

DOSSIER SÉQUESTRATION CARBONE

- ET SI ON AVAIT SOUS-ESTIMÉ LE POTENTIEL DE SÉQUESTRATION POUR LE SEMIS DIRECT?
- QUELLES CONSÉQUENCES POUR LA FERTILITÉ DES SOLS ET LA PRODUCTION?

L. SÉGUY¹, S. BOUZINAC¹, J. C. QUILLET²

1) LES AGROSYSTÈMES = UN RÉSERVOIR ÉNORME POUR LE CARBONE À PRENDRE EN COMPTE³

La quantité de carbone dans les écosystèmes terrestres représente environ 3 fois le carbone atmosphérique ; ce carbone du sol est 700 fois plus important que l'augmentation annuelle en CO₂, et des modifications mêmes faibles de la capacité de séquestration de cet énorme réservoir pourraient avoir des répercussions déterminantes sur l'évolution du taux de CO₂ atmosphérique ; le stockage de C sous forme de biomasse à la surface du sol et sous forme d'humus dans le sol peut ainsi constituer une solution à développer à grande échelle, car efficace et peu coûteuse si elle se fait à partir de systèmes de culture facilement appropriables par les agriculteurs, qui répondent à leurs besoins et exigences technico-économiques.

Parmi les facteurs, aujourd'hui bien connus, qui influent sur le niveau de matière organique (M.O.) du sol, on peut citer :

- l'accumulation est favorisée par : des températures basses, des sols acides, des conditions anaérobies, des tissus végétaux âgés et riches en lignine, l'absence du travail du sol ;
- la minéralisation est au contraire fortement accélérée par : la déforestation, des températures moyennes élevées alliées à une forte humidité, par le travail intensif du sol, des matières organiques à C/N bas, la monoculture de légumineuses.

2) LE POTENTIEL DE SÉQUESTRATION DE C PAR LES AGROSYSTÈMES : DES ESTIMATIONS DISPARATES, VOIRE CONTRADICTOIRES, QUI CACHENT EN RÉALITÉ DES SYSTÈMES DE CULTURE TRÈS DIFFÉRENTS

Si la recherche scientifique est assez largement consensuelle pour ce qui concerne les estimations des pertes en carbone dans les agrosystèmes qui sont soumis à un travail du sol intensif (*par minéralisation de la matière organique, érosion et transports des horizons superficiels, externalités en général*), il n'en va pas de même lorsqu'il s'agit d'estimer le potentiel de séquestration du carbone par l'agriculture de conservation.

Le tableau 1, qui réunit de nombreux résultats issus de travaux reconnus par la communauté scientifique mondiale, montre que les estimations de la capacité de séquestration de C varient énormément, non seulement en fonction des grandes régions climatiques, mais également à l'intérieur de chacune de ces grandes éco-régions, selon le pays. En outre, les chiffres avancés de séquestration annuelle de C les plus élevés sont à l'inverse de ce que laissent prévoir les connaissances sur le fonctionnement du processus de minéralisation-accumulation de C :

- De 0,1 à 0,3 t C.ha⁻¹.an⁻¹ en France⁴ (*hors systèmes intégrant les pâturages améliorés*) à 1,33 t C.ha⁻¹.an⁻¹ aux USA⁵, en zone tempérée, soit un coefficient de multiplication de 4 à 10;

¹ Chercheurs CIRAD-CA programme GEC au Brésil en coopération avec USP/CENA: e-mail = lseguy@zaz.com.br

³ Extraits de la revue TCS, n° 19 – Septembre 2002 – Dossier : séquestration du carbone.

⁴ INRA (France) – 2002.

- **De 0,9 à 1,6 t C.ha⁻¹.an⁻¹** en région subtropicale (Etats du Paraná et du Rio Grande do Sul au Brésil)⁶ ;
- **De 1,8 à 3,0 t C.ha⁻¹.an⁻¹** en région tropicale d'altitude (Hauts plateaux de Madagascar – 1600 m d'altitude)⁷ ;
- **De 0,83 à 3,4 t C.ha⁻¹.an⁻¹** en région tropicale chaude et humide⁵ (Centre Nord du Mato Grosso au Sud de l'Amazonie)

Les régions tropicales et subtropicales où les conditions de minéralisation de la matière organique sont de très loin supérieures⁸ à celles des régions tempérées apparaissent ainsi comme les plus performantes à l'égard de la séquestration annuelle de C.

En réalité, cette contradiction n'est qu'apparente, car ces diverses estimations s'adressent en fait à des systèmes de culture très différents quant à leur nature, leur pratique et leur capacité de production de matière sèche annuelle, soit leur fonctionnement agronomique en général :

- En France et en Europe de manière générale, les estimations portent essentiellement sur des TCS (Techniques Culturelles Simplifiées), et plus marginalement sur du semis direct sans couverture végétale permanente du sol ;
- Aux USA et au Brésil, pays qui sont de très loin les plus avancés sur l'agriculture de conservation⁹ et qui réunissent à eux deux plus de 42 millions d'ha de semis direct, ces estimations sont beaucoup plus élevées car elles sont relatives au semis direct pratiqué sans jamais travailler le sol et utilisent des rotations diversifiées, le plus souvent avec des plantes de couverture en renfort (*intercultures*) ; mais là encore, ce sont les tropiques qui expriment la capacité de séquestration de C la plus élevée, alors que paradoxalement, c'est le lieu où la minéralisation de la M.O. est la plus active⁶.

En fait, le potentiel de séquestration de C exprimé n'a de sens que par rapport à des systèmes de culture qui doivent être très clairement définis ; l'expression "Semis Direct" est utilisée trop souvent pour désigner indistinctement toute une panoplie de techniques de gestion du sol, dont beaucoup font appel à un travail du sol plus ou moins important, ou localisé dans la parcelle, ou dans le temps sur certaines cultures de la rotation, sans préciser toujours le type de rotation utilisée, les quantités et la nature de la phytomasse restituée au dessus du sol et dans le profil cultural ; de plus, les expérimentations de longue durée conduites dans différentes situations de sol, de climat et de rotation de cultures qui incluent des techniques de gestion conservatoire du sol différenciées, sont très peu nombreuses en climat tempéré ; elles évaluent, le plus souvent, du "Semis Direct"¹⁰ sur résidus de récolte ou sur le sol nu, sans le renfort de biomasses d'intercultures qui se sont révélées ces 10 dernières années sous les tropiques comme des outils biologiques multifonctionnels au plan agronomique, extrêmement puissants et incontournables pour améliorer la fertilité et la qualité biologique des sols, et en particulier pour amplifier le potentiel de séquestration de C¹¹.

⁵ Reicosky D. et al. (1995), Lal R. et al. (2000).

⁶ Amado T. J. et al. (1999), Bayer C. et al. (2000), Sá J. C. M. et al. (2000).

⁷ Equipes CIRAD-CA Brésil et Madagascar

⁸ Le taux de décomposition de la matière organique en régions tropicales et subtropicales est de 5 à 10 fois supérieur à celui des régions tempérées (Lal R. et Logan T. J., 1995)

⁹ 19,5 millions d'ha de Semis Direct au Brésil en 2003 (www.febrapdp.org.br) sur 42 millions d'ha de production de grains, soit entre 48 et 49% de la surface plantée ; 23 millions d'ha de Semis Direct aux USA, soit 20% des 114 millions d'ha plantés ; aux USA, l'agriculture de conservation qui inclut les TCS et diverses techniques de travail minimum, compte au total 67,7 millions d'ha, soit 59% de la surface plantée en grains [Hassel J. A., CITC, West Lafayette Indiana USA 2003 (www.ctic.purdue.edu)]

¹⁰ Définition du Semis Direct selon L. Séguy : "Le semis direct sur couvertures végétales est un système conservatoire de gestion des sols et des cultures, dans lequel la semence est placée directement dans le sol qui n'est jamais travaillé. Seul un petit trou ou sillon est ouvert, de profondeur et largeur suffisantes, avec des outils spécialement conçus à cet effet pour garantir une bonne couverture et un bon contact de la semence avec le sol. Aucune préparation du sol n'est effectuée. L'élimination des mauvaises herbes, avant et après le semis est faite avec les herbicides les moins polluants possibles pour le sol qui doit toujours rester couvert."

¹¹ Séguy L. et al. (2001-2003).

Cet ensemble d'imprécisions, de lacunes et aussi de pauvreté agronomique pour ce qui concerne la diversité et la capacité agronomique des systèmes de culture mis en comparaison sur de longues périodes et dans les mêmes conditions pédoclimatiques, limite à la fois la compréhension et l'interprétation des capacités potentielles et à fortiori réelles de séquestration de C par les agrosystèmes de la zone tempérée.

3) LE CAS TROPICAL : un modèle et un révélateur précieux pour comprendre, évaluer la dynamique du carbone et construire des systèmes de culture performants pour cette fonction [Figures 2 à 75 – Résultats Brésil].

Pour bâtir une agriculture durable en zone tropicale humide brésilienne [Fig. 2], sous climat particulièrement agressif où les sols, vides chimiquement, sont très sensibles à l'érosion et où les conditions de minéralisation de la matière organique sont les plus élevées sur la planète, le CIRAD¹² a dû faire appel à de nouveaux concepts de gestion de la matière organique (M.O.), inspirés directement du fonctionnement stable de l'écosystème forestier ; dans leur mise en oeuvre et leur perfectionnement continu depuis bientôt 20 ans, les sols, comme sous la forêt, doivent être totalement maintenus couverts, protégés par une phytomasse végétale de plus en plus performante, et ne sont jamais travaillés¹³.

Les caractéristiques du fonctionnement de l'écosystème forestier qui ont été adaptées aux agrosystèmes, sont essentiellement [Fig. 5] :

- Laisser le sol toujours protégé sous une couverture végétale permanente (*milieu tamponné, biologiquement très actif*) ;
- La capacité d'une productivité primaire très importante de phytomasse, même sur sol très pauvre chimiquement et très acide ;
- La capacité à retenir la majeure partie du stock des éléments nutritifs non pas dans le sol mais dans la phytomasse (*minimiser les pertes en nutriments, fermer le cycle du système Sol-Plante*) ;
- La formation d'un horizon de surface 0-5 cm, protégé, siège d'une activité biologique intense, qui, comme sous la forêt, assure l'essentiel du prélèvement des éléments nutritifs par les racines des cultures, les micorhizes et la biomasse microbienne¹⁴ ; Faire en sorte que ce recyclage biologique affecte comme sous la forêt, non seulement les éléments nutritifs tels que Ca, Mg et K dont le sol est quasiment dépourvu, mais aussi les minéraux tels que Si et Al qui jouent un rôle déterminant dans l'évolution de la composition minérale du sol¹⁵.

En réalité, dans la pratique, il s'agissait de recréer à partir d'un état de dégradation avancée [Fig. 3 et 4], une dynamique de transformations fondamentales sur et dans le sol sous culture, qui le ramène progressivement à ses modes de fonctionnement originels sous forêt (*résilience*), tout en construisant une agriculture plus productive et rentable, diversifiée, facilement appropriable, durable et propre.

¹² Equipe CIRAD L. Séguy, S. Bouzinac et ses partenaires brésiliens de la recherche et du développement, en coopération permanente avec les agriculteurs (*dont le pionnier, Mr Munefume Matsubara*), le CNPAF, Centre de Recherche Fédéral sur le riz et le haricot de l'EMBRAPA, l'EMPAER-MT, Centre de Recherche de l'état du Mato Grosso entre 1986 et 1989 ; puis en partenariat avec RHODIA (filiale Brésil de Rhône Poulenc) et la coopérative COOPERLUCAS de Lucas do Rio Verde de 1990 à 1995, et plus récemment avec la Préfecture de SINOP, puis le groupe MAEDA, la COODETEC, la FONDATION RIO VERDE et l'entreprise privée de recherche AGRONORTE entre 1995 et 2002

¹³ Séguy L. et al. 1996, 1998, 2001-2003.

¹⁴ Stark N. M. , Jordan C.F., 1978.

¹⁵ Lucas Y. et al. , 1993.

SÉQUESTRATION DU CARBONE

Extraits de diverses études scientifiques

ZONE CLIMATIQUE	SYSTÈME DE CULTURE	BILAN DE C EN t C.ha ⁻¹ .an ⁻¹	
		PERTES	GAINS
TEMPÉRÉE			
USA¹	Labour x monoculture blé ou maïs	<i>-0,105 à -0,460</i>	
	Labour x Rotations avec plante couverture	<i>-0,033 à -0,065</i>	
	Semis Direct x monoculture blé ou maïs		+0,33 à +0,585
	Semis Direct x Rotations avec plante couverture (SCV)		+0,66 à +1,30
	Allemagne²	Agriculture “intégrée”	
Angleterre	Semis Direct		+0,18 à +0,60
France³	TCS (Techniques Culturelles Simplifiées)		+0,10 à +0,30
SUBTROPICALE			
Sud Brésil⁴	Semis Direct sur couverture végétale permanente (SCV)		+0,99 à +1,60
TROPICALE (5 premières années)			
Cerrados Brésil⁵	Semis Direct sur couverture végétale permanente (SCV)		+2,18
	ZTH⁶: Brésil, Gabon Madagascar	Conventionnel disques (sol plat) Conventionnel disques (sol en pente)	<i>-0,33 à -0,44</i> <i>-1,00 à 1,40</i>
	Semis Direct (SCV) intégrant ou non l'élevage		+0,83 à +3,46
Zone Tropicale d'altitude (Madagascar)	Labour x monoculture maïs, soja haricot	<i>-1,00 à -1,40</i>	
	Semis Direct sur couverture végétale permanente diversifiée (SCV)		+1,80 à 3,00

¹ Reicosky D. et al. (1995), Lal R. et al. (1997).

² Smith et al. (1998).

³ INRA – France (2002).

⁴ Amado T. J. et al (1999); Bayer C. et al. (2000); Sá J. C. M. et al. (2000).

⁵ Corraza E. J. (1999) Cerrados = savanes.

⁶ Equipe CIRAD-CA /Gec Brésil, Madagascar et Asie.

Diverses étapes ont été nécessaires pour réaliser cette reconversion opérationnelle comme le montrent les figures 7 et 8 ; elle a été bâtie progressivement par l'insertion dans les systèmes de culture, de biomasses de renfort, renouvelables, pratiquées en interculture (*avant ou après les cultures ou en association avec elles*), appelées "pompes biologiques" en raison de leur analogie de comportement avec la phytomasse forestière pour ce qui concerne leur multifonctionnalité [*Fig. 6 et 9*].

Au-delà de leur multifonctionnalité agronomique, les pompes biologiques doivent également répondre à des critères technico-économiques qui facilitent leur adoption et leur reproduction au moindre coût et à grande échelle, chez les agriculteurs :

- simplicité d'utilisation : semis, maîtrise technique dans les systèmes, récolte ;
- forte valeur ajoutée : production additionnelle en saison sèche de fourrages, pâture, grains pour les animaux mais aussi capables d'intégrer l'alimentation humaine (*complément à la farine de blé, fabrication de bière, alcool, etc...*) ;

• **Comment se placent ces « pompes biologiques de renfort » dans les systèmes de culture¹⁶ ? :**

Au début des pluies, où elles sont desséchées avant reproduction pour faire le lit de paille des cultures commerciales, ou après ces dernières en fin de saison des pluies où elles sont alors récoltées et doivent offrir une valeur ajoutée attractive pour les producteurs. Leur choix se fait en fonction de leur capacité à exploiter l'eau disponible en surface au début des pluies, et en profondeur en fin de saison des pluies, le plus souvent en conditions de pluviométrie très aléatoire. L'objectif essentiel est toujours de produire un maximum de biomasse aussi bien en début qu'en fin des pluies et qu'en saison sèche ; dans ce dernier cas, pour mieux exploiter l'eau profonde du sol, à l'image de la forêt, on associe 2 « pompes biologiques » très fortes pourvoyeuses de biomasse = l'une est une graminée commerciale (*séquence de semis échelonnée en fonction de l'eau disponible = maïs, puis sorgho, puis mil*), l'autre une espèce fourragère pérenne à enracinement très profond qui continue à produire de la phytomasse durant toute la saison sèche (*genres Brachiarias, Stylosanthes, Cajanus*), et qui peut être pâturée, donc génératrice de revenus supplémentaires. En cas de feu accidentel, ces espèces pérennes repoussent immédiatement et recolonisent totalement la surface du sol [*Fig. 15 et 16*].

Les « pompes biologiques » peuvent aussi être des espèces pérennes à stolons et rhizomes (*exemples = genres Arachis, Stylosanthes, Pueraria chez les légumineuses ; genres Cynodon, Paspalum, Stenotaphrum, Pennisetum chez les graminées*), qui constituent des couvertures vivantes pérennes à vocation fourragère : maintenues à l'état de vie ralentie, donc non-concurrentielles sous les cultures commerciales grâce à l'utilisation d'herbicides non polluants, elles reprennent leur plein développement végétatif après la récolte de ces dernières et peuvent être pâturées en saison sèche ; toutes les espèces pérennes qui servent de couvertures vivantes, sont exclusives des adventices annuelles, ce qui simplifie la tâche de l'agriculteur qui n'a plus que la couverture vivante et la culture commerciale à gérer dans son système de culture¹⁴ [*Fig. 20 et 21*].

Les « pompes biologiques » associées qui sont fonctionnelles en fin de cycle des pluies et en saison sèche ainsi que les couvertures vivantes pérennes, lorsqu'elles sont bien gérées dans les systèmes de culture, permettent de produire une très importante phytomasse et ceci toute l'année. C'est au cours de la saison sèche, où la minéralisation de la M.O. est minimum, que la forte production de biomasse au-dessus du sol et dans le profil cultural en surface et en profondeur (*grâce à l'utilisation de la réserve d'eau profonde*) permet d'accumuler un maximum de carbone en surface et en profondeur et d'exercer un puissant recyclage des bases et nitrates lessivés [*Fig. 75*].

Les « pompes biologiques » peuvent être implantées dans les systèmes de culture, soit sous couvert à la volée, soit en Semis Direct, en culture pure ou en mélange en fonction des objectifs recherchés.

¹⁶ Séguy L., et al. 1996, 1998, 2001 et 2003.

L'application de ces principes fondamentaux de gestion des sols en Semis Direct sur Couverture Végétale permanente (SCV) à la Zone Tropicale Humide (ZTH) sur le domaine des sols ferrallitiques, dans le Centre Nord de l'état du Mato Grosso (*Sud de l'Amazonie*), montre comment s'est faite la reconversion "sol dégradé à sol reconstruit sous ambiance forestière" [Fig. 10]. La production de phytomasse sèche est passée de 6 - 8 t/ha en monoculture de soja sur sol travaillé en 1986, à 18 - 22 t/ha en SCV à 2 cultures annuelles en succession en 1992, puis à 26 - 32 t/ha en SCV à 3 cultures en 2001, où la production est continue toute l'année grâce à l'optimisation de l'utilisation des espèces cultivées dans les SCV et d'une réserve hydrique bien supérieure, à l'image de la forêt. La comparaison de l'écosystème forestier et des SCV les plus performants à partir d'indicateurs agronomiques pertinents, tels que : M.O., biomasse annuelle de litière et sa vitesse de décomposition, biomasse racinaire et utilisation de l'eau, montre que, excepté le critère biodiversité, le fonctionnement du modèle forestier et des SCV les plus performants est très comparable [Fig. 14 et 15]. La séquestration annuelle de carbone va de 0,8 MgC.ha⁻¹ à 1,6 MgC.ha⁻¹ dans l'horizon 0-10 cm, en fonction de la nature des SCV pratiqués ; la séquestration intéresse également l'horizon 10-20 cm lorsque les pompes biologiques les plus puissantes sont utilisées (*Eleusine coracana*, *Brachiaria b.*, *Panicum max.*, *Cynodon dact. Tifton 85*) [Fig. 45, 46 et 47].

La séquestration annuelle de carbone dépasse ainsi très largement 2,5 Mg C.ha⁻¹ sur les 5 premières années dans l'horizon 0-20 cm; la quantité de C fixée devient plus importante dans l'horizon 10-20 cm et intéresse également les horizons les plus profonds du sol (*hors d'atteinte des actions humaines*) avec le genre *Brachiaria* associé au sorgho (*forte teneur en lignine, C/N élevé*) qui peut produire beaucoup de biomasse en saison sèche¹⁷ (*au dessus du sol et dans le profil cultural*) en puisant dans l'eau profonde du sol, entre 2 m et 3 m de profondeur [Fig. 46].

En 5 ans, avec les systèmes les plus forts pourvoyeurs en phytomasse toute l'année, le profil cultural retrouve le taux de matière organique originel sous forêt et sous savane, et des propriétés physiques très voisines de celles des écosystèmes naturels¹⁵ (*résilience*) [Fig. 48, 49 et 50].

Les systèmes racinaires, qui jouent un rôle central dans l'accumulation de C, les plus résistants à la minéralisation sont ceux qui sont entourés de manchons importants de micro agrégats qui protègent la M.O. (*polysaccharides, endomycorhizes vésiculo - arbusculaires, polyphénols*), tels qu'en possèdent l'espèce *Eleusine coracana*, cultivée pure ou en association avec des légumineuses pivotantes (*Cajanus cajan*), ou le genre *Brachiaria* associé aux pompes biologiques recycleuses telles que mil et sorgho, *Cajanus cajan* [Fig. 54].

L'augmentation de la M.O. en surface accroît la résistance des micro agrégats et la protection des M.O.; ces M.O. augmentent la stabilité des agrégats où elles se trouvent, et les agrégats plus stables, à leur tour, protègent les M.O. qui y sont incorporées, établissant ainsi des relations réciproques entre dynamique de la M.O. et stabilité de l'agrégation (*autorégulation, autoprotection*).

4) LE TRANSFERT SUD-SUD DES SCV : de la grande agriculture mécanisée brésilienne aux agricultures familiales de Madagascar [Fig. 1 à 14 – Résultats Madagascar]

L'application des mêmes principes agronomiques de construction des SCV aux petites agricultures manuelles¹⁸ et à traction animale des hauts plateaux malgaches met en évidence un potentiel de séquestration de C très élevé, entre 1,8 et 3,0 Mg C.ha⁻¹ sur 5 ans, avec des systèmes continus associant maïs sur légumineuses comme couverture vive (*genres Arachis, Desmodium, Trifolium*), ou soja sur couverture vivante très puissante de graminée pérenne (*genre Pennisetum*), ou encore la rotation riz pluvial/ avoine + haricot [Fig. 1, 12 et 13].

¹⁷ Séguy L., et al. 1996, 1998, 2001 et 2003.

¹⁸ Les SCV sont également mis au point sur ces principes, dans la zone sahélienne à faible pluviométrie aléatoire de l'Ouest malgache (*régions de Tuléar, Morondava*) et dans la zone tropicale humide de la Côte Est (*Manakara, Manandjara*). Les résultats sont en cours d'analyse; leur publication est prévue en 2004.

La capacité de séquestration de C peut encore être augmentée dans cette éco-région tropicale d'altitude, en associant aux cultures de saison chaude des pluies, des espèces fourragères tempérées, bien adaptées aux températures très fraîches de la saison sèche (*genres Ray-grass, associé ou non à la Vesce velue*) qui pourront produire une importante biomasse additionnelle aussi bien en surface que dans le profil cultural, en se connectant à la réserve d'eau plus profonde du sol.

5) LE TRANSFERT SUD-NORD DES SCV : de l'agriculture brésilienne sans subsides à l'agriculture productiviste française fortement subventionnée [Fig 1 à 12 – Résultats France]

Depuis une dizaine d'années, de nombreux agriculteurs français viennent au Brésil s'instruire sur le semis direct sur couverture végétale permanente et l'adaptent progressivement à l'agriculture française (Touraine, Bretagne, Allier, Sud-Est) [Fig. 1].

L'expérience très réussie de J. C. et A. Quillet en Touraine, sur des sols argileux et limono-argileux de la vallée du Cher et sur les sommets très sableux (entre 2 et 4% d'argile), réservés traditionnellement à la vigne, montre que, après 5 à 6 ans de SCV avec des rotations exclusives de graminées : succession annuelle "couverture d'avoine" en automne-hiver suivie de maïs irrigué de printemps-été, en rotation avec blé l'année suivante, la séquestration de C varie de 2,5 à 2,8 t.ha⁻¹.an⁻¹ dans l'horizon 0-25 cm [Fig. 3].

Ces estimations sous SCV, qui correspondent à un potentiel de séquestration de C, 8 à 25 fois plus élevé que celui présenté par l'INRA pour l'agriculture de conservation (0,1 à 0,3 t C.ha⁻¹.an⁻¹, hors systèmes fourragers), sont en bonne concordance et cohérence avec les estimations faites sous les tropiques pour les SCV ; en effet, les restitutions totales de biomasse sèche dans la rotation sur 2 ans : Blé/avoine de couvert d'hiver + maïs irrigué, sont très importantes et estimées entre 15 et 21 t/ha/an, dans un climat frais dominant, où la minéralisation annuelle moyenne de la matière organique (M.O.) peut être estimée sous SCV et en présence de calcaire actif, entre 1,0 et 1,5% ; ce coefficient appliqué au taux actuel d'humus de 3,3% sur 25 cm d'épaisseur, donne une consommation de M.O. annuelle comprise entre 0,91 et 1,36 t.ha⁻¹.an⁻¹ ; côté restitutions, si on leur applique un coefficient d'humification de 25%, on obtient une production d'humus qui va 3,75 à 5,25 t.ha⁻¹.an⁻¹ ; le bilan positif annuel de M.O. s'établit ainsi entre 2,4 et 4,4 t.ha⁻¹.an⁻¹ de M.O., soit 1,4 à 2,6 t C.ha⁻¹.an⁻¹ en conformité avec les mesures effectuées.

Ce fort potentiel de séquestration de C sous SCV en climat tempéré s'accompagne du développement concomitant d'une activité biologique intense et soutenue, qui stimule les fonctions agronomiques du profil cultural, comme le montrent les résultats de C. et L. Bourguignon¹⁹ obtenus sous SCV et labour, dans les mêmes conditions pédoclimatiques [Fig. 5 et 6].

Cette capacité de séquestration annuelle de C peut être encore accrue, si l'on incorpore au système SCV actuel une culture de couverture d'été, en succession du blé, qui soit susceptible de produire une importante phytomasse additionnelle à un moment où la minéralisation de la M.O. est minimum, et de recycler les nitrates, les sulfates et les bases qui ont pu être lixiviés en hiver et au printemps (*Fermeture du système Sol-Cultures pour éviter les pertes en nutriments*) [Fig. 1].

6) SPÉCIFICITÉS DES SCV ET MULTIFONCTIONNALITÉ AGRONOMIQUE : un potentiel considérable à exploiter pour l'avenir de l'agriculture mondiale [Fig. 48 à 53 et Fig. 70 à 74 – Résultats Brésil].

Au plan de la multifonctionnalité, le cas tropical¹⁸ a montré que les facteurs **quantité et qualité de biomasse, donc la nature des SCV**, commande les fonctions agronomiques essentielles, la

¹⁹ Résultats non encore publiés ; Laboratoire LAMS (Laboratoire d'Analyses microbiologiques des Sols) – Marey sur Tille France . E-mail : lams21@club-internet.fr .

dynamique de leurs relations avec les cultures et leur capacité à transformer les propriétés physico-chimiques et biologiques du profil cultural :

- L'évolution de la capacité d'échange cationique (CEC) suit strictement celle du carbone : les SCV les plus performants créent un pouvoir de rétention des éléments nutritifs qui limite leur lixiviation ;
- Ce sont ces mêmes SCV, connectés à l'eau profonde du sol²⁰ en saison sèche (*au-delà de 2 m de profondeur*), qui possèdent les plus puissants systèmes recycleurs = sorgho et mil associés à *Brachiaria ruziziensis*, *Stylosanthes guyanensis*, l'*Eleusine coracana* en culture pure ou associée à *Cajanus cajan*, ce dernier associé à *Brachiaria ruz.*, et enfin les espèces fourragères *Brachiaria brizantha*, *Panicum maximum* implantées pour 3, 4 ou 5 ans en rotation avec les meilleurs SCV ; toutes ces biomasses sont des «pompes à cations et nitrates» qui exercent leur fonction recycleuse au-delà de 2 m de profondeur (*les nombreux profils culturaux, réalisés pendant 15 ans, ont montré des densités racinaires très élevées sous ces espèces et associations, jusqu'à plus de 3 m de profondeur*).
- Les remontées très significatives dans l'horizon 0-10 cm du taux de saturation en bases, mesuré sous ces «pompes biologiques», sont très démonstratives à cet égard [Fig. 48, 49, 50]. Si toutes recyclent des bases, les légumineuses du genre *Stylosanthes g.* et *Arachis p.*, lorsqu'elles occupent une place importante dans la rotation des SCV recyclent très fortement le potassium et les oligo-éléments Mn, Cu, Zn [Fig. 51 et 53].
- Les SCV, en fonction de leur nature, exercent donc bien des actions sélectives sur la dynamique des éléments²¹. Ces résultats peuvent conduire à proposer aux agriculteurs des règles de décision pour le choix et la conduite des SCV.
- La rotation des meilleurs SCV permet, non seulement d'injecter du carbone en profondeur, mais aussi d'exercer un pouvoir restructurant très efficace dans l'horizon 0-20 cm : après 5 ans, l'indice MWD caractérisant l'état structural montre des valeurs proches de celles existantes sous les milieux naturels de forêts et savanes, comprises entre 4 et 5 [Fig. 52].

•Spécificité des SCV¹⁸ tropicaux = des réponses simples, naturelles, et de moindre coût pour résoudre les nuisances majeures à la production

Le semis direct sur couverture végétale permanente fonctionne, comme l'écosystème forestier, en circuit fermé, sans perte notable de nutriments et neutralise efficacement les effets nocifs de l'acidité (Al) sur les cultures sensibles (*soja, maïs, coton*), permettant ainsi d'économiser grande partie des amendements calco-magnésiens (*exemple de la succession annuelle soja + maïs associé à Brachiaria ruz.chez V. Taffarel*) [Fig. 70].

La couverture de sorgho guinea contrôle parfaitement la peste végétale *Cyperus rotundus* sur sols ferrallitiques sur basalte, désintoxique efficacement ces mêmes sols pollués par la molécule Sulfentrazone (*phytorémediation*)²² [Fig. 71, 72 et 73].

La pression parasitaire (*maladies cryptogamiques, nématodes, complexe bactériose-nématodes*) diminue très significativement dans les SCV diversifiés (*riz pluvial, coton, soja*) et l'état sanitaire des cultures est nettement amélioré²³ [Fig. 74].

Les champignons du genre *Nomurea* et le virus *Anticarsia* se développent avec les SCV et constituent des auxiliaires précieux pour le contrôle biologique des chenilles défoliatrices ; les bousiers, les termites et les fourmis contribuent au maintien d'une forte macroporosité.

Par le choix judicieux des biomasses de couverture dans les SCV, il est maintenant possible, après dessiccation mécanique ou chimique des biomasses qui précèdent le semis direct, de supprimer

²⁰ Dans le cas des sols peu profonds, ces mêmes SCV, en améliorant à la fois la teneur en M.O. et l'efficacité de l'eau (*système de porosité allié au rôle d'écran de la biomasse en surface*), conduisent également à une séquestration accrue de C et à l'augmentation de la CEC.

²¹ Miyazawa M. , Pavan M. A., Franchini J. C. ; 2000.

²² Séguy L. et al. , 1999, 2000 et 2001.

²³ Séguy L. et al. , 1999.

totale des herbicides dans les cultures ; cette voie agronomique de contrôle naturel des adventices par le choix des couvertures, constitue une alternative aux OGM, très importante et écologique.

- **EN CLIMAT TEMPÉRÉ, dans les sols de Touraine** comme dans les sols tropicaux, la CEC augmente dans les SCV en même temps que la matière organique [Fig. 4 et 7 – Résultats France]:
 - En 5 à 6 ans de SCV, la CEC des sols a progressé de 34% pour les sols argileux et de 24% pour les sols limono-argileux ;
 - Sur les sols très sableux, après 8 ans de gestion différenciée, la CEC est de 4,1 meq/100 g sous SCV contre 2,6 meq/100 g sous labour continu, soit une différence de 58% en faveur des SCV (*la couleur du sol a également changé en surface : de blanc sur labour, elle est devenue gris très foncé sur SCV*) [Fig. 4].

De même, on observe, comme sur les sols tropicaux, un effet très efficace des SCV dans les sols argileux sur la contention des reliquats azotés dans les horizons de surface (*effets recycleur et de rétention des nutriments par la M.O. de surface*) ; dans les sols limono-argileux, la migration des nitrates vers la profondeur existe certes, mais en quantité très modérée [Fig. 5] ; ces résultats²⁰ sont fondamentaux, car ils montrent la possibilité d'interrompre le processus désastreux de pollution des nappes phréatiques par les nitrates ; la « bataille de l'eau » est en effet la plus urgente à résoudre dans les pays fortement industrialisés du Nord, qui justifie, à elle seule, l'utilisation des SCV dans les agrosystèmes tempérés.

7) IMPACTS DES SCV SUR LES PERSPECTIVES DE PRODUCTION = Productivités et marges en hausse et plus stables, niveaux d'intrants chimiques et coûts de production en baisse, regain de biodiversité.

7.1 SUR LES SOLS FERRALLITIQUES TROPICAUX, TRES PAUVRES CHIMIQUEMENT DE LA ZTH AU BRESIL : des rendements triplés en 15 ans pour le soja et le riz pluvial, et des rendements records pour le coton, nouvelle culture de la ZTH [Fig. 22 à 33 – Résultats Brésil]

- **La productivité du soja**, principale culture de la région Centre-Nord du Mato Grosso, est passée de 1.700- 2.000 kg/ha en 1986 à plus de 4.500 kg/ha à partir de l'année 2000 (*Productivité parmi la plus élevée du monde en culture pluviale*) [Fig. 22].

Au cours de ces 5 dernières années où le niveau de maîtrise des SCV est devenu très performant (*accumulation du savoir, affinage des pratiques : état de l'art*), les résultats de recherche du CIRAD montrent que les rendements de soja sont étroitement corrélés à la quantité et à la qualité de la biomasse de graminées qui sert de couverture morte ou vivante (*couverture morte : maïs, sorgho, mil associés à Brachiaria ruz., Eleusine cor. ; couverture vivante : Cynodon d..*) [Fig. 23 et 24].

En présence d'un très faible niveau de fumure minérale de 40 P2O5 + 40 K2O/ha, qui met en évidence la capacité du sol à produire par voie organo-biologique, les gains de productivités des meilleurs SCV par rapport au système « monoculture x discages » s'accroissent tous les ans, quel que soit le cycle de la variété utilisée = de 12-15% en 1^o année à 45-52% en 5^o année ; le gain moyen annuel de rendement en faveur des SCV, sur 5 ans, est de plus de 700 kg/ha [Fig. 25 à 28].

Sur ce très faible niveau de fumure, dès la 3^o année, les productivités de soja sur les meilleurs SCV vont de 3.100 kg/ha pour les cycles courts à plus de 3.500 kg/ha pour les cycles moyens. Quel que soit le cycle du soja, le rendement moyen sur 5 ans du soja est plus élevé sur les meilleurs SCV avec fumure faible (40 P2O5 + 40 K2O/ha) que sur le système « monoculture x discages » avec fumure double (80 P2O5 + 80 K2O/ha), et voisine de celle obtenue sur ce même système travaillé avec fumure non limitante (160 P2O5 + 110 K2O/ha) [Fig. 25 et 26].

Avec la fumure moyenne (80 P2O5 + 80 K2O/ha), la plus utilisée dans la région, les cultivars de soja de cycle moyen, à fort potentiel, expriment une productivité croissante avec le temps sur les meilleurs SCV, qui produisent, sur 5 ans, de 16 à 40% de plus que sur le système travaillé en monoculture ; leur

rendement dépasse 4.300 kg/ha dès la 3^e année de culture sur SCV ; les variétés de cycle court, de plus faible potentiel, offrent un gain annuel moyen de rendement sur SCV plus limité, de 516 kg/ha contre 934 kg/ha pour les cultivars de cycle moyen [Fig. 25 et 26].

Ces résultats font la preuve de la capacité croissante de production du sol par voie organo-biologique sous SCV, qui permet de produire plus et avec beaucoup moins d'engrais minéral, et montrent que le choix des meilleurs cultivars doit se faire pour et dans les meilleurs SCV (*justification des recherches sur l'optimisation des relations « géotypes x modes de gestion du milieu*).

- **La productivité du riz pluvial**²⁴ est passé dans la région de 1.800-2.000 kg/ha en 1986 à plus de 8.000 kg/ha en 2000 (*avec record à 8.500 kg/ha en grande culture à Campo Novo dos Parecis en 1998/99*), accompagné d'une véritable révolution sur la qualité du grain, qui est aujourd'hui égale, voire supérieure à celle des meilleures variétés irriguées [Fig. 29 et 30].

Comme pour la culture de soja, les gains de rendements en faveur des meilleurs SCV, sur 5 ans, vont de 23 à plus de 43% ; la productivité du riz est étroitement corrélée à la quantité et à la qualité de la biomasse produite à partir d'associations entre des graminées qui ont les systèmes racinaires restructurants les plus puissants (*Eleusine coracana ; maïs ou sorgho ou mil associés à Brachiaria ruziziensis*), et des légumineuses à enracinement profond, fixatrices d'azote (*Crotalaria sp., Cajanus cajan, Stylosanthes guyanensis*) [Fig. 38].

La création de variétés et d'hybrides riz pluvial s'est faite pour et dans les meilleurs SCV²⁵ ; ce matériel génétique, très diversifié au plan commercial (*des riz longs à très longs fins, aromatiques, à teneurs variables en amylose*), montre un potentiel de production voisin de 9.000 kg/ha dans les SCV pluviaux (*rendements records*) et très largement supérieur à 10.000 kg/ha en conditions irriguées. Leurs aptitudes pluviales, adaptées à des déficits hydriques et leur résistance stable aux maladies leur confèrent une place d'élection aussi bien dans les SCV pluviaux de la ZTH qu'en conditions irriguées par aspersion en régions peu ou pas pluvieuses, et que dans les bas-fonds et périmètres rizicoles à mauvaise maîtrise de l'eau (*aménagements dégradés*).

- **La culture cotonnière**²⁶ est la nouvelle grande culture des Cerrados de la ZTH :

Le Mato grosso est devenu le premier producteur du Brésil²⁷ en 3 ans (1998 – 2001), avec une production de plume supérieure à 300.000 tonnes en 2001, et atteint des records de productivité.

Les résultats de recherche du CIRAD les plus récents sur la gestion optimisée des sols et des cultures en SCV montrent que la productivité cotonnière peut être durable si, à la fois : un véritable semis direct est pratiqué (*contrôle chimique des repousses, semis direct des biomasses de couverture : sol jamais travaillé*), et maintenu dans le cadre de rotations diversifiées, très fortes pourvoyeuses de biomasse (*dessus et dans le sol*), où la culture cotonnière s'insère un an sur deux ou sur trois (*successions annuelles soja + maïs ou sorgho ou mil associés à Brachiaria ruz.; soja + Eleusine cor.*). Cette gestion en SCV diversifiés, permet d'utiliser des niveaux d'intrants chimiques plus faibles (*amendements, engrais, pesticides*) et de maintenir des rendements de coton graine élevés, entre 3.500 et 5.000 kg/ha [Fig. 31 à 33].

Le choix des cultivars doit se faire en fonction de la qualité biologique des sols : variétés rustiques (*telles IAC 23 et 24*) sur forte pression biologique négative (*monoculture*) , cultivars plus sophistiqués à haut potentiel et meilleure qualité de fibre dans le cadre des SCV diversifiés (*FIBERMAX 966, COODETEC 406 et 407, SURE GROW 821*) [Fig. 33].

. **Au total, en 15 ans, dans le cadre des recherches sur les SCV pratiqués en grande culture, la productivité totale par hectare des systèmes de culture qui se sont graduellement diversifiés, a**

²⁴ Le CIRAD a été le pionnier du riz pluvial à haut potentiel et à qualité de grain supérieure dans la région Centre-Ouest du Mato Grosso : la variété IRAT 216 occupait 20.000 ha recensés en 1991, le cultivar Progresso ensuite, puis la variété CIRAD 141 qui a couvert 300.000 ha en 1998/99, et enfin le cultivar Sucupira sur quelques dizaines de milliers d'ha à partir de 2001/02.

²⁵ En coopération avec l'entreprise privée de recherche AGRONORTE, basée à Sinop (1998/2002)

²⁶ Le CIRAD a été le pionnier du semis direct de coton en partenariat avec le groupe MAEDA à partir de 1994/95, dans l'écologie des forêts tropicales du Sud de l'état de Goiás et du Nord de l'état de São Paulo, sur des sols ferrallitiques sur basalte, à fortes potentialités (*L. Séguy et al. 1998, 2000*)

²⁷ Grâce aux efforts conjugués de : UNICOTTON, COODETEC, FUNDAÇÃO MT, MDM, EMBRAPA, MAEDA, CIRAD (en partenariat avec MAEDA et COODETEC)

considérablement avancé grâce aussi aux cultures de succession annuelles telles le maïs, le mil, le sorgho et l'*Eleusine* qui produisent entre 2.000 et 4.000 kg/ha, et le coton dont les rendements vont de 2.250 à plus de 3.000 kg/ha ; ces cultures de succession, appelées "safrinhas", et qui sont les « pompes biologiques » de sustentation des SCV, sont pratiquées avec un minimum d'intrants ou sans intrants et peuvent être suivies d'embouche en saison sèche lorsque des cultures fourragères leurs sont associées (*cas du maïs, sorgho et mil*). Hormis le coton, si la valeur commerciale de ces cultures de succession est encore très sous-exploitée dans la région, elles peuvent toutefois servir à l'alimentation des animaux (bovins, porcs) en saison sèche et être converties avec profit en production de viande ou de lait. Les meilleurs systèmes de culture en semis direct permettent ainsi de produire aujourd'hui sur une année = 4.500 kg/ha de soja ou plus de 6.000 kg/ha de riz, suivis de 2.000 à 4.500 kg/ha de maïs ou sorgho ou mil ou Eleusine cor. et de 65 à 90 kg/ha de viande en saison sèche, ou encore 2.500 à 4.500 kg/ha de coton en rotation avec les systèmes précédents de production de grains + pâturage .

• **Conséquences économiques = le roi soja, le riz du pauvre et le coton fragile ; faire coïncider optimums agronomique et technico-économique [Fig. 36 à 43 – Résultats France].**

. La région de fronts pionniers du Centre-Nord Mato Grosso a connu depuis le tout début de son ouverture, au début des années 1980, une situation économique très chaotique, qui a subi de plein fouet les restructurations économiques du pays. Loin des grands centres de transformation, des ports d'exportation (*plus de 1.500 km*), la région ne dispose que d'une seule route, le plus souvent en état précaire, qui grève les coûts de transport. Cet isolement se traduit par une pénalisation économique qui va de 25 à 40% de surcoûts de production par rapport à ceux des grands états producteurs du Sud du pays.

Ce sont ces contraintes économiques qui expliquent l'adoption exponentielle du Semis Direct à partir de 1995 dans la région où l'activité agricole sans subventions a dû, pour se maintenir, produire plus et le moins cher possible. Actuellement, plus de 80% des surfaces sont en Semis Direct, mais pratiquent, pour la majorité un système dominant : soja + culture de succession maïs ou mil ou sorgho et plus récemment, à partir de 1998, la culture de coton.

.Dans un tel contexte de très faible diversification, les systèmes de culture récents créés par la recherche CIRAD-AGRONORTE-CODETEC, qui rendent possible l'intégration de toutes les cultures en SD avec l'élevage, sont ceux qui offrent les coûts de production les plus bas et les marges brutes les plus élevées et ceux qui doivent être le plus rapidement diffusés. Au-delà des bénéfices attractifs et de la stabilité qu'ils procurent, ils permettent de s'affranchir davantage de la politique agricole régionale très chaotique. Les performances économiques de ces systèmes de culture conduisent à construire des assolements plus stables et de moindre risque économique. En fonction du niveau de risque choisi par l'agriculteur, les coûts de production peuvent varier de 250 à 600 U.S.\$/ha avec des SCV à base de riz, soja, maïs + cultures de succession suivies d'embouche en saison sèche ou pratiquées sur couvertures vivantes et de 500 à plus de 1.300 U.S.\$/ha avec la culture cotonnière de haute technologie [Fig. 36 à 39].

Les marges nettes par ha peuvent aller, malgré la pénalisation économique, en fonction des choix retenus et des conditions économiques annuelles, de 100 à plus de 600 U.S.\$/ha.

Les charges de mécanisation ont pu être réduites de manière draconienne avec l'adoption du Semis Direct : le parc de tracteurs et de semoirs peut être divisé par 2 à 3, de même que la consommation de carburant.

Les possibilités d'amélioration des performances agronomiques et technico-économiques des systèmes de culture par les SCV sont parfaitement illustrées par les résultats obtenus par notre partenaire, le **groupe MAEDA**, 1^o producteur privé de coton du Brésil, qui a effectué en 8 ans une conversion totale de ses modes de gestion des sols et des cultures : partant de technique de travail du sol et monoculture dominante en 1994/95, il a progressivement intégré les techniques de semis direct sur couverture végétale permanente pratiquées en rotations ; elles régissent maintenant toutes ses surfaces cultivées :

- En 8 ans, la surface totale plantée est passée de 32.484 ha en 1994/95 à 47.464 ha en 2003, soit 46% d'augmentation ; la culture de soja qui était marginale, confinée aux sols les plus pauvres et pratiquée en monoculture en 1994/95, a été intégrée en semis direct avec le

- coton et sa surface a été multipliée par plus de quatre ; le coton n'est plus cultivé qu'un an sur trois [Fig. 41].
- La productivité des cultures a très fortement augmenté [Fig. 41] :
 - +26% pour le soja, de 2.598 à 3.264 kg/ha en moyenne sur les 3 dernières années,
 - +45% pour le coton : de 2.355 à 3.405 kg/ha.
 - Les coûts de production ont sensiblement baissé [Fig. 42] :
 - de -10% à -15% sur soja les 2 dernières années,
 - de -8 à -10% sur coton des 3 dernières campagnes
 - Les marges nettes ont effectué un bond très attractif [Fig. 43] :
 - +147% pour le soja (de 61,7 à 152,5 US \$/ha),
 - très fluctuants sur le coton, dus à une filière économique très perturbée, les marges ont atteint, au pire de la crise, un minimum de 64,0 \$/ha en 2001/02, et sont remontés avec la reprise récente des prix payés à plus de 450 US \$/ha en 2003.
 - Les nombres de prestations de service en mécanisation, de moissonneuses-batteuses et tracteurs ont chuté fortement, respectivement de 70 et 54% ; de même, la consommation de carburant diesel a été réduite de 67% (de 267 l/ha en 94/95 à 89 l/ha en 2003) [Fig. 43] .

7.2 SUR SOLS FERRALLITIQUES D'ALTITUDE TRÈS ACIDES DES HAUTS PLATEAUX MALGACHES : rendements des cultures triplés, revenus en hausse avec moins de travail manuel [Fig. 4 à 11 – Résultats Madagascar].

Les rendements des cultures de maïs, soja, haricot des petites agricultures familiales très pauvres, augmentent régulièrement sur les SCV au cours du temps (*la fertilité s'accroît, alliée à une meilleure maîtrise technique des SCV*), alors qu'ils se montrent très fluctuants et sensibles aux conditions climatiques sur labour.

Les rendements du maïs, du soja et du haricot sont de 2 à 3 fois plus élevés sur SCV que sur labour, en fonction du niveau d'intrants [Fig. 2 à 6].

Les SCV réduisent les temps de travaux de 58 à 65% par rapport au labour, en fonction des cultures et des niveaux d'intensification [Fig. 7 et 8].

Les coûts de production sont systématiquement plus bas sur SCV que sur labour : de 12 à 30% de moins en fonction de la culture et du niveau d'engrais [Fig. 9].

Les marges nettes sont également toujours supérieures sur SCV que sur labour, pour toutes les cultures [Fig. 10].

La valorisation de la journée de travail varie, sur SCV de 2,1 à 4,6 US\$/jour, soit 3 à 5 fois la valeur du salaire minimum journalier, qui est proche de la valorisation de la journée de travail obtenue sur labour [Fig. 11].

7.3 SUR LES SOLS DE TOURAINE EN CLIMAT TEMPÉRÉ : légère croissance des rendements, mais des performances économiques très supérieures sur SCV [Fig. 4, 8, 9 et 10 – Résultats France].

A part un contrôle insuffisant des limaces dans les premières années de pratique du semis direct sur couverture permanente (*attaques sévères sur maïs en 1999, parcelle des "hauts prés"*; Fig. --), et une

inondation incontrôlable en 2001 sur blé (*parcelle "la hugrie"; Fig. --*), **les rendements des cultures de blé et de maïs sur sols argileux et limono-argileux de la vallée du Cher** sont en progression constante [*Fig. 8*]:

- entre 8 et 18 q/ha d'augmentation de productivité pour le blé entre 1995 et 2000,
 - de 6 à 10 q/ha sur le maïs, durant la même période.
- **Sur les sols sableux des plateaux calcaires** (*parcelle "la gravelle"; Fig. 4*), les SCV ont permis au cours du temps d'augmenter nettement les rendements des céréales (+10 à +13 q/ha sur orge entre 1997 et 2002) qui produisent aujourd'hui environ 45 q/ha d'orge et 65 q/ha de sorgho ; sur parcelle adjacente, la pratique continue du labour a conduit progressivement à des productivités céréalières trop faibles, non rentables, et une maigre luzerne a maintenant remplacé les céréales.
 - **Au plan économique**, l'adoption des SCV a permis d'améliorer de manière spectaculaire et durable les performances économiques des cultures en rotation :
 - **Les coûts de production** ont baissé en 8 ans de 45% sur blé et de 28% sur maïs ; ils sont passés, sur blé, de 631 €/ha avant 1994 avec labour à 496 €/ha TCS en 1995/96, puis à 348 €/ha sur SCV en 2002 ; sur maïs, sur la même chronoséquence technique, ils sont passés de 660 €/ha sur labour en 1994, à 480 €/ha sur SCV en 2002 [*Fig. 9 et 10*];
 - Avec les SCV de mieux en mieux maîtrisés et plus performants, **les coûts de mécanisation et les charges opérationnelles** ont baissé respectivement de 39% et 51% sur blé et de 23% et 30% sur maïs [*Fig. 9*] ; l'examen détaillé de l'évolution des charges opérationnelles [*Fig. 10*] montre que les SCV ont permis de réduire très fortement la fumure et en particulier la fumure azotée, de même que l'utilisation des fongicides, des insecticides et des herbicides sur blé et maïs ; le coût des semences a été réduit de près de 50% sur blé, par contre, il reste inchangé sur maïs (*hybrides renouvelés chaque année*).
 - La fumure azotée est passée sur blé de 180-200 N/ha avec labour avant 1994 à 150-170 N/ha à partir de l'an 2000 avec SCV, et sur maïs de 200-220 N à 140-150 N dans le même temps [*Fig. 8*]. Cette réduction moyenne de 16% de la fumure azotée sur blé et de 30% sur maïs a pu se faire tout en assurant la progression régulière des rendements.
 - Les temps de travaux mécanisés (en h/ha) ont aussi nettement diminué avec l'adoption et la maîtrise des SCV [*Fig. 10*):
 - De 4,0 h/ha sur labour à 2,17 h/ha sur SCV, soit une baisse de 46% pour la culture de maïs,
 - De 3,6 h/ha à 1,7 h/ha, soit une réduction de 53% pour la culture de blé.

Au total, l'adoption des SCV a permis, au delà de révéler une très forte capacité de séquestration de C, supérieure à 2,5 t C.ha⁻¹.an⁻¹ sur les 5-6 premières années, d'augmenter significativement à la fois la fertilité et la qualité biologique des sols des sols de texture très variable, et les rendements des cultures de blé et de maïs avec une réduction très importante des coûts de production et des temps de mécanisation ; cet exemple montre qu'il est possible de concilier : l'accroissement de productivité avec moins d'intrants chimiques et l'augmentation de la capacité du sol à produire par voie organo-biologique, une séquestration très importante de carbone avec des revenus en très forte hausse et des systèmes de culture plus facile à pratiquer sur sols portants en toutes conditions climatiques (*accès à la parcelle facilité en SCV*) et totalement protégés par une couverture végétale permanente, qui fait écran contre l'agressivité et les excès climatiques, les effets nocifs des molécules chimiques et qui garantit un contrôle total des externalités et une vie biologique soutenue.

Produire plus, à moindre coût, dans un environnement protégé n'est plus une utopie, c'est une réalité qu'il convient de faire progresser rapidement en région tempérée, car c'est certainement une voie très prometteuse pour s'affranchir progressivement des subsides, car elle conduit à des performances économiques très supérieures, tout en améliorant et en protégeant le patrimoine sol et l'environnement.

8) MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE–ACTION:

•CONSTRUIRE L'INNOVATION POUR, AVEC LES AGRICULTEURS, DANS LEUR MILIEU.

[Séquence 9 – Illustrations Brésil]

La construction des SCV dans les pays du Sud et plus récemment en Europe (*Transfert Sud-Nord*) s'inscrit dans la démarche de Recherche-Action participative²⁸ ; schématiquement, elle procède, avec les agriculteurs et autres acteurs du développement, en partant de leurs systèmes actuels, d'abord d'une modélisation pratique des systèmes de culture de demain, puis de leur maîtrise en vraie grandeur ; c'est de la qualité de cette modélisation (*hiérarchisation des composantes au cours du temps*) et de son niveau de maîtrise technique que dépend la rigueur des recherches thématiques explicatives de leur fonctionnement comparé. La recherche scientifique, qui doit d'abord être utile, est ainsi connectée avec les réalités agricoles d'aujourd'hui et avec la construction de leurs possibilités de demain, appropriables par les agriculteurs (*agronomie préventive qui pratique le principe de précaution*)

Cette recherche *in situ*, dite de "création-diffusion-formation"²⁹ s'appuie sur des unités expérimentales qui sont gérées par les chercheurs et les agriculteurs, et sur des fermes de référence dans lesquelles les producteurs volontaires, charismatiques et influents, appliquent les systèmes qu'ils ont choisis sur les unités expérimentales, en l'état ou en les réadaptant à leurs besoins et objectifs ; l'ensemble des fermes de référence est représentatif de la variabilité régionale (*milieux physique et socio-économique*).

Dans les unités expérimentales, les systèmes de culture sont organisés en matrice sur des toposéquences représentatives du milieu (*types de sols, états de dégradation, etc...*) et réunissent les scénarios de l'agriculture d'hier, d'aujourd'hui et de demain (*la mémoire vive, le présent et le futur possible*).

Partant des systèmes traditionnels, les nouveaux systèmes sont élaborés par l'incorporation progressive, organisée et contrôlée de facteurs de production plus performants ; la construction des matrices obéit à des règles précises, qui permettent l'interprétation des effets directs et cumulés des composantes des systèmes au cours du temps. Les matrices et les fermes de référence sont des lieux d'action, de création de l'innovation et de formation ; elles constituent un laboratoire de veille précieux pour les scientifiques, et un vivier de systèmes de culture très diversifiés (*SCV de production exclusive de grains, ou intégrant l'élevage, ou l'élevage et l'arbre dans le paysage cultivé*).

La méthodologie de recherche-action participative utilisée permet de concilier les exigences de la société civile, de la recherche et des professionnels de l'agriculture. Elle met en évidence les recherches fondamentales à conduire, les replace *in situ* dans la dynamique des réalités agricoles d'aujourd'hui et dans ses perspectives d'évolution de demain. Cette démarche expérimentale s'appuie sur un réseau régional d'unités expérimentales et de fermes de référence représentative qui constitue un support de formation, où la recherche pratique et maîtrise une agronomie préventive qui modélise le fonctionnement comparé des systèmes, évalue leurs performances agronomiques et technico-économiques et leurs impacts sur le milieu physique avant qu'ils ne soient diffusés à grande échelle.

Au plan mondial, avec ses nombreux partenaires du Sud et du Nord, le CIRAD développe un important réseau²⁹ de recherches pour adapter ces techniques conservatoires au plus large éventail possible d'éco-régions de la planète avec l'appui des bailleurs de fonds français (AFD, FFEM, MAE) et européens.

Les méthodes de travail, participatives, permettent de donner satisfaction à tous :

- **La société civile** en général, par la préservation du milieu physique (*contrôle total de l'érosion*), des eaux, des aménagements et par la qualité des produits récoltés, par le retour à la biodiversité.

²⁸ Séguy L. et al., 1996 ; 2001.

²⁹ Le CIRAD-CA /GEC anime un forum internet sur le Semis direct sur Couverture végétale (SCV) : <http://agroecologie.cirad.fr>
Réseau DMC (Direct seeding, Mulch based systems, and Conservation agriculture) : <http://agroecologie.cirad.fr/dmc/index.php>
Star soil & ecosystem en construction.

- **Les sociétés rurales et la vulgarisation :**

- En offrant des pratiques de systèmes (SCV), diversifiées moins contraignantes et plus performantes que les systèmes actuels (*productivité, moindres coûts, marges plus élevées et plus stables*),
- En les formant à la maîtrise pratique de ce nouveau paradigme des SCV qui n'est pas un simple recueil ou catalogue de recettes techniques, mais une véritable philosophie d'intervention de l'homme en harmonie avec la nature.

- **La recherche scientifique :**

- En montrant que les SCV gérés conjointement par les agriculteurs et les chercheurs :
 - . ne peuvent être confinés au seul rôle de "puit de carbone", mais qu'ils régulent les flux et les excès hydriques,
 - . fonctionnent en circuit fermé sans perte notable de nutriments (*nitrates, bases...*),
 - . ne polluent pas le sol, mais au contraire qu'ils peuvent rapidement le dépolluer en cas de nécessité (*biorémédiation*),
 - . préservent le Patrimoine sol dans toutes ses potentialités en produisant des aliments de qualité,
 - . nécessitent, pour des performances supérieures et plus stables que celles des systèmes avec travail du sol, d'une consommation bien moindre en ressources naturelles et énergétiques.
- En démontrant que ce nouveau paradigme des SCV est un des meilleurs compromis actuels de gestion du Patrimoine sol, au plus près du "Biologique" pour tous les sols de la Planète.
- En analysant les divers modes de fonctionnement des SCV, pour en tirer les principales lois, leur modélisation pour une meilleure extrapolation (*ouverture d'un énorme champ scientifique pluridisciplinaire dans lequel la biologie doit avoir une place prépondérante*).
- En établissant pour les grandes ECO-REGIONS de la planète des bases de données qui traitent :
 - . des relations entre l'évolution des sols sous SCV soumis à différents niveaux d'intrants (*du zéro au potentiel*) et celle de la production végétale et/ou animale, sa qualité ;
 - . de l'utilisation de la force de travail
 - . des performances économiques des SCV et de leur stabilité en fonction des aléas climatiques et économiques
- En forgeant des indicateurs d'impact des SCV, très simples et efficaces, utilisables par tous (*agriculteurs, développeurs, chercheurs*) qui permettent l'aide à la prise de décision, rapide, en temps réel.
- En assurant la création et la sélection du matériel génétique dans les SCV pour identifier, les meilleures synergies possibles entre l'amélioration des ressources génétiques et celle des modes de gestion durable du patrimoine sol.
- En contribuant à la formation des acteurs de la recherche et du développement.

9) CONCLUSIONS

La gestion de la matière organique (M.O.), renouvelable chaque année et au moindre coût, est au coeur de la construction agro-économique des systèmes de culture durables en semis direct (SCV), dans lesquels les outils biologiques ont remplacé les outils mécaniques. **En zone tropicale humide (ZTH)**, où les conditions de minéralisation de la M.O. sont plus élevées que partout ailleurs sur la planète, l'introduction et la maîtrise de biomasses très puissantes "de renfort" ou "pompes biologiques" comme intercultures dans les rotations et successions annuelles, se sont avérées incontournables pour bâtir une agriculture durable performante et diversifiée en semis direct continu sur couverture permanente du sol.

À l'image de l'écosystème forestier, ces biomasses de renfort multifonctionnelles (*critères agronomiques et technico-économiques*) garantissent la capacité et la stabilité de production du système "sol-plantes", en présence de moins d'intrants chimiques.

La gestion des écosystèmes cultivés en semis direct sur couverture permanente du sol a ainsi permis de convertir un cycle de dégradation accélérée des sols en un cycle de reconstruction de la fertilité des sols, basé sur la biologie.

Ce mode de gestion, qui fonctionne à l'image de l'écosystème forestier est le seul qui puisse être qualifié de véritablement écologique [Fig. 55 à 69]:

- le sol est totalement protégé contre l'érosion et les xénobiotiques, même sous les climats les plus agressifs ; les variations de température et d'humidité sont amorties, l'humus du sol est protégé de l'oxydation, ce qui réduit considérablement le coefficient de minéralisation de la M.O. stable.
- par sa puissance de recyclage, les éléments nutritifs comme les nitrates, les bases telles que le calcium, le magnésium, la potasse, ne sont pas entraînés vers la nappe phréatique, mais au contraire, remontés en surface et toujours recyclés, concentrés dans la biomasse, et remis à la disposition des cultures par une activité biologique intense et soutenue (*système Sol-Culture fermé*).
- La production de phytomasse est continue toute l'année, par l'utilisation des réserves d'eau en profondeur ; cette connection se fait par l'intermédiaire de systèmes racinaires très puissants qui injectent du carbone en profondeur, protégé des actions anthropiques (*biomasses "pompes biologiques" sélectionnées pour cette fonction*).
- Ces biomasses "pompes biologiques" sont également les plus compétentes et efficaces pour transformer l'engrais minéral en matière organique ; de ce fait, ce sont ces puissantes phytomasses qui reçoivent la part la plus importante d'engrais minéral dans les rotations et successions annuelles, ce qui a pour effet de "booster" leurs fonctions agronomiques, dont celle de séquestration de C. Cette dernière peut être très importante, supérieure à 2,5 t C.ha⁻¹.an⁻¹ dans l'horizon 0-30 cm, avec des SCV qui produisent le maximum de biomasse annuelle, surtout au cours des périodes les plus sèches (*mélange d'espèces*)

Les scénarios d'agriculture durable, qui ont été créés grâce au semis direct sur couverture végétale permanente en milieu tropical humide, sont tous construits sur une reconquête de la biodiversité: rotations de cultures, intégration agriculture-élevage, sols toujours protégés sous couvertures mortes ou vivantes qui favorisent le développement de la faune du sol et de l'activité biologique en général (*macro, méso et microfaunes, microflore*), sont autant de facteurs de cette reconquête qui ramènent les propriétés physico-chimiques et biologiques des agrosystèmes sous SCV vers celle des écosystèmes originels (*Résilience*).

L'application de ces principes de gestion des sols (SCV) à la zone tropicale d'altitude des hauts plateaux de Madagascar, puis au climat tempéré de Touraine, conduit à des réponses agronomiques similaires qui mettent en évidence la très large portée de généralisation des modes de fonctionnement des SCV et de leurs impacts sur le patrimoine sol.

De plus, l'évolution des performances agronomiques et technico-économiques des systèmes de culture accompagne, dans toutes les grandes éco-régions, l'évolution positive du statut organique des sols³⁰ :

- **en ZTH, au Brésil**, entre 1986 et 2000, en agriculture moderne mécanisée, les rendements des cultures principales soja et riz ont plus que doublé et la production de matière sèche totale par hectare a été multipliée par 4 à 5, permettant de produire toute l'année : 2 cultures annuelles de grains en succession plus de la viande ou du lait en saison sèche, tout en protégeant totalement le sol ;
- **Dans l'éco-région subtropicale d'altitude des hauts plateaux de Madagascar**, siège d'une érosion catastrophique, où se pratique une petite agriculture familiale, manuelle et en traction animale avec minimum d'intrants ou sans, la productivité des systèmes en SD est de 2 à 5 fois supérieure à celle des systèmes avec travail du sol pour les cultures principales de maïs, haricot et soja.
- **En climat tempéré**, dans les grandes régions céréalières françaises du Centre, sur sols de bonne fertilité (*sols bruns argilo-calcaires du Berry, vallées de la Loire et du Cher*), la productivité des cultures de blé et de maïs augmente progressivement en présence de niveaux d'intrants chimiques pourtant fortement réduits ; les coûts de production, sur 8 ans, ont été diminués de 45% sur le blé et de 28% sur le maïs.

.Dans toutes les grandes éco-régions, tropicales, tropicales d'altitude et tempérées, quel que soit le type d'agriculture, les systèmes SCV contrôlent totalement l'érosion, séquestrent activement le carbone et sont toujours nettement plus lucratifs que les systèmes avec travail du sol ; les économies de main d'œuvre ou de machines agricoles et de combustible sont spectaculaires.

Dans les divers scénarios de production en SCV , le sol est toujours couvert, "cousu" dès la surface, pourvu d'une très forte activité biologique, les nitrates et les bases sont toujours recyclés dans la même année pour éviter leur entraînement en profondeur et éviter ainsi la pollution des nappes.

Dans toutes les grandes éco-régions, les mêmes principes de reconstitution de l'écosystème forestier sont appliqués aux cultures en rotation : production maximum de phytomasse au dessus du sol et dans le profil cultural, sol jamais travaillé et toujours protégé, recherche de l'augmentation du potentiel hydrique utilisable et de son efficacité tout au long de l'année, regain de biodiversité par le jeu des rotations et des pompes biologiques dans les divers scénarios de production.

Ces résultats obtenus dans des éco-régions très différenciées, montrent que le Semis direct sur Couverture Végétale permanente du sol permet de produire plus de manière plus stable et plus proprement, en donnant une part croissante à la fertilité d'origine organo-biologique dans la capacité du sol à produire. **Ce type d'agriculture** qui fait appel à la notion de "biomasse annuelle, pompe biologique" comme "renfort" des cultures commerciales, **peut agir comme stockeur net de CO₂** et non plus comme producteur net.

Les effets bénéfiques de ces systèmes sur la qualité biologique des sols, de l'eau, peuvent être très rapides et **positionner cette activité comme dépolluante** et en ce sens, lui permettre de recueillir des aides de la société civile pour sa participation à la limitation de l'effet de serre, à la préservation des paysages, des infrastructures rurales et de la faune, pour la qualité de ses productions.

Mais, ces scénarios ne sont réalistes et possibles que si les divers acteurs du développement sont capables, œuvrant de concert et *in situ*, de créer ces systèmes de culture du futur, plus performants à la fois, pour séquestrer le carbone, recycler les nitrates et les bases, dégrader les xénobiotiques (*critères des scientifiques et de la société civile*), et qui satisfassent aux critères de choix de l'agriculture durable et à ceux des agriculteurs (*critères de faisabilité technico-économiques*).

Des méthodes systémiques de Recherche-Action efficaces existent pour la construction de ces scénarios d'agriculture durable et pour que tous les acteurs de la Recherche et du Développement puissent exercer ensemble leurs compétences au profit de tous : appliquons-les !

³⁰ Séguy L. et al. 1996 ; 2001 ; 2003.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- . **Amado, T.J.; Pontelli, C.B.; Júnior, G.G.; Brum, A.C.R.; Eltz, F.L.F. & Pedruzzi, C 1999.** Seqüestro de carbono em sistemas conservacionistas na Depressão Central de Rio Grande do Sul. In: V Reunião bienal de la red latinoamericana de agricultura conservacionista. p.42-43, Florianópolis, 57p. .
- . **Bayer, C.; Mielniczuk, J.; Amado, T.J.C.; Martin-Neto, L. & Fernandes, S.V. 2000.** - Organic matter storage in a sandy clay loam acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil & Till. Res.* 54:101-109.
- . **Cerri C. C. , Moraes J. F. L. , Volkoff B. 1992.** Dinâmica do carbono orgânico em solos vinculados a pastagem da Amazônia brasileira ; in *revista INIA, inv. Agr., n° a, t. 1*, pp 95-102.
- . **Corraza E. J. , Silva J. E. , Resck D. V. S. , Gomes A. C. 1999.** Comportamento de diversos modos de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação a vegetação de Cerrado. In *Revista Brasileira Ciência do Solo* 23 pag 425-432.
- . **FEBRAPDP** - Federação brasileira de plantio direto na palha 2002. <http://www.febrapdp.org.br>
- . **INRA 2002** - Increasing carbon stocks in french agricultural soils ? Octobre 2002
- . **Lal, R. , Kimbel J. M. et al (Eds 1997) 1997.** – Management of carbon sequestration in soils. *Advances in soil science* CRC Press. Boca Raton, USA. 457 pp .
- . **Lucas Y. , Luizão F. J. , Chauvel A. , Rouiller J. , Nathon D. 1993 .** The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soils. In *Science, vol. 260* pp 521-523.
- . **Miyazawa, M. , Pavan, M.A. , Franchini J.C. 2000.** Neutralização da acidez do perfil de solo por resíduos vegetais. In *Informações agrônomicas da POTAFOS - n° 92 - Dezembro/2000*. CP 400 - CEP 13400-970. Piracicaba-SP. Brasil.
- . **Reicosky, D.C.; Kemper, W.D.; Langdale, G.W.; Douglas Jr., C.L. & Rasmussen, P.E. 1995** Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *J. Soil Water Cons.* 50:253-261.
- . **Sá, J.C.M.; Cerri, C.C.; Lal, R.; Dick, W.A.; Venzke Filho, S.P.; Piccolo, M. & Feigl, B. 2000.** Organic matter dynamics and sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* "em revisão final".
- . **Sá, J.C.M.; Cerri, C.C.; Dick, W.A.; Lal, R. 2000** -Plantio Direto = Recupera a matéria orgânica do solo e reduz a emissão de CO2 para a atmosfera - In = *Revista Plantio Direto* - edição n° 59, setembro/outubro de 2000. P41-45 - Aldeia Norte editora Ltda, Rua Moron 1324, 8° andar, sala 802.; 99010-032 - Passo Fundo – RS.
- . **Séguy L., 1994.** Contribution à l'étude et à la mise au point des systèmes de culture en milieu réel : - petit guide d'initiation à la méthode de création-diffusion de technologies en milieu réel, - Résumés de quelques exemples significatifs d'application. Doc. Interne CIRAD, , 191p. - 34398 Montpellier cedex 5 - France Octobre 1994.

- . **Séguy L. , Bouzinac S. , Trentini A. , Cortez N.A. 1996.** L'agriculture brésilienne des fronts pionniers. In *Agriculture et développement n°12, décembre 1996*. pp;2-61. - 34398 Montpellier cedex 5 - France.
- . **Séguy L. , Bouzinac S. , Maeda E. , Maeda N. 1998.** Brésil : semis direct du cotonnier en grande culture motorisée. In *Agriculture et développement n° 17, Mars 1998*. pp.3-23. - 34398 Montpellier cedex 5 – France .
- . **Séguy L. , Bouzinac S. , Maronezzi A.C. 1998.** Les plus récents progrès technologiques réalisés sur la culture du riz pluvial de haute productivité et à qualité de grain supérieure, en systèmes de semis direct. Ecologies des forêts et cerrados du Centre Nord de l'état du Mato Grosso. Doc. Interne CIRAD/ Agronorte, 4 pages - 34398 Montpellier cedex 5 - France.
- . **Séguy L. , Bouzinac S. , Maronezzi A.C. 1998.** Semis direct et résistance des cultures aux maladies. Doc. interne CIRAD, 1998, 4p. -34398 Montpellier cedex 5 – France.
- . **Séguy L. , Bouzinac S. , Maeda E. , Ide M.A. , Trentini A. 1999.** La maîtrise de *Cyperus rotundus* par le semis direct en culture cotonnière au Brésil. *Agriculture et développement n° 21, mars 1999*. pp.87-97 - 34398 Montpellier cedex 5 – France .
- . **Séguy L. , Bouzinac S. , Taffarel W. , Taffarel J. 2000.** Méthode de défrichement préservant la fertilité du sol. In: *Bois et forêts des tropiques - n° 263 – 1^o trimestre 2000* - p.75-79. CIRAD - 34398 Montpellier cedex 5 – France.
- . **Séguy L. , Bouzinac S. , Maronezzi A.C. 2001.** Un dossier du semis direct : Systèmes de culture et dynamique de la matière organique - 203p. (*existe en français et portugais*). Doc. Interne et CD-Rom CIRAD-CA/GEC 34398 Montpellier Cedex 5 - France.
- . **Séguy L. ; Bouzinac S. 2001.** Cropping systems and organic matter dynamics. 5 p. - In *World Congress on conservation agriculture, Madrid, 1-5 october 2001*.
- . **Séguy L. , Bouzinac S. , Groupe MAEDA et AGRONORTE. 2002.** Rapports annuels d'activité Groupe MAEDA/CIRAD-CA et AGRONORTE/CIRAD-CA . Doc. Interne CIRAD-CA/GEC 34398 Montpellier Cedex 5 - France.
- . **Smith P. ; Powlson D. S.; Glendenning A. J.; et Smith J. U. , 1998 .** – Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. In *Global Change Biology*, **4**, 679-685.
- . **Stark N. M. , Jordan C. F. ; 1978** . Nutrients retention by the root mat of an amazonian rain forest. In *Ecology*, **59** (3) pp 434-437.