culture motorisée et l'accompagnement d'une recherche de terrain.



Carte 1. Diffusion des SCV au Brésil à partir du Parana.

L'exploitation de Nono Perreira a été visitée ainsi que son musée concentrant notamment une grande diversité de semoir. Il a été obligé de changer de pratiques (travail du sol avec

constitution de banquettes), en raison de l'importance des phénomènes érosifs au niveau de son domaine agricole et du coût élevé du système de protection de ces parcelles.

Sa fazenda de 1.625 ha est implantée sur des sols pauvres, peu épais, sableux et très acides, avec des pH < 5.

Le passage des systèmes conventionnels aux SCV a été difficile au départ notamment en raison de la maîtrise de l'enherbement.

L'intérêt de passer aux SCV a été d'améliorer à court terme le bilan hydrique sous culture sur ces sols à faible réserve utile, soumis en période d'été à une forte probabilité de périodes sans précipitations. Cela a également permis d'augmenter le nombre de culture possible.

Actuellement consultant il est très engagé dans la diffusion de ces systèmes en Amérique Latine au sein de la CAAPAS (Confederación Americana para la Agricultura Sustentable ; www.caapas.org/). Constamment il reçoit au niveau de sa ferme des agriculteurs venus du monde entier venir s'inspirer de ces techniques (des danois nous succéderont).

Les trois principales raisons qui ont poussé tous ces agriculteurs pionniers à faire du « no-tillage » sont :

- la maîtrise de l'érosion ;
- l'augmentation des marges nettes ;
- la réduction du travail et donc l'augmentation des superficies cultivées.

Une visite de parcelle conduite depuis plus de 20 ans en SCV a créé un émerveillement par l'odeur de champignons qu'elle exhalait. On notera que sur cette véritable « moquette végétale » les semis de soja encours étaient effectués à grande vitesse, ce qui laissait après passage, une partie non négligeable de sol à nu (voir photographie).



Photo 2. Exploitation motorisée : semis-direct de soja sous moquette végétale à base de résidus d'avoine.

3.3. Les SCV dans les systèmes d'exploitation familiale en culture attelée

Ils se concentrent autour des villes d'Irati, d'Imbituva et de Prudentópolis avec une population d'origine essentiellement polonaise et ukrainienne qui a importé avec elle lors de son émigration un matériel de travail du sol en traction animale.

Les techniques de semis-direct ont été proposées aux agriculteurs dès le début des années 90 (période lors de laquelle l'expansion de SD se faisait en culture motorisée), notamment dans cette région sous l'impulsion de la Coopérative de Tabac. Le principal défi a été de concevoir des outils de semis adaptés. Cela a pu être permis en 3 années grâce à un travail en commun chez des agriculteurs de chercheurs et de fabricants de matériel agricole. L'Etat du Parana a subventionné à hauteur de 70%, 30 semoirs pour 30 agriculteurs. La recherche agronomique suivait les parcelles. Il est apparu dans les essais effectués que plus large était le soc servant à établir le lit de semences, meilleure était la stabilité du semoir mais aussi plus grande la perturbation de la couverture du sol occasionnant une levée rapide des adventices à ce niveau.

Le passage au semis-direct a nécessité l'utilisation d'herbicides et le passage de systèmes de cultures associées à des systèmes de rotation de culture.

La maîtrise des mauvaises herbes a été la principale contrainte à l'application des SCV et l'Etat a alors élaboré un véritable programme de formation sur la maîtrise des mauvaises herbes et les matières actives herbicides.

C'est l'avoine qui est principalement utilisée comme plante de couverture à la fois par sa capacité à maîtriser une partie des mauvaises herbes (effet physique de la couverture couplé à des effets allélopatiques) et par le faible coût de semences (70% de agriculteurs faisant le semis-direct achètent des semences). Parfois le semis-direct se réalise à partir de jachères naturelles dominées par *Brachiaria plantaginea*.

Les pluies sont généralement bien réparties tout au long de l'année et la culture de tabac constitue une des principales cultures de rente.

3 cultures annuelles sont possibles, avec une culture d'hiver, suivi de deux cultures d'été de cycle court.

Chez la majorité des agriculteurs le semis-direct est dominant (sauf pour la culture de tabac). Le recours au labour est parfois nécessaire pour des raisons, soit de tassement de sol (cas des exploitations à élevage avec une compaction liée à la récolte de maïs en ensilage suivi de périodes de piétinement des parcelles en pâturage), soit d'infestation par des mauvaises herbes pérennes ou encore par raison sanitaire notamment lors de deux cycles successifs de haricot.

Une visite d'expérimentation à la station IAPAR de Ponta-Grossa a permis de faire ressortir l'efficacité du passage au *rouleau-faca* sur une plante de couverture d'avoine réalisée après semis pour obtenir une couverture du sol parfaite pour une bonne maîtrise des adventices au niveau de la ligne semis.



Photo 3. Station IAPAR : couverture parfaite à la levée du maïs après une gestion de l'avoine au rouleau-faca après semis.

Chez un agriculteur (possédant 13 ha) par contre la gestion de l'avoine a été faite au *glyphosate* avant semis sans passage du *rouleau-faca* et on a pu constater un état de surface du sol apparemment hétérogène quand à l'état de la biomasse aérienne, occasionnant des gènes à la levée sur une culture de maïs.



Photo 4. Exploitation en culture attelée : état de la couverture d'avoine préalablement traitée au glyphosate à la levée du maïs.

Le rouleau-faca est également un outil très commun en semis-direct car il permet de coucher rapidement (2.5 heures / ha) sans casser la végétation sur le sol. Il nécessite la réalisation d'un mécanisme de transport et de sécurité.

Le matériel de traitement herbicide a également fait l'objet d'amélioration avec notamment un système d'épandage en culture attelée performant (largeur de traitement de 6 à 7 m).

4. LE MATERIEL DE SEMIS

L'exposé et la visite au réalisés au niveau de la société SOCIDISCOS (fabrication de disques de distribution de semoirs motorisés et attelés) a permis de mettre en évidence de nombreux aspects techniques faisant l'objet de tests en usine puis d'essais au champ.



Photo 5. Fabricant de disques de distribution : test de calibrage de disques.

En SCV il importe de :

- limiter les coûts de carburant ;
- perturber le moins possible la couverture du sol (parfois en opposition avec le premier critère);
- répartir de façon aussi homogène la distribution des graines ;
- localiser la fertilisation si possible à quelques centimètres en dessous des semences.

Pour avoir la meilleure répartition possible des semences, le système de distribution pneumatique est plus performant que le système mécanique.

Il est également fortement recommandé d'utiliser du graphite en enrobage de semences (2 à 3 gr / kg) pour pouvoir faciliter la circulation des graines au sein des différents mécanismes de distribution

Les disques de coupe de pailles peuvent être lisses ou cannelés (symétriques), ou lisses et asymétriques. Les cannelés peuvent découper de plus fortes quantités de pailles tandis que les lisses-asymétriques perturbent le moins la couverture du sol.

Au niveau de l'ouverture du lit de semences on peut avoir soit une dent (uniquement pour la traction animale), des disques symétriques (semoirs attelés ou motorisés) ou asymétriques (semoirs motorisés). En culture attelée, les disques sont peu utilisés.

Un des premiers intérêts de la couverture végétale est de pouvoir être moins dépendant quand systèmes conventionnels des conditions d'humidité du sol pour une intervention mécanique, à la fois sur les sols lourds juste après une pluie (protection du tapis végétal contre le tassement du sol), puis d'augmenter la période de germination optimale par une meilleure conservation de l'humidité du sol.

Les semoirs motorisés intègrent souvent un système de réglage de la pression exercée sur le couvert végétal selon l'épaisseur et de la résistance de celui-ci (les pailles de blé sont par exemple plus résistantes que celles d'avoine).

Avec les semoirs attelés comme motorisés le réglage de la profondeur de semis peut se faire avec le roue arrière. Sur les semoirs motorisés il existe un réglage spécifique pour la profondeur de localisation de l'engrais.

L'ingénieur de la société avoue des contraintes dans l'accompagnement des agriculteurs sur le terrain pour obtenir des implantations de qualité. Une des principales contraintes est la trop grande vitesse au semis en motorisé occasionnant une forte perturbation de la

couverture du sol ainsi que des hétérogénéités dans la régularité des profondeurs de semis et de localisation de l'engrais. En cas de semis avec une humidité du sol élevée, il y a également un risque de formation de raies qui ne se referment mal.

5. LA CREATION DES SCV AU BRESIL SUR LES FRONTS PIONNIERS

5.1. Les principes

Cette expérience réussie de SCV dans la région du Parana a servi de modèle technique dans l'accompagnement de mise en culture de nouvelles terres sous climat tropical avec ces quelques principes de base :

- Restaurer les terres tout en cultivant rentablement ;
- Tester beaucoup de systèmes (car on ne sait pas à l'avance celui qui va marcher) ;
- Travailler avec et chez des agriculteurs ;
- D'être en avance sur les systèmes testés avec les agriculteurs.

Les modes de gestion des sols et des cultures sont des facteurs de différenciation des rendements bien plus importants que des améliorations techniques simples (variété, fumure, pesticide, désherbage).

Les 4 références intéressantes à avoir côte à côte sont :

- S0 : ce qu'il ne faut pas faire ;
- S1 : le système actuel de l'agriculteur ;
- S2 : le système amélioré ;
- S3 : le système à son potentiel climatique

Ces différents scénarios doivent permettre avec une large gamme de systèmes de culture différenciés de hiérarchiser les facteurs de limitation des rendements (fertilité physique, chimique, biologique, adventices, ...).

Ces différents systèmes de culture sont pérennisés et ces *matrices* forment le cœur du processus de création et de diffusion des SCV. Les expérimentations actuelles se concentrent dans le sud de l'état de Goiás et dans le Matto Grosso (voir carte 2):

- Campo Verde et Deciolândia ; diversification des SCV sur coton ;
- Giovanni Paludo ; diversification des SCV à base de soja et maïs ;
- Sinop ; diversification des SCV à base de riz.

Il est également nécessaire qu'un programme de sélection variétale des espèces cultivées accompagne les évolutions des systèmes de culture que cela soit pour les cultures commerciales ou les plantes de couverture.

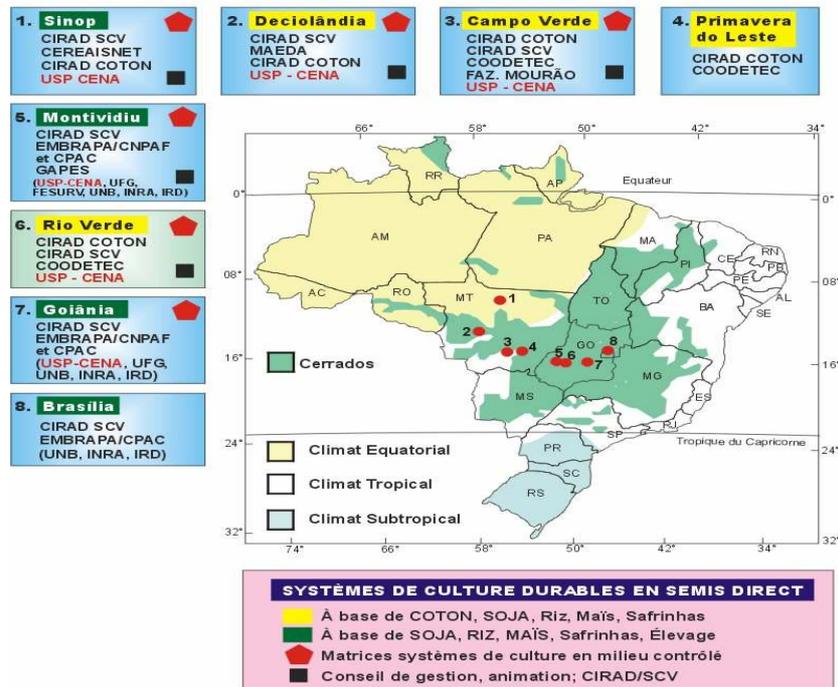
Le modèle de fonctionnement biochimique de la forêt sert de principe de base pour les SCV :

- Sol protégé de façon permanente ;
- Production de phytomasse élevée même sur sols très pauvres ;
- Création d'un horizon 0-10 cm avec une activité biologique continue.

La qualité d'un SCV se juge notamment à la qualité du lit de semences qui doit être aussi bien fermé que possible pour éviter la remontée des mauvaises et leur germination grâce à la lumière. Cependant en début de cycle il est parfois possible qu'un SCV soit végétativement moins satisfaisant que le système conventionnel, par effet allélopathique ou de faim en N lié à une présence de résidus à C/N élevé (cas du sorgho). Il est alors nécessaire de juger jusqu'à la récolte le comportement de la culture principale qui peut par la suite en SCV devenir meilleur par rapport au témoin (cas du coton sur sorgho).

FIG. 1

PÔLE BRÉSIL AGRICULTURE DURABLE Lieux d'intervention et partenariats



Carte 2. Localisation des matrices SCV en zone tropicale en relation avec le pôle agriculture durable.

5.2. La spécificité des plantes de couverture

Le choix des plantes de couverture à intégrer dans les systèmes de culture est un compromis à trouver entre le coût de production des semences et d'implantation, de facilité de gestion lors de l'implantation et la mise en culture, des effets escomptés sur le court terme et des bénéfices cumulés en terme de maîtrise physique des adventices, de conservation de l'eau, de décompaction des sols, d'allélopathie, d'agrégation, de valorisation fourragère, d'augmentation des stocks organiques et de recyclage des éléments minéraux (voir tableau 3).

Idéalement une véritable stratégie d'évolution de systèmes de culture et des plantes de couverture dans le temps est à élaborer en fonction de la fertilité du sol au départ, du taux d'humification des systèmes aériens et racinaires des apports et des moyens des facteurs de production des agriculteurs (mécanisation, intrants, ...).

Au Brésil il est important de constater que la principale plante de couverture en zone subtropicale est l'avoine, en raison premièrement de son faible coût de production de semences (annuelle), de sa facilité d'implantation et de gestion pour une large gamme d'agriculteurs (motorisés et attelés).

Il peut exister une spécificité plante de couverture-espèce cultivée, avec par exemple le coton sensible à l'acidité du sol qui se comporte mieux après un *Brachiaria* parce que ce que celui-ci neutralise cette acidité.

Tableau 3. Quelques effets connus de différentes espèces de plantes de couverture.

Critère de performance	Espèces
Coût de production de semences et coût d'implantation (espèces annuelles avec des graines non dormantes de taille moyenne)	Avoine, Sorgho, Mil Vesce, Crotalaire, Cajanus
Facilité de gestion (pailles droites de petites taille non lignifiées)	Avoine, Brachiaria
Maîtrise physique des adventices (effet d'empilement et de résistance à la dégradation)	Avoine, Brachiaria
Conservation de l'eau (résistance à la dégradation)	Avoine, Brachiaria, Sorgho
Décompactation des sols (système racinaire fasciculé pérenne ou pivotant)	Brachiaria Crotalaria
Allélopathie (Production de substances biochimiques toxiques pour les adventices)	Avoine, Sorgho Cajanus
Macroaggrégation (Système racinaire fasciculé)	Brachiaria, Eleusine Arachis
Valorisation fourragère (Appétabilité)	Brachiaria, Eleusine Vesce, Cajanus, Arachis
Stockage carbone (Forte production de biomasse racinaire et aérienne)	Brachiaria, Sorgho, Mil, Eleusine Crotalaria juncea, Stylosanthes
C soluble (exudats racinaires, polysachharides)	Brachiaria (neutralisation aluminium libre)
Recyclage minéral cations (Spécificité espèce et cations)	Sorgho, Mil (pour K notamment) Légumineuses pour oligoéléments
Recyclage N (Fixation libre ou symbiotique)	Légumineuses si rhizobium présent
Effet phytosanitaire	Eleusine (pyriculariose dur riz) Crotalaria spectabilis (pyriculariose dur riz) Crotalaria retusa (nématodes)



Photo 6. Fazenda du groupe MATEA : coton dans pailles de mil.

En général quand on veut maximiser une culture de type légumineuse, on rajoute une graminée comme plante de couverture et inversement.

Il convient de prolonger au maximum l'activité racinaire en saison sèche par l'utilisation d'espèces à cycle long ou pérennes, ayant des systèmes racinaires puissants (exemple de *Brachiaria brizantha* et de *Crotalaria retusa*).

L'introduction d'une légumineuse de couverture dans l'association peut permettre de réduire les coûts en fertilisation de fertilisation azotée jusqu'à 50% (exemple de la vesce).

Une association de plantes de couverture aux effets complémentaires peut être envisagée comme par exemple un *Brachiaria* avec un *Crotalaire*. Les niveaux de biomasse produits sur la parcelle peuvent être de 6 à 8 T / ha / an pour un système en monoculture de soja à 18 à 22 T / ha / an par rajout d'une culture de mil avant et jusqu'à 26 à 32 T / ha / an avec une culture associée à la culture de mil.

Une valorisation des plantes de couverture en phase de maintenance peut-être envisagée, à la fois sur le plan humain (exemple de *Dolichos* variété à graine blanche, *Eleusine*) ou animal (espèces pérennes). Dans le dernier cas des phases de culture et de pâturage sont actuellement développées dans le cadre des SCV.

5.3. Evolution de la démarche de création des SCV en zone tropicale brésilienne

Au Brésil sur les fronts pionniers d'agriculture du soja, sa monoculture a conduit à une compaction des sols. Au départ il a été nécessaire de labourer pour les décompacter. Les systèmes basés sur une gestion raisonnée des résidus, même avec une rotation (riz avec soja) n'ont pas permis de stabiliser les rendements car on a assisté à une baisse du taux en MOS. La stabilité des systèmes a été permise avec l'introduction d'une plante de couverture dans la succession comme le sorgho, notamment en raison de la sensibilité du riz à la macroporosité du sol.

Les SCV basés uniquement sur une gestion des résidus de culture ne sont pas viables :

- la minéralisation des MOS est supérieure aux restitutions par l'humus ;
- l'espace poral est déficient sous culture en semis-direct ; il devient inférieur aux systèmes conventionnels ;
- la rapide décomposition des résidus ne permet pas le maintien d'une couverture optimale du sol.

Le passage à des plantes de couverture annuelle (avoine en zone sub-tropicale et mil, sorgho en zone tropicale) a permis de s'assurer d'une meilleure couverture et d'un meilleur contrôle des adventices.

Idéalement pour aller vers une agriculture la plus « propre possible » pour un objectif de « santé meilleure » pour l'homme, l'insertion d'une plante couverture pérenne paraît nécessaire.

Sur certains SCV actuels (et certaines parcelles) des résistances au Round-Up existent notamment avec les adventices des genres *Cyperus*, *Commelina* et *Euphorbia*. C'est ainsi que les systèmes incluant des OGM (comme le soja rr) ne peut-être conçu que pour une période transitoire.

Des études actuelles mentionnent que la première molécule de décomposition du glyphosate soit plus toxique que le glyphosate lui-même.

Les SCV à terme pourraient avoir au niveau du système « litière-sol de surface » un fonctionnement « autoépurateur » : sol protégé par la litière des molécules chimiques ; molécules chimiques neutralisées par l'action conjuguée des micro et macroorganismes du sol.

5.4. Analyses des performances agroéconomiques

Les matrices de création des SCV doivent permettre une évaluation économique dont les temps de travaux et coûts de production. La configuration des parcelles est dictée par la nécessité de contrôler au mieux les hétérogénéités du sol. La taille dépend du mode de culture : de grande taille en motorisée (> 0.5 ha), de taille moyenne en culture attelée (> 1.000 m²) ; de petite taille en culture manuelle (autour de 500 m²).

Une configuration longiligne des parcelles dans le sens de la pente est dans tous les cas conseillée. Elle permet de pouvoir mesurer sur certaines parcelles témoins les externalités (eau ruisselée, pertes en terre, en éléments nutritifs, ...). Un système de récupération situé en aval peut-être facilement construit en y installant une bâche.

Les données indispensables à mesurer en SCV concernent :

- Les quantités de biomasses aériennes produites, laissées sur les parcelles et exportées ;
- Les évaluations des quantités en C (environ 44% de la matière sèche), et en éléments minéraux (N, P, K, Ca, Mg, S, voir oligoéléments) de ces biomasses ;
- Des estimations de biomasse racinaire par prélèvements ;
- L'évolution entre les biomasses et les quantités minérales de la couverture du sol entre le semis et la récolte de culture principale.

Les interactions entre les propriétés physiques, biologiques et chimiques des sols sont dominantes, d'où l'idée de ne pas s'attaquer à une démarche mécanistique de compréhension des processus mais plutôt d'indicateurs systémiques de fonctionnement du sol.

La qualité de l'indicateur est essentielle : elle doit être faire appel au savoir-faire des agriculteurs et être accessibles aux individus. Les profils racinaires et des observations *in-situ* sont primordiales. Les systèmes racinaires pour être mieux visibles doivent être lavés à l'eau et teints par de la peinture avec des aérosols.

D'autres outils spécifiques peuvent être rajoutés :

- Suivi de la vitesse d'enracinement au moyen d'injection d'herbicides résiduels au niveau du sol ;
- Prélèvements de cylindres horizontalement dans des fosses pour des réaliser plusieurs paramètres ; densité apparente, conductivité, biomasse racinaire.

6. QUALITE DES MATIERES ORGANIQUES DU SOL (MOS)

6.1. Les différents compartiments des MOS

Les études actuelles sur les matières organiques du sol les séparent en compartiments ou fractions à taux de renouvellement contrasté (voir tableau suivant). Ces différents compartiments se différencient à la fois par des natures biochimiques différentes et des formes d'accès de plus en plus difficile d'accès pour les microorganismes du sol.

Tableau 4. Eléments de différenciation des MOS : leur taux de renouvellement.

Compartiment	Taux de renouvellement
<i>Metabolic - C</i>	0.2 à 0.5 années
<i>Structural C</i>	2 à 4 années
<i>Active</i>	0.3 à 2 années
<i>Slow</i>	15 à 100 années
<i>Passive</i>	500 to 5000 ans

On admet généralement que le compartiment à taux de renouvellement élevé est constitué principalement par des débris végétaux, des microorganismes morts et vivants. Ce compartiment dit actif a un rôle essentiel notamment dans la dynamique de N à court terme et donc de la nutrition des cultures. C'est l'activité des microorganismes qui régulent les processus de minéralisation et d'immobilisation de N.

L'autre compartiment à taux de renouvellement très lent est supposé être constitué de matières organiques associées aux microorganismes et aux argiles sous forme de microagrégats, qui ont un degré d'évolution biochimique important (C/N bas, structures biochimiques résistantes à la dégradation comme la lignine). La taille de ce compartiment est liée à l'importance de la fraction fine du sol (limons fins et argiles).

Les méthodes d'études sur les qualités des MOS sont actuellement le plus souvent basées sur des séparations physiques et granulométriques. La limite utilisée la plus fréquemment pour distinguer ces 2 compartiments est 53 μm . Au dessus de cette taille on estime que nous avons des fragments de résidus identifiables et non protégés par les argiles et les microorganismes du sol.

Dans les études sur SCV on doit considérer le continuum entre la litière végétale présente à la surface du sol et non décomposée et les résidus intégrés dans le sol. C'est la limite à 2 mm qui constitue la frontière entre ces matières organiques.

Nous avons à partir de prélèvements effectués au champ classé les différents types de résidus selon les fractions granulométriques suivantes (voir photo 7):

- > 8 mm : résidus intacts peu en contact avec le sol ayant subi parfois un broyage mécanique ;
- > 4 mm : résidus en début de fractionnement par activité faune du sol) en contact avec le sol ;
- > 2 mm : résidus bien fractionnés en contact avec le sol ;
- 2000 μm à 210 μm : résidus associés aux sables grossiers comme les grains de quartz ;
- 210 μm à 53 μm : résidus associés aux sables fins (quartz émoussés, micas, ...) ;
- 53 μm à 20 μm : résidus organiques transformés formant des agrégats associés aux limons grossiers ;
- 20 μm à 2 μm : résidus organiques très transformés associés aux limons fins ;
- < 2 μm : résidus organiques très transformés associés aux argiles.



Photo 7. Le continuum litières-sol des MO : première séparation des fractions.

Dans la figure ci-dessus nous voyons qu'à court terme les principales fractions granulométriques du sol sont concernées par des modes de gestion des sols et des cultures différenciés.

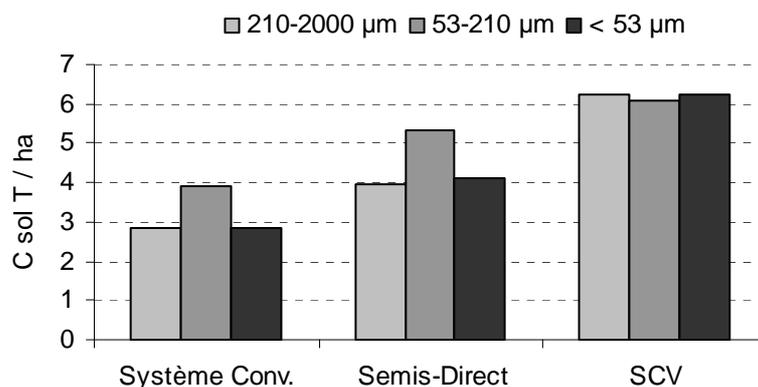


Figure 1. Fazenda Mourao : effet en 3 années de systèmes de culture très différenciés sur les stocks en C du sol au niveau de 3 fractions granulométriques.

6.2. Effets des systèmes de culture sur les MOS

A court terme tous les compartiments des MOS semblent touchés par un changement des pratiques. Le passage d'une jachère forestière à un système conventionnel s'accompagne généralement d'une baisse très rapide des stocks à la fois par une perte des apports continus des apports de la litière (fort effet sur les fractions grossières) et par une activation de la minéralisation des compartiments associés aux fractions granulométriques du sol les plus fines, en relation avec la déstructuration mécanique du sol.

Dans cette situation en zone tropicale, cette forte minéralisation des MOS qui s'accompagne par une chute très importante des stocks en C et N organique peut être renforcée par un enfouissement des pailles lors du labour qui provoque un effet de *priming-effect*. Cet effet est lié à une activation de l'activité microbienne par apports de produits riches en cellulose et hémicellulose (polysaccharides) lorsque la quantité d'N minéral du sol disponible au niveau des apports est insuffisante, s'attaque à l'N organique associé aux vieilles MOS normalement protégées.

Inversement un passage rapide de systèmes conventionnels en SCV à fort niveau d'apports organiques (exemple d'un système avec coton et une association *sorgho-Brachiaria*) conduit à une augmentation de tous les compartiments des MOS.

Il est à noter que de faibles différences de qualités dans les apports de matières organiques fraîches peuvent avoir de grandes conséquences sur l'offre en N d'origine organique sur le court terme. La valeur critique du rapport C/N autour de 24 constitue pour les apports organique un bon indicateur de mise à disponibilité d'N organique à court terme pour des valeurs inférieures ou d'immobilisation d'N pour des valeurs supérieures.

7. RELATION ENTRE AGREGATION ET MOS

7.1. Les différents types d'agrégats

Les classes d'agrégats du sol dépendent des méthodes utilisées. Parfois on parle de macroagrégats pour des agrégats qui ont la taille centimétrique, de microagrégats de dimension millimétrique et de submicroagrégats de l'ordre du dixième de millimètres.

Dans les travaux actuels la limite est le plus souvent fixée à 250 µm entre les macroagrégats séparés à l'eau et les microagrégats dispersés aux ultra-sons.

Les premiers sont associés aux racines et radicelles, les seconds aux cheveux racinaires et polysaccharides et les plus petits aux minéraux, résidus microbiens et argiles associées aux débris végétaux. Les exudats racinaires jouent également un rôle important dans la macroagrégation. Ainsi les graminées sont les meilleures plantes pour restructurer un sol grâce à leurs activités racinaires.

7.2. Séparation et test de stabilité sur les agrégats

Des tests d'agrégation sur les macroagrégats (méthode Yoder) sont conduits en routine au niveau du laboratoire de l'UEPG. Ils sont placés dans différents tamis et immergés puis agités avec un mouvement vertical et en temps prédéterminés. Ils ont été ici divisés selon les tailles de tamis suivantes : 19, 8, 4, 2, 1, 0.5 et 0.25 mm.

7.3. L'importance des systèmes racinaires sur la macroagrégation

A partir de prélèvements réalisés sur différentes parcelles ayant différents types de couverts, il a été réalisé un test simple au champ à partir de prélèvements de surface, le tri méticuleux de petites mottes et de terre fine, et l'observation visuelle de comportement de ces échantillons dans une éprouvette d'eau d'un litre.



Photo 8. Champ expérimentation UEPG : effet de systèmes racinaires sur la macroaggrégation (plongée simple de mottes de terre dans des éprouvettes remplies d'eau).

Ce simple test au champ a permis de mettre en évidence :

- l'effet important sur la macroaggrégation d'un système racinaire récent (d'où l'intérêt des plantes de couverture pérennes) ;
- la plus grande efficacité des graminées dans le rôle sur l'aggrégation par rapport aux légumineuses (exemple du ray-grass et de l'avoine)

8. RELATION ENTRE CEC ET MOS

Au Brésil les études réalisées montrent que la CEC (Capacité d'Echange Cationique) est généralement responsable d'au moins 70% de la valeur de la CEC. La CEC augmente linéairement avec le C du sol notamment parce que les sols sont acides.

L'augmentation de la CEC en fonction de la quantité de C du sol est également plus importante sur sol sableux.

Les associations MOS et argiles, et MOS et oxydes et hydroxydes de Fer et d'Aluminium, favorisent l'aggrégation et la protection des MOS.

9. RELATION ENTRE RETENTION EN EAU ET MOS ; PHYSIQUE DES SOLS SOUS SCV

Les effets directs du C au niveau du sol interviennent sur la dynamique de l'eau, la teneur en O₂ et sa température. Les effets indirects sont multiples : sur la densité apparente, la texture, la structure, l'aggrégation, la porosité et sa friabilité.

Par gramme de C gagné par kilogramme de sol en laboratoire, on estime un gain potentiel de rétention en eau de 3 à 5 mm pour une texture intermédiaire avec une teneur en argiles de 25 à 30%.

L'augmentation du C augmente plus la valeur de la capacité au champ que celle du point de flétrissement.

Au champ on peut ainsi gagner facilement en SCV de 65 à 90 mm d'eau pour le maïs, soit un gain en maïs grain en situation pluviale qui varie entre 5 à 10%.

La densité apparente et la résistance à la pénétration peut-être plus élevées en SCV qu'en systèmes conventionnels, notamment à la surface des sols. Cependant la qualité physique des sols est avant tout appréciée par l'enracinement des cultures.

10. ETUDES SUR LES STOCKS

10.1. Etudes sur 0-5 et 0-20 cm

Un rapport intitulé *Carbon Index*, égal aux quantités de C sur 0-5 cm / quantités de C sur 0-20 cm, est fréquemment utilisé en SCV. L'utilisation de ce rapport permet de comparer sur le court terme (quelques mois) ou sur le long terme les tendances de modification des stocks sous l'effet d'apports conséquents en surface (aériennes et souterraines). Ainsi en 6 mois des effets importants ont pu être décelés en comparant SCV et systèmes conventionnels soumis à de forts apports de litières à la surface des sols. Il apparaît possible de comparer également différents SCV différenciés selon la localisation de leurs apports, avec par exemple une augmentation du ratio dans le cas d'apport organiques issus essentiellement de surface (plante de couverture annuelle de type avoine) et un rapport plus stable dans le cas d'apports organiques d'origine racinaire (plante de couverture de type *Brachiaria*).

10.2. Modélisation d'évolution des stocks à partir du modèle Hénin-Dupuis

Le bilan de Hénin-Dupuis (1945) se résume en un bilan très simple :

La différence d'évolution des stocks en C du sol = Apports organiques au niveau du sol (quantité de C * coefficient d'humification K_1) – Pertes du sol (quantité de C du sol * coefficient de minéralisation K_2)

Le K_1 des matériaux organiques dépend de la nature biochimique des résidus (et notamment de la teneur en lignine), de la vitesse d'incorporation au sol de ceux-ci (racines, rôle de la macrofaune, enfouissement mécanique) en relation avec la quantité des restitutions.

Des mesures effectuées sous SCV en zone subtropicale donnent des valeurs de K_1 de 26.5% pour des résidus de culture peu riches en lignine (tiges de maïs, avoine, soja). Globalement en moyenne on estime que 20% de la quantité de C organique apportée par des résidus est transformée en MOS stable.

K_2 , le coefficient de minéralisation des sols, varie selon la température, autour de 1% en climat tempéré, 2% en climat subtropical (ou tropical d'altitude), 5 à 10% en climat tropical, selon le régime pluviométrique, l'état initial des MOS (après jachère on peut avoir un coefficient élevé qui se stabilise ensuite après).

L'hypothèse de réduction du K_2 en climat tropical sous SCV est liée à :

- une réduction de l'activité microbienne pas baisse des températures par présence d'une couverture permanente du sol ;
- par une protection des MOS au sein des agrégats.

La détermination simultanée des coefficients K_1 et K_2 au champ peut-être estimée si l'érosion du sol est maîtrisée grâce à l'équation suivante :

Stock du sol en C = $(K_1 * \text{apports} / K_2) - ((K_1 * \text{apports} / K_2) - \text{stock du sol en C au départ}) * \exp(-K_2 * \text{nombre d'années})$.

Si l'on dispose de 3 années d'évolution des stocks du sol avec les quantités des apports on peut déterminer K_1 et K_2 (résolution d'une équation avec les 3 inconnues, stock initial, K_1 et K_2).

Si dans une expérimentation nous avons deux traitements avec et sans apport avec un même stock initial de sol la connaissance à 2 années différentes de différences des stocks entre ces traitements permet également de déterminer les coefficients en résolvant l'équation suivante à 2 inconnues K_1 et K_2 :

Stock du sol avec apport – Stock du sol sans apport = $K_1 * \text{apports} / K_2 * (1 - \exp(-K_2 * \text{nombre d'années}))$.

10.3. Intérêt du modèle Hénin-Dupuis sur l'évolution à long terme des SCV

Un SCV est à minima un système de culture où le bilan cumulé des apports ($K_1 C$ Apports) moins les pertes ($K_2 C$ Sol) est positif.

Le K_2 est censé diminué au cours du temps sous SCV en relation avec une amélioration de la structuration du sol et donc de la protection des MOS et par diminution de la température, pouvant ainsi compenser l'amélioration de l'humidité du sol qui stimule la minéralisation.

Cette diminution de cette minéralisation accentue le fait que la fourniture d'N organique sera plus dépendante des apports organiques frais que de la minéralisation de MOS protégées.

Le K_1 est lié à :

- la quantité des apports, sachant qu'il existe globalement une bonne relation entre quantité des apports et les quantités stockées au niveau du sol ;
- la qualité des apports et leur teneur par exemple en lignine ;
- la répartition de ces apports, avec certainement une plus grande efficacité dans les apports souterrains qu'aériens.

Lors de la formation 4 groupes de travail on été constitués pour établir à partir de différentes situations vécues sur les différents projets l'évolution simulée des stocks de MOS sous SCV comparés à des systèmes convectionnels.

Quelques applications et exemples de courbes d'évolution des stocks des MOS sur les sols en surface sont mentionnés dans les 3 figures suivantes pour certains grands types de systèmes de culture testés actuellement au Mali.

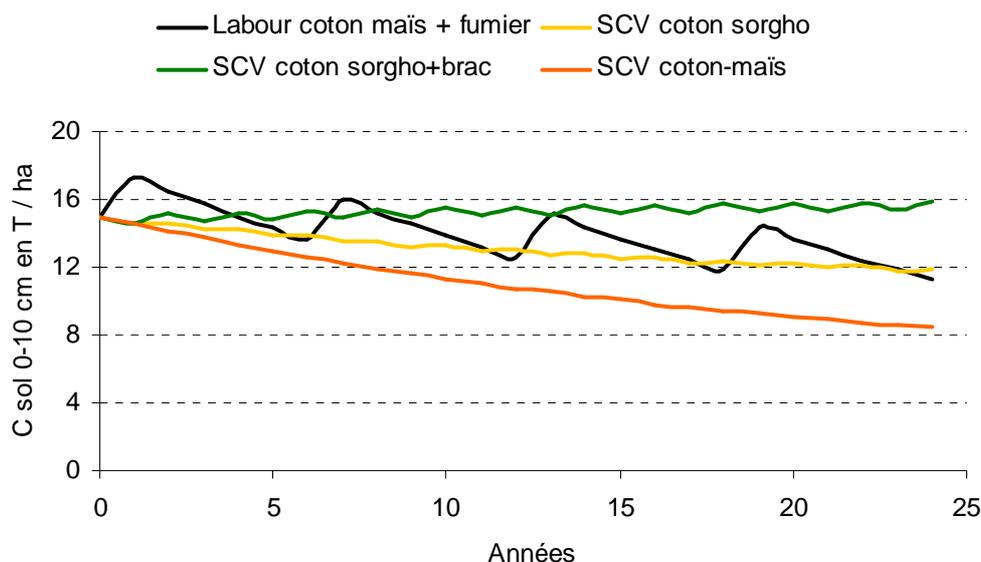


Figure 2. Evolution des stocks en C du sol pour différentes rotations biennales ; stock du sol au départ de 15 T / ha ; K_2 pour Labour et SCV = 5%.

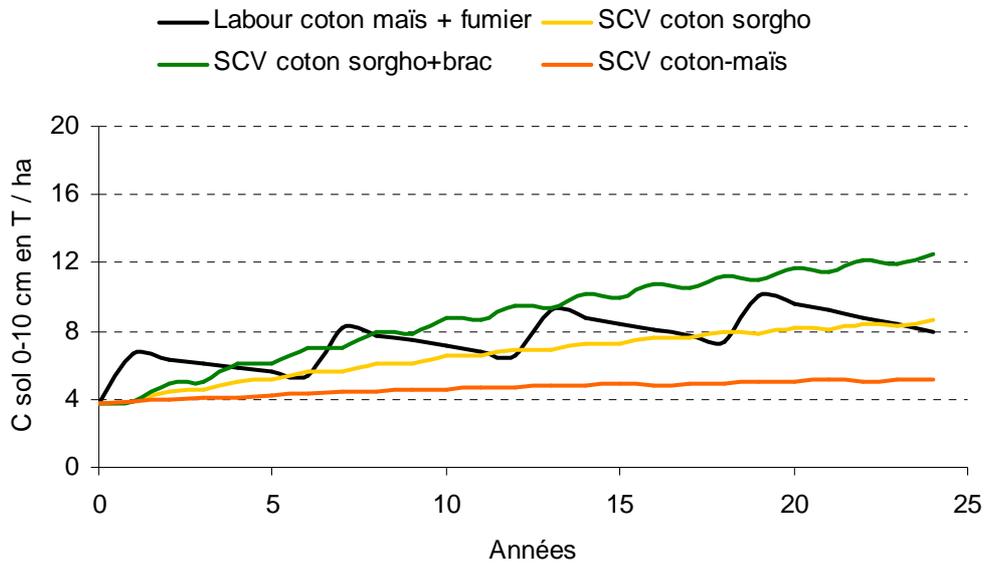


Figure 3. Evolution des stocks en C du sol pour différentes rotations biennales ; stock du sol au départ de 3.75 T / ha ; K_2 pour Labour et SCV = 5 %.

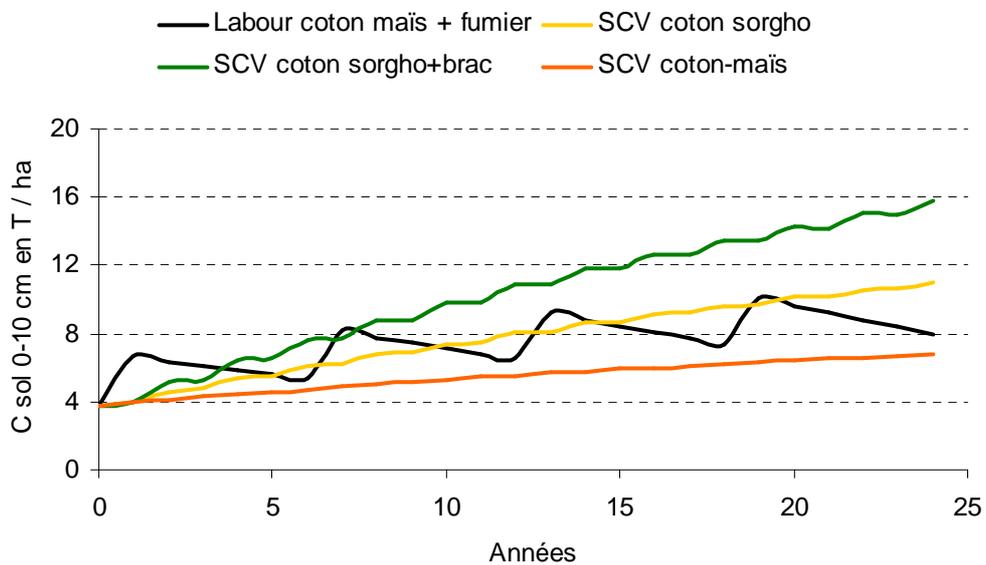


Figure 4. Evolution des stocks en C du sol pour différentes rotations biennales ; stock du sol au départ de 3.75 T / ha ; K_2 pour Labour = 5 % et SCV = 3%..

10.4. Etudes d'évolution des stocks sous cultures

Les principales publications dans les revues à comité de lecture des effets des SCV concernent des effets globaux des modes de gestion des sols et des cultures comparés avec des systèmes conventionnels sur des évolutions de stocks en C voir N sur les moyens et long terme.

Globalement on cite des améliorations d'autant plus prononcées que le milieu de départ est pauvre comme par exemple des augmentations de stocks de 70% en 5 ans sur sols sableux, contre 50% en 5 ans sur sols argileux.

Les effets de passage des SCV en systèmes conventionnels ont généralement des effets se concentrant essentiellement en surface sur les 10, voir les 5 premiers centimètres.

Cependant des effets plus en profondeur peuvent s'exprimer sur des systèmes beaucoup plus différenciés :

- en 10 ans perte de 66% sur 0-10 avec discage et monoculture de soja ; -52% sur 10 - 20 cm sur la même période ;
- ensuite en 6 ans +100% en SD sur 0-10cm et +40% sur 10-20cm : avec soja-mil-sorgho
- suivi de 5 ans de pâturage de *Panicum* +35% sur 0-10cm et +64% sur 0-20cm ; ou *Brachiaria brizantha* pour revenir à des niveaux de stocks comparables à ceux de la forêt.

10.5. Restauration des sols dégradés

Un exemple de scénario de construction de système de culture est mentionné dans le tableau suivant sur un type de sol dégradé par rapport aux cycles de C et N.

Tableau 5 . Scénario d'évolution des SCV en phase de restauration de la fertilité des sols.

Critères pour C et N	Scénario de construction de SCV			
	Phase initiale 0-5 années	Phase de transition 5-10 années	Phase de consolidation 10-20 années	Phase de maintenance > 20 années
	Recréer de l'aggrégation	Augmenter le taux en MO en surface	Augmenter fortement le taux en MO sur l'ensemble du profil	Maintenir le taux en MO sur l'ensemble du profil
Quantité d'apports C	Moyen	Elevé	Très élevé	Moyen
Conséquence sur la fertilisation N minérale N	Rajout N supplémentaire	Rajout N supplémentaire	Retour N de départ	Réduction N de départ
Bilan N	Immobilisation N > Minéralisation	Immobilisation N = Minéralisation N	Minéralisation N > Immobilisation N	Minéralisation N > Immobilisation N

La restauration en SCV peut-être imaginée en trois phases :

- Première phase : où l'activité racinaire doit être favorisée de manière à reconstituer l'aggrégation du sol pour améliorer l'enracinement et ainsi favoriser la production de biomasse ;
- Deuxième phase : apports par les parties aériennes à C/N élevé pour reconstituer les stocks en C ; un apport en N d'origine minéral est à envisager ;
- Troisième phase : apports par les parties aériennes à C/N faible pour offrir de l'azote organique et diminuer les apports en engrais azoté.

Lors de ces 3 étapes nous avons un bilan spécifique au niveau de la dynamique de l'N d'origine organique :

- Première phase : immobilisation N > minéralisation N ;
- Deuxième phase : immobilisation N = minéralisation N ;
- Troisième phase : minéralisation N > immobilisation N.

Généralement plus un sol est dégradé et plus sa restauration peut-être rapide.

Une comparaison d'évolution des stocks entre les SCV et le système naturel montre généralement :

- les 10 premières années une augmentation du stock en surface et une diminution en profondeur ;
- les 10 années suivantes des augmentations de stocks qui concernent les différentes profondeurs du sol.

11. ETUDES SUR LES LITIERES DE SURFACE

11.1. Etude de la décomposition de la couverture du sol

La décomposition des litières en surface peut s'effectuer par un suivi en sacs de décomposition ou *litterbags* parfaitement homogènes constitués à un temps T_0 puis prélevés à des dates permettant la détermination d'une courbe de décomposition. Des analyses classiques sur C, N, P, K total, permettent de relier qualité des litières et vitesse de décomposition et aussi d'estimer l'offre des litières face à la demande des cultures pour des éléments tels que N, K (pour le C le devenir des pertes en C constatées au niveau des sacs de décomposition n'est pas facile à déterminer).

Le nombre de sacs de décomposition est fixé au départ. L'intervalle de prélèvements dépend du type de matériau. Les sacs de décomposition font 15 x 15 cm avec une maille de 1 mm pour avoir l'effet de la microfaune, de la mésofaune et de la microflore du sol. Pour des travaux de recherche 5 répétitions pour une parcelle de 300 m² sont nécessaires pour maîtriser la variabilité du milieu. Plus le mulch est épais, plus il faut augmenter la taille des *litterbags*.

C'est ainsi qu'en systèmes conventionnels la relation « offre / demande » peut paraître théoriquement brutale et asynchrone avec par exemple un pic de minéralisation en N du sol survenant à un stade où le système racinaire de la culture est peu efficace, alors qu'elle devient en SCV plus régulière par une régulation microbienne au niveau de N (processus d'immobilisation-minéralisation) ou celle de K par une libération lente des résidus de culture (tiges de sorgho très riches en K).

11.2. Qualité des litières et impacts

La qualité biochimique des litières est théoriquement abordée par une séparation en 5 classes de composés carbonés qui se distinguent par des vitesses de décomposition théorique.

Tableau 6. Les 5 grands types de constituants du C dans les végétaux.

Classe	Caractéristiques	Vitesse de décomposition	Valeurs indicatives K au champ (taux de décomposition) / an
Sucres	Solubles à l'eau Associés aux matières vivantes	Très rapide	4.605
Hémicellulose (polysaccharide)	Composés dominants	Moyenne	2.303
Cellulose (polysaccharide)			1.386
Lignine	Molécules complexes	Lente	0.693
Lipides	Faibles quantités	Très lente	0.288
Phénols	Faibles quantités	Très lente	0.105

Ces classes sont rarement utilisées ensemble pour déterminer la qualité des litières. Le plus souvent on utilise :

- le rapport C/N ou encore la teneur en N (la teneur en C dans les végétaux se situe généralement entre 43 et 45%) ;
- le rapport lignine / N ;
- le rapport lignine / N + polyphénols.

C'est le rapport C/N (ou teneur en N) qui semble globalement pour les litières les plus courantes le meilleur indicateur de qualité, hormis les feuilles de certaines espèces forestières tropicales qui contiennent des teneurs significatives en polyphénols).

On notera l'intérêt de la mesure du taux de lignine qui n'est pas forcément corrélé avec le rapport C/N bien que généralement les parties les plus dures (tiges) sont celles qui ont un C/N plus élevé et une teneur en lignine plus forte. Cette mesure est par ailleurs souvent intégrée dans le fonctionnement des modèles d'évolution des MOS car des études considèrent que la lignine peut-être considérée comme l'élément contribuant le plus à l'humus du sol, sa partie stable.

Le dosage de la lignine se fait le plus couramment avec la méthode Van-Soest qui sépare les 3 fractions de fibres végétales (hémicellulose, cellulose, lignine) par des attaques successives.

Il convient de noter que cette détermination est délicate et doit être confiée à un laboratoire expérimenté ayant une grande base de données avec des références d'échantillons témoins. Cela nécessite en premier lieu une qualité de broyage bien contrôlée car cela peut avoir un fort impact sur les teneurs données par un laboratoire ce qui explique la forte disparité des résultats donnés dans la littérature.

Naturellement la composition chimique des végétaux dépend de l'espèce, de l'organe prélevé et de l'âge de l'échantillon (voir tableau suivant).

Tableau 7. Exemples de composition biochimique de végétaux (en %).

Espèce	Nature	Hémicellulose	Cellulose	Lignine
Bois de feuillu	Adulte	29	45	23
Tige de blé	Immature	23	36	5
Tige de blé	Mature	25	30	13
Luzerne	Immature	11	33	5
Luzerne	Mature	16	40	13

12. MICROORGANISMES DU SOL ET BIOMASSE MICROBIENNE

Les microorganismes du sol sont composés par des bactéries, des champignons et des actinomycètes principalement. Ils ont un C/N bas (entre 5 et 15). Ils assurent la transformation des produits végétaux à C/N toujours plus élevés qu'eux. Il en résulte une forte minéralisation de C vers l'atmosphère et une relative accumulation de N au niveau des MOS lors de l'intégration progressive de ces produits.

La biomasse microbienne du sol (bactéries, champignons et actinomycètes) contrôle la fourniture de l'N organique en tant qu'elle est à la fois une source (minéralisation nette) et un puits en (immobilisation ou réorganisation). Bien qu'elle ne représente en général que 2 à 6% de N, un turn-over rapide de cette biomasse permettrait d'offrir des quantités de N importantes.

Le pic de minéralisation constaté en zone tropicale en début de saison des pluies serait en partie lié à la minéralisation rapide des parois cellulaires des bactéries mortes durant la saison sèche.

Généralement il existe une relation directe en biomasse microbienne N et stock C. Cependant le meilleur indicateur de différenciation du potentiel de fourniture de N sur le court terme est le rapport entre la biomasse microbienne et la quantité de C total du sol

La méthode utilisée la plus courante pour estimer la biomasse microbienne est celle de la fumigation-extraction de N α -aminé. La biomasse microbienne est estimée à partir de la quantité N α -aminé provenant des parois microbiennes solubilisée durant une fumigation au chloroforme.

La biomasse microbienne peut immobiliser entre 50 et 180 kg / ha N sur la couche de sol 0-10 cm avec une demi-vie de 3 mois.

L'apport en polysaccharides favorise la croissance microbienne et il existe une bonne corrélation entre la quantité de microorganismes et la quantité de polysaccharides apportée.

13. UTILISATION DES RADIO-ISOTOPES

13.1. Cas du ^{13}C

1.11% du carbone est sous la forme ^{13}C . La teneur des plantes en ^{13}C dépend du cycle photosynthétique :

- C_3 : arbres, légumineuses, coton... ; la valeur se situe autour de -29‰ ;
- C_4 : graminées, maïs, brachiaria, ; la valeur se situe autour de -12‰.

Le dosage du ^{13}C au niveau du C du sol et des fractions granulométriques permet dans certains cas de différencier le C provenant des apports les plus récents de résidus du C total du sol avant apport de ces résidus. Pour réaliser de type de bilan un minimum de situation est nécessaire avec également des différenciations contrastées dans les apports récents et anciens au niveau de leurs cycles photosynthétiques. Dans certains cas il devient possible de d'estimer le coefficient d'humification au niveau du sol quand le type dominant d'apport est homogène (même espèce).

Par exemple dans le cadre d'une mise en culture d'une forêt, qui a un marquage isotopique de type C_3 , après la mise en valeur par une espèce de type C_4 (prairie ou céréales), on peut après quelques années, déterminer le % de C d'origine de la graminée au niveau du sol par l'équation suivante :

$$\% \text{ C d'origine des résidus} = \frac{\text{marquage isotopique du sol cultivé} - \text{marquage isotopique du sol sous forêt}}{\text{marquage isotopique des résidus de cultures} - \text{marquage isotopique du sol sous forêt}}$$

13.2. Cas du ^{15}N

La teneur en ^{15}N , isotope de N, est constante au niveau de l'air. Les légumineuses fixatrices d'N par la fixation symbiotique (voir certaines graminées ayant une fixation libre) ont donc un marquage isotopique qui tend à se rapprocher de cette valeur en fonction de la proportion d'N fixée. Cette proportion peut varier énormément, de 0% pour une espèce sans rhizobium spécifique à 70% au maximum pour une fixation symbiotique réalisée dans des conditions optimales. En condition naturelle au moins 30% de l'N fixé par une légumineuse provient donc de l'N du sol.

Une estimation du pourcentage de N dérivé de la fixation biologique dans la nutrition azotée d'une plante au champ peut-être faite selon la formule :

$$\% \text{ N d'origine de la fixation} = \frac{\text{Marquage isotopique d'une plante non fixatrice} - \text{Marquage isotopique de la plante fixatrice au champ ou cultivée en succession avec la plante fixatrice}}{\text{Marquage isotopique d'une plante non fixatrice} - \text{Marquage isotopique de référence de la plante fixatrice réalisé au laboratoire}}$$

Cette donnée peut-être ainsi intéressante non seulement pour déterminer l'efficacité de la fixation mais aussi pour estimer la part de cette fixation dans la nutrition des cultures et par extrapolation l'économie d'N apportée au niveau du système de culture. Il est dans ce cas nécessaire d'analyser le marquage isotopique au niveau du sol ainsi que celui des résidus de la culture principale.

14. CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE COLLABORATION

14.1. La gestion des MOS et le fonctionnement biologique du sol

La gestion des MOS, tant sur ces aspects quantitatifs que qualitatifs, apparaît être déterminante à concevoir dans la conception des SCV. Les MOS apparaissent être la clef du fonctionnement du sol pour de nombreux aspects concernant la production végétale et pour ne citer que les plus importants :

- rôle sur les nutriments (source et puits) ;
- structuration du sol (macro et microagrégations) ;
- conservation de l'eau.

Au niveau du sol les différents paramètres de la fertilité liés aux MOS interagissent entre eux. Pour exemple on ne citera que l'activité biologique d'un sol (racines, faune, microorganismes) est certainement un des indicateurs les plus pertinents permettant d'estimer l'efficience visuelle *in-situ*. Quantifier ces activités indépendamment pour les relier à des composantes de la production végétale paraît être délicat voir impossible. Il est nécessaire au niveau du sol d'avoir une approche systémique et éviter tout compartimentage.

Malgré les progrès réalisés ces dernières années dans le domaine du fonctionnement biologique du sol (concept apparu cependant très récemment), un champ d'investigations considérable sur les mécanismes biologiques mis en œuvre individuellement est encore devant nous dont :

- le rôle des systèmes racinaires sur les dynamiques des MOS et le stockage du C dans le sol (exudats racinaires, radicelles) ;
- la reconnaissance des molécules organiques ayant des effets stimulants ou allélopathiques sur certaines cultures ou adventices ;
- le rôle de la macrofaune (vers de terre, termites) et mésofaune (arthropodes) dans le cycle des nutriments.

Le fonctionnement des microorganismes du sol qui régulent les mécanismes d'offre et de stockage pour au moins trois éléments majeurs, à savoir, C, N et P n'est pas encore bien maîtrisé. Les recherches fondamentales en cours ont pour objectif de modéliser le devenir de l'interaction entre molécules organiques pures, azote minéral et microorganismes du sol.

14.2. Certains à priori revus

Au niveau de l'Etat du Parana, l'opposition entre grandes et petites exploitations n'est pas toujours réelle et il existe certaines similitudes dans les contraintes techniques :

- plante de couverture similaire (l'avoine) ;
- marges de progrès sur les qualités d'implantation ;
- phénomènes de résistance au *glyphosate*.

Un des facteurs essentiels de motivation pour les agriculteurs à pratiquer les SCV (en situation motorisée et attelée) est la facilitation des opérations de travail et la réduction des coûts de production :

- notion de « sustentation » ou de capacité d'un sol à pouvoir être travaillé en sol humide ;
- moindre investissement en carburant, temps de travaux et intrants.

Le développement de l'agriculture mécanisée en zone tropicale s'est effectué sous de fortes contraintes :

- de milieu physique, avec des sols très pauvres au départ sur le plan chimique ;
- des contraintes économiques, liés à l'absence de subventions agricoles et au surcoût des intrants lié aux frais de transport.

Le terme SCV (ou *No-Tillage* brésilien ou *Conservation Agriculture* des USA au premier sens du terme) est avant tout un concept basé sur une gestion agrobiologique des sols, plus qu'un recueil de recettes techniques dont les principes fondamentaux sont une couverture permanente du sol, un sol biologiquement toujours actif et un système minimisant les pertes en nutriments et C.

Cet idéal est parfois très éloigné de certaines pratiques des agriculteurs catalogués comme pratiquant le *no-tillage* qui à des périodes de leurs successions culturales et pour des raisons diverses, labourent ou travaillent le sol : dans ce cas on perd une partie de l'effet SCV et plus particulièrement au niveau de la macroagrégation. Le rôle des équipes de recherche est en premier lieu de construire de vrais SCV de manière à favoriser à son maximum l'expression des processus biologiques.

La création puis le passage aux SCV ne se fait pas par un coût de baguette magique mais passe par une étape de mise au point technique faite parfois d'échecs. Cette étape nécessite un effort minimal en investissements (matériel surtout, voir intrants).

La nécessité de changement est souvent provoquée par une contrainte majeure, qui peut avoir une d'origine très diverse et par exemple en systèmes mécanisés :

- au Brésil, érosion hydrique ;
- aux USA, érosion éolienne ;
- en France, terres ingrates pour la mécanisation.

En agricultures familiales tropicales l'augmentation de la productivité de la terre à court terme est certainement le principal défi. Les SCV doivent être pouvoir conduits à des niveaux d'intrants importés proches de ceux existants en systèmes conventionnels. Un soutien politique et financier est nécessaire pour accompagner cette phase initiale de mise au point, notamment pour le matériel agricole spécifique devant être conçu.

Grâce à la valorisation des processus biologiques des systèmes très performants sont actuellement conduits au Brésil avec la culture de soja avec des niveaux d'intrants réduits : 4 T / ha de grain avec des fumures minérales de type $40 \text{ P}_2\text{O}_5 + 40 \text{ K}_2\text{O}$.

Si les SCV sont potentiellement plus propices à être développés en zone humide, le potentiel d'amélioration des niveaux de production à atteindre sur le court terme est plus important en zone sèche, notamment en pouvant lever la contrainte hydrique. Le principal défi à résoudre dans ces zones est la compétition pour la biomasse végétale entre les activités agricoles et les activités d'élevage fortement développées dans ces régions.

14.3. Echanges entre pays

De nombreux échanges ont pu avoir lieu entre les différentes équipes. Le tableau ci-dessous fait ressortir les éléments communs entre les différents pays représentés.

Tableau 8. Points échangés entre les pays représentés lors de la formation.

Pays	Points échangés et éléments communs
Madagascar - Laos	Zones d'altitude Riz
Madagascar - Cameroun	Agriculture manuelle Riz Zone sèche
Madagascar - Mali	Agriculture attelée Intégration agriculture – élevage Zone sèche
Laos - Cameroun	Riz
Laos - Mali	Semoirs semis-direct motorisés et attelés
Cameroun - Mali	Coton Céréales

14.4. Le devenir de la formation

La poursuite de la formation est envisagée les 5 prochaines années avec un financement du MAE. La prochaine session devrait avoir lieu en novembre 2007 qui s'avère la période la plus propice (phase d'implantation des cultures). Deux formations par an pourraient avoir lieu les 4 prochaines années de manière à faciliter la participation de personnes des deux hémisphères.

15. BIBLIOGRAPHIE

Aber, J.D., Mellilo, J.M., 2001. Terrestrial Ecosystems. Academic Press (Eds.), San Diego, 556 p.

Baker C.J., K.E. Saxton, W.R Ritchie, W.C.T.Chamen, D.C. Reicosky, M.F.S Ribeiro, S.E. Justice and P.R. Hobbs, 2006. No-tillage Seeding in Conservation Agriculture (2nd edition). CABI and FAO, London, 326 p.

Brady N.C. and Weil R.R., 1996. The nature and properties of soils (11thedition). Prentice Hall, New Jersey, 740 p.

Derpsch R., 2005. Situation of conservation agriculture in the world. In World Congress on conservation agriculture, Nairobi, october 2005, 125-135.

Gobat J.M., Aragno M. And Matthey W., 1998. Le Sol vivant. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 519 p.

Harri L., 1994. Manual de identificação e controle de plantas daninhas. Plantarum, Sao Paulo, 220 p.

Heal, O. W., Anderson, J. M. , Swift, M. J., 1997. Plant litter quality and decomposition: an historical review. Dans: Cadisch, G., Giller, K.E. (Eds.), Driven by Nature, Plant Quality and Decomposition, CAB, Wallingford, 3-30.

Paul , E. A., Clark, F. E., 1989. Soil Microbiology and biochemistry. Academic Press (Eds.), San Diego, 275 p.

Sá J.C.M, Cerri C.C., Dick W.A., Lal R., Solismar P. Venzke-Filho P, Marisa C. Piccolo and Feigl B.E., 2001. Organic matter dynamics and sequestration rates for a tillage chronosequence en a brazilian oxisol, 2001. Soil Society Science Agronomy Journal, 65, 1486-1499.

Sá J.C.M, Cerri C.C., Marisa C. Piccolo, Feigl B.E., Buckner J., Fornari A., Marcia F.M., Séguy L., Bouzinac S., Solismar P, Venzke-Filho P , Paulleti V., Marcos S. and Neto S., 2004. O plantio Direto como base do sistema de produção visando o seqüestro de carbono. Revista Plantio Direto. n.84, Novembro-Dezembro, p.45-61, 2004.

Séguy L. and Bouzinac S., 2001. Cropping systems and organic matter dynamics. In World Congress on conservation agriculture, Madrid, 1-5 october 2001, 5 p.

Séguy L. et Bouzinac S., 2006. Rapport annuel d'activités UR1/CIRAD-CA, Montpellier, 163 p.

Shearer, D., Kohl, H., 1986. N₂ fixation in field settings: estimations based on natural ¹⁵N abundance. Australian Journal of Plant Physiology 13, 699-756.

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