

CAPACITE DE SEQUESTRATION DE CARBONE DES SOLS AGRICOLES DE FRANCE

Lucien Séguy

1/ INTRODUCTION

Ce petit article sur la capacité de sols à séquestrer le carbone en fonction de modes différenciés de gestion des sols et des cultures, fait suite aux premiers résultats réunis dans le document (*et CD*) de 2003 «Et si on avait sous-estimé le potentiel de séquestration du carbone pour le semis direct ? Quelles conséquences pour la fertilité des sols et la production ?» - L. Séguy et S. Bouzinac.

Il est utile de rappeler que dès les années 1996 (1), nos travaux de recherches systémiques mettaient déjà en évidence les preuves de la capacité de séquestration de C très élevée des sols sous SCV dans de nombreuses écologies tempérées et tropicales ; depuis, la poursuite de ces travaux¹ a confirmé et précisé à l'échelle du réseau SCV tropical que les intervalles de séquestration étaient déterminés par la quantité et à la qualité (nature) des entrées carbonées annuelles dans le système Sol – Plante, quelles que soient les conditions pédoclimatiques.

L'IRD, associé dès le début des années 2000 à ce travail d'évaluation des capacités de séquestration de C, à partir d'échantillons de sol provenant de nos matrices pérennisées «systèmes de culture très contrastés» sur le réseau tropical SCV (UR1), a confirmé ces résultats (*la valeur de C séquestré de 1,7 t/ha/an en zone tropicale humide dans le sud de l'Amazonie en écologie forestière en est un exemple éloquent*²).

Des résultats très récents, exposés dans le document «La symphonie inachevée du semis direct dans le Brésil central», 2008, L. Séguy, S. Bouzinac et al., reprécisent, à la fois, les intervalles des pertes en carbone(C) sous travail plus ou moins intensif du sol et des gains dans des SCV bâtis sur une multifonctionnalité croissante des couverts végétaux et établit de manière rigoureuse des corrélations hautement significatives entre productivité des cultures et stock de Carbone dans des SCV de plus en plus écologiques et entre Stock de C et les principaux attributs physico-chimiques des sols, pour une large gamme de texture des sols ferrallitiques de la ZTH du Brésil central.

Ce petit article, évalue, lorsque la rigueur d'échantillonnage le permet, la capacité de séquestration de C de quelques sols de Touraine et du Berry soumis à des systèmes de culture contrastés, sur une période de 6 à 15 ans suivant les parcelles.

2/ MATERIELS ET METHODES

L'analyse de la capacité de séquestration de C s'effectue dans 2 régions céréalières (*le Berry et la Touraine*), sur 2 types de sols bruns sur roche mère calcaire de textures différenciées dans chacune des régions, dont un sol de texture argilo-sableuse pratiquement identique entre les 2 régions, un sol sablo-argileux dans le Berry et un sol de coteau totalement sableux (*réserve traditionnellement à la vigne*) en Touraine ; dans chaque région, chaque type de sol est soumis à des 2 modes différenciés de gestion des sols: travail du sol (labour ou labour + TCS) et semis direct, exceptés les sols argilo-sableux de Touraine (*Parcelle «Les Chaumeteaux»*) et le sol sableux de coteau (*Parcelle «La Gravelle»*) qui sont gérés d'abord en TCS durant les 3 et 2 premières années respectivement et ensuite en Semis direct continu.

Dans le Berry (*champagne berrichonne*), 2 chronoséquences :

- Une de 6 ans sur sol limono-sableux (*Parcelle «Aiguillon»*),

¹ Cf. docs : La symphonie inachevée du semis direct dans le Brésil central, 2008, L. Séguy, S. Bouzinac et Al., et Saga Sebotas, 2009, S. Bouzinac, J. Taillebois, L. Séguy et Al, [site www.agroecologie.cirad.fr](http://www.agroecologie.cirad.fr)

² M. Siqueira Neto, A. S. Perrin, M. Bernoux, et al

- Une de 6 ans sur sol argilo-sableux (*Parcelle «Chemin Est»*).

Sur les 2 chronoséquences, les systèmes de culture sont réunis dans les **Tableaux 1, 2 et 3**, et sont à base de la rotation céréale/colza ou tournesol, lentille.

En Touraine (Montlouis sur Loire), 2 chronoséquences :

- Une de 14 ans sur les sols sableux de coteau qui compare, d'une part, le sol travaillé : 9 ans de labour suivis de 5 ans de TCS avec, d'autre part, le sol géré en semis direct avec 2 ans de TCS au départ suivis de 12 ans de semis direct ; les rotations de culture sont à base de céréales dominantes (**Tableau 1-1**), excepté sur travail du sol ou 3 ans de luzerne sont incorporés entre les années 5 et 8 .
- Une sur sol argilo-sableux de plaine, de 15 ans dont les 3 premiers en TCS et les 12 ans suivants en semis direct, caractérisée par la restitution annuelle d'importantes et constantes quantités de Carbone dans le système sol-plante ; la rotation est à base de blé tendre d'hiver avec du Maïs dont la surface dominante est irriguée, complétée par une couverture d'automne – hiver précédent le maïs à base d'avoine durant les 8 premières années et d'avoine + féverole les 2 dernières (**Tableau 1-2**).

Dans chacune des 2 régions, le stock de C a été mesuré au démarrage du semis direct sur le sol limono-argileux de plaine du Berry (*chronoséquence de 6 ans sur parcelle «Aiguillon»*) et sur le sol argilo-sableux de plaine de Touraine (*chronoséquence de 15 ans dont 12 en semis direct*) et permet d'évaluer la capacité de séquestration de C entre labour et SCV dans le Berry sur 6 ans et sur SCV à fortes entrées carbonées annuelles durant 12 ans en Touraine.

Sur les autres parcelles : sol sableux de «La Gravelle» en Touraine (*12 ans de SCV continu et travail du sol*) et sol argilo-sableux de «Chemin Est» dans le Berry (*6 ans de Labour et SCV comparés*) dont la granulométrie est pratiquement identique à celle de la parcelle des Chaumeteaux en Touraine, une comparaison finale des stocks de C est établie pour permettre de caractériser les impacts différenciés des modes de gestion contrastés des sols.

L'azote Total est également évalué de même que la CEC ; sur les chronoséquences de Touraine qui sont de plus longue durée (14 et 15 ans), l'échantillonnage au départ et final des sols a été fait à partir de 4 répétitions d'échantillons moyens pour une analyse plus rigoureuse de la capacité de séquestration de C, du Stock de N total et de l'évolution de la CEC ; notre propos ici n'est pas de rechercher une très grande précision sur la capacité de séquestration de carbone du sol compte tenu de leur très forte hétérogénéité à courte distance (*alluvionnements périodiques par les crues en Touraine et teneurs très variables en cailloux et graviers dans les horizons de surface des sols du Berry*) ; notre ambition est donc plutôt de mettre en évidence des tendances , des courbes d'évolution caractérisant cette capacité différentielle du sol à séquestrer le carbone au cours du temps en fonction des modes de gestion contrastés utilisés.

3/ RESULTATS et DISCUSSION

3-1 Capacité de séquestration du carbone dans l'horizon 0-20 cm

Mode de calcul du stock de C en t/ha: $\%M.O. \times 2000 \text{ t} \times d.a \text{ (densité apparente)}/1,72 \times 100$.

3-1-1 Le cas des sols argilo-sableux de plaine

En Touraine, le sol système sol-plante fonctionne pendant 12 ans de SCV sur d'importantes entrées carbonées annuelles avec la rotation Blé + couvert d'automne – hiver / Maïs irrigué (pour 80% de la surface) qui peuvent être estimées entre 7 et 9 tonnes/ha de carbone.

Le stock de C de départ du mode gestion SCV est de 28,91 t/ha (*1,927 % de M.O avec Ecart Type ET = 0,1137, et CV% = 5,9%*).

Après 8 ans de fonctionnement SCV, le stock de C passé à 42,62 t/ha et après 12 ans il atteint 48,00 t/ha.

Le rythme de séquestration de C est donc de $42,62 - 28,91/8 = 1,71$ t/ha sur 8 ans et de $48,00 - 28,91/12 = 1,6$ t/ha sur 12 ans ; l'évaluation du rythme de séquestration de C effectué après les 5 et 6 premières années sur les 2 parcelles contigües conduites avec le même système était compris entre 2,6 et 2,8 t/ha (Cf. Doc 2003 «*Et si on avait sous estimé le potentiel de séquestration du carbone pour le semis direct ?*» Parcelles des «*Hauts prés et de La Hugrie*» – L. Séguy., S. Bouzinac et al.) ; le rythme de séquestration est donc très rapide sur les premières années de SCV (*résilience forte = forte "soif de carbone"*) et s'amortit ensuite progressivement conformément aux lois connues (*courbes de forme exponentielle du modèle de Hénin-Dupuis*).

Dans le Berry, les entrées carbonées annuelles sont nettement inférieures à celles des mêmes sols de Touraine (*granulométrie similaire de la terre fine, avec cependant des teneurs très variables à courte distance en cailloux et graviers dans le sol du Berry*) et peuvent être estimées entre 4 et 5 t/ha/an de C en moyenne sur 6 ans ; les résidus de récolte sont systématiquement enfouis sous labour et broyées en surface à la récolte en SCV sur lesquels repousses de colza, lentilles et avoine servent de couvert en automne dans la rotation avec le Blé (**Tableaux 2 et 3**) ; les teneurs en matière organique sont très élevées, beaucoup plus que sur le même sol de Touraine, avec des valeurs proches de 5% dans l'horizon 0 - 20 cm.

Le différentiel de Stock de Carbone entre labour + pailles enfouies et SCV, après 6 ans de pratique des systèmes, est dans l'horizon 0 - 20cm de : $74,46 - 71,26 = 3,2$ t/ha, au profit du système en semis direct, soit 1 différentiel de 0,533 t/ha/an dans ce sol en voie de saturation en Carbone.

3-1-2 Le cas du sol limono-sableux de plaine du Berry (parcelle «*aiguillon*»)

Le stock de C au départ est de 29,96 t/ha (*1,84 %de M.O. avec $ET = 0,124$ et $CV\% = 6,7$ et densité apparente de 1,4 sur 4 échantillons moyens*).

Après 6 ans, les stocks de carbone sont sur labour et SCV respectivement de 30,52 t/ha et 37,83 t/ha.

Sur labour le stock de C est resté à peu près constant, inchangé: 29,96 au départ contre 30,52 après 6 ans ; sur SCV, le stock de C s'est accru de $37,83 - 29,96 = 7,87$ t/ha, soit un taux de séquestration moyen annuel de C de $7,87/6 = 1,31$ t/ha ce qui est cohérent avec le niveau modeste d'entrées carbonées annuelles, les premières années lorsque le rythme de séquestration est le plus élevé ; ce taux de séquestration annuel est nettement plus faible, les premières années de SCV à celui des sols argilo-sableux de plaine qui bénéficient de très fortes entrées carbonées dans le système (*cas de la rotation blé + couvert d'automne-hiver /maïs de Touraine*).

3-1-3 Le cas des sols très sableux de coteau en Touraine (Parcelle «*La Gravelle*»)

Le stock de C au départ est de 16,39 t/ha (*1% de M.O. avec $ET = 0,113$, $CV\% = 11,3$, et densité apparente de 1,41, sur 3 échantillons moyens*).

Après 14 ans de travail du sol (*intensif au départ avec 9 ans de labour suivis de 5 ans de TCS*) sur une rotation avec céréales dominantes et 3 ans de luzerne entre les années 5 et 8 ans de la chronoséquence, le stock de C est de 18,06 t/ha ; la différence entre l'arrivée et le départ est de $18,06 - 16,39 = 1,67$ t/ha de gains de C après 14 ans, soit un gain moyen annuel très faible de 0,12 t/ha/an.

Sur la chronoséquence «*agriculture de conservation*» avec 2 ans de TCS au départ suivis de 12 ans de semis direct, le stock de C après 14 ans est de 31,43 t/ha, ce qui représente une séquestration totale de $31,43 - 16,39 = 15,04$ t/ha, soit un taux moyen annuel de 1,07 t/ha/an. Le stock de carbone a donc pratiquement doublé sur un sol sans argile (2%) ; l'examen visuel

de la surface du sol en surface sur la ligne de séparation des 2 systèmes, montre un sol beaucoup plus foncé, gris, sur le côté semis direct et très clair, blanc, sur le côté sol travaillé.

3-2 stock d'azote Total (en T/ha) et CEC (en meq/100g)

Le **tableau 3** qui réunit les valeurs concernant le stock de C, le stock de N total et la CEC, met en évidence :

- Une capitalisation de l'Azote total sous SCV dominant au cours du temps: les stocks de N total sont toujours significativement plus élevés sous SCV que sous travail du sol quel que soit le type de sol : + 19% sous sol limono-sableux et + 12% sur sol argilo-limoneux dans le Berry, + 78% sur sol sableux de coteau en Touraine,
- La CEC est peu affectée par les systèmes de culture contrastés sous sols limono-sableux et argilo-sableux quelle que soit la région, par contre elle double de valeur sur les sols très sableux de coteau en Touraine.

3-3 Conséquences pour les performances agro-économiques des systèmes de culture

Le dossier 2003 «Agriculture durable – Et si on avait sous estimé le potentiel de séquestration du carbone pour le semis direct ?» (L. Séguy, S. Bouzinac et al), concluait déjà, après 5 à 6 ans d'application des SCV sur les sols de **Touraine** à une légère mais constante croissance des rendements accompagnée de performances économiques très supérieures (*extrait du Doc. 2003 cité in extenso*):

“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”*), et une inondation incontrôlable en 2001 sur blé (*parcelle “La hugrie”*), **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,"

Après 14 et 15 ans d'application SCV les rendements des cultures ont continué de progresser sur les sols de Touraine ; ils se situent aujourd'hui autour de 80 q/ha pour le blé constitué d'un mélange de 3 variétés permettant de s'affranchir des fongicides avec des doses de N/ha voisines de 160kg/ha; sur maïs, les rendements moyens des 4 dernières années s'inscrivent dans un intervalle de 105 à 115q/ha avec des fumures azotées réduites, de 130 à 150 kg/ha.

Dans le **BERRY** , les performances agro-économiques des SCV céréaliers sont toujours supérieures à celles du labour et, comme en Touraine, les doses de N/ha ont été réduites autour de 130 à 150 kg/ha suivant les années climatiques avec une utilisation minimum des pesticides comme le montrent, à titre d'exemple, les tableaux ci-après relatifs à l'année 2006 et la figure de synthèse des performances 2005-2008 qui réunissent résultats labour x gestion chimique et SCV soumis à 2 modes de gestion: chimique et chimique réduite + organique.

PERFORMANCES AGRO-ÉCONOMIQUES DE LA CULTURE D'ORGE DE PRINTEMPS EN FONCTION DU SYSTÈME DE CULTURE ET DU MODE DE GESTION DE LA CULTURE: CHIMIQUE (C), CHIMIQUE + ORGANIQUE (C + O)

Sols Bruns Argilo-Calcaires de l'Ouest et du Centre de la France - Montlouis sur Loire et Issoudun - 2006

I - COÛTS DE PRODUCTION		Modes de Gestion ¹ de la culture d'Orge			
		Chimique (C)		Chimique + Organique (C+O)	
1.1 - Culture: Orge de Printemps (Sebastian)		kg, g, t/ha	€/ha	kg, g, t/ha	€/ha
		Semences de Ferme + T. Orga			
Semences		130 kg	67,22	130 kg	30,00
Engrais	Super 23	250 kg	35,14	250 kg	35,14
	Urée	230 kg	61,93	85,0 kg	23,60
		humus 5,5t + Kompost 4 kg			
		49,00			
Herbicides	Allié	5 g	3,24	5 g	3,24
	Harmony	45 g	17,94	45 g	17,94
Insecticides	PEARL	(2x0,0625t)	13,16	Neem TY 10 (2x1t)	32,00
Fongicides	OPUS	0,3t	29,80	Ep4 (1,5kg + 2,0kg + 2,0kg)	47,00
	ACANTO	0,3t			
Sous Total		228,43 (100)		237,38 (104)	
1.2 - Mode de Gestion du sol					
	Cover Crop		25,0		
Labour	Labour		50,0		—
	Hersage		8,0		
	Opérations machines		120,0		
Sous Total		203,0		—	
SCV (Semis Direct)	Metarex (2 x 3kg)		18,9		18,9
	Tamrock (0,8kg)		9,55		9,55
	Opération machines		70,0		70,0
Sous Total		98,45		98,45	
TOTAL GÉNÉRAL		Labour (C)	SCV (C)	SCV (C+O)	
		431,43	326,88	335,83	
II - PRODUCTIVITÉ (kg/ha) et PROD. RELATIVE (%)		Labour (C)	SCV (C)	SCV (C+O)	
		3140 (100)	3520 (112)	3010 (96)	
III - MARGES BRUTES ² (Hors Subsidés) €/ha		70,9	236,32	145,77	

1 - Modes de Gestion de la Culture:

- Chimique (C) - Herbicides + Insecticides

+ Fongicides + engrais minéral - 110N + 60P₂O₅ + 0K₂O/ha

- Chimique + Organique(C + O) - Herbicides + humus liquide + Eliciteur + Insecticide dérivé de Neem, niveau PK égal à C, dose N réduite de 65%, sans fongicide.

2 - Prix payé au producteur pour l'orge de printemps = 160 €/tonne

SOURCE: H. Charpentier, J. C. Quillet, L. Séguéy, **Elvisem** Produits Organiques;
CTAEX, Laboratoire analyses - Badajoz, Espagne/2006

PERFORMANCES AGRO-ÉCONOMIQUES DE LA CULTURE DE BIÉ DUR (CV. JOYAU), EN FONCTION DU SYSTÈME DE CULTURE ET DU MODE DE GESTION DE LA CULTURE: CHIMIQUE (C) ET CHIMIQUE + ORGANIQUE (C + O)

Sols Bruns Argilo-Calcaires de l'Ouest et du Centre de la France - Montlouis S/Loire et Issoudun - 2006

I - COÛTS DE PRODUCTION	Modes de Gestion ¹ de la culture de Blé				
	Chimique (C)		Chimique + Organique (C+O)		
1.1 - Culture: Blé Dur (Joyau)	kg, g, l/ha	€/ha	kg, g, l/ha	€/ha	
Semences	120 kg	78,00	120 kg	28,00	
Engrais	Super 23	250 kg	35,14	250 kg	35,14
	Urée	435 kg	118,00	320 kg	86,80
			5,9l humus + 4 kg Kompost	49,0	
Herbicides	Allié	10,0 g	6,48	10,0 g	6,48
Communs	Atlantis	300 g	59,0	300 g	59,0
	Harmony	30 g		30 g	
	Primus	0,05 l		0,05 l	
Insecticides	Pearl	(3x0,075 l)	23,7	Neem (Ty 10) (2x1 l)	32,0
Fongicides	Opus (0,3 l)	0,3 l	12,37	EP6 (1,5kg + 2,0kg + 2,0kg)	47,0
	Opus + Corét	(0,3 l + 0,2 l)	25,95		
Régulateur croissance	Contec verse	2 l	4,42	2 l	4,42
Sous Total		363,06 (100)		343,42 (95)	
1.2 - Mode de Gestion du Sol					
Cover Crop		25,0		-	
Labour	Labour	50,0		-	
	Hersage	8,0		-	
	Opérations machines	120,0		-	
Sous Total		203,0		-	
SCV Metarex (2x3kg)		19,60		19,60	
(Semis Tamrock (0,8 kg)		9,50		9,50	
Direct) Opérations machines		120,00		120,00	
Sous Total		149,10		149,10	
Total Général	Labour (C)	SCV (C)	SCV (C+O)		
	566,06	512,16	492,52		
II - PRODUCTIVITÉ (kg/ha) et PROD. RELATIVE (%)	Labour (C)	SCV (C)	SCV (C+O)		
	5470 (100)	5520 (101)	5050 (92)		
III - MARGES BRUTES ² €/ha (Hors subsides)	Labour (C)	SCV (C)	SCV (C+O)		
	309,14	371,04	315,48		

1 - Modes de Gestion de la Culture:

- Chimique (C) - Herbicides + Insecticides

+ Fongicides + engrais minéral = 200N + 60P₂O₅ + 0K₂O/ha

- Chimique + Organique(C + O) - Herbicides + humus liquide + Eliciteur + Insecticide dérivé de Neem, niveau PK égal à C, dose N réduite de 26%, sans fongicide.

2 - Prix payé au producteur pour le Blé Dur Joyau = 160 €/tonne (estimation)

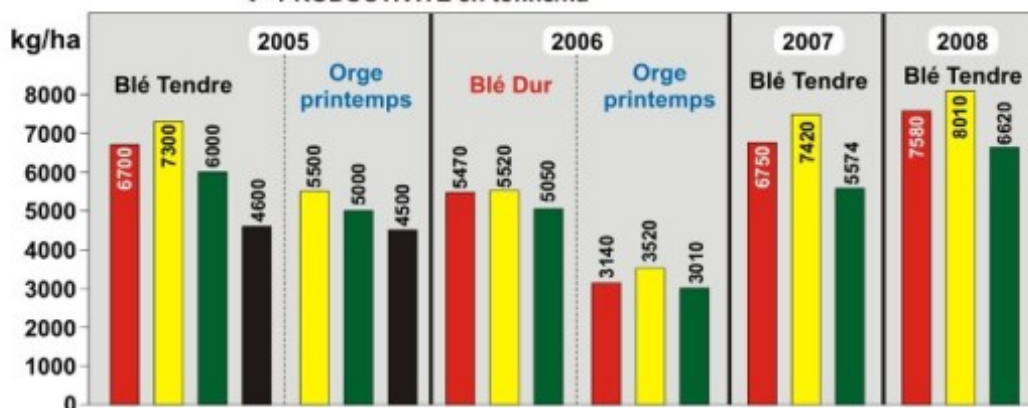
SOURCE: H. Charpentier, J. C. Quillet, L. Séguy, **Elvisem**, Produits Organiques; CTAEX, Laboratoire analyses - Badajoz, Espagne/2006

PERFORMANCES DES SYSTÈMES DE CULTURE CÉRÉALIERS EN FONCTION DU MODE DE GESTION DE LA CULTURE: CHIMIQUE (C) CHIMIQUE + ORGANIQUE (C+O) ET AU "PLUS PRÈS DE L'ORGANIQUE (O)"

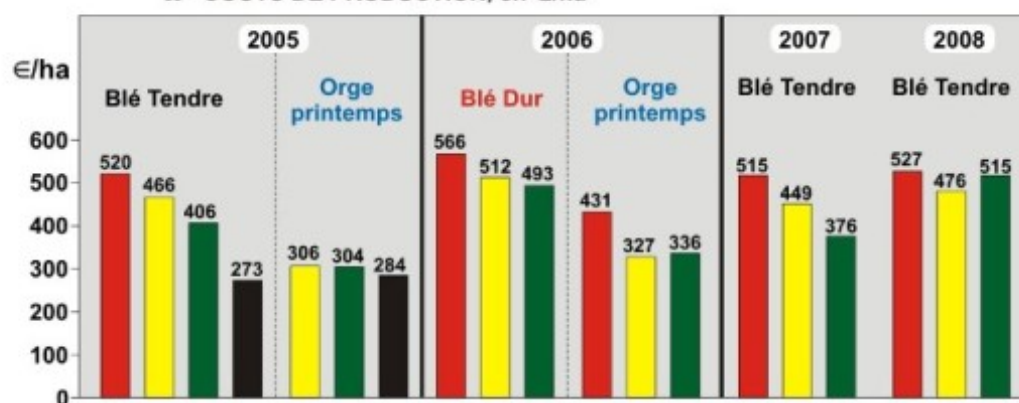
Sols bruns, argilo-calcaires du Centre de la France - Issoudun - 2005/2008

■ Labour (C)
 ■ SCV (C)
 ■ SCV (C + O)
 ■ SCV (O)

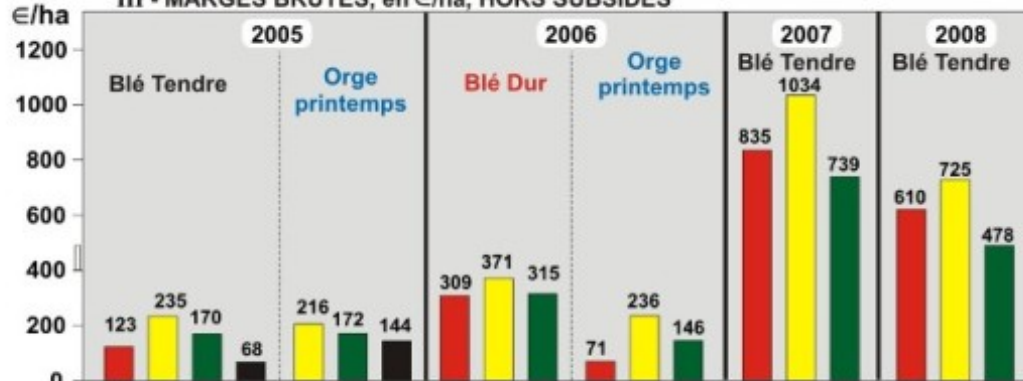
I - PRODUCTIVITÉ en tonne/ha



II - COÛTS DE PRODUCTION, en €/ha



III - MARGES BRUTES, en €/ha, HORS SUBSIDES



1. SCV: Semis Direct sur Couverture Végétale permanente du sol.

SOURCE: H. Charpentier, J. C. Quillet, L. Séguy; *Elvisem*, Produits Organiques - France 2008

TABLEAU 1 - SYSTEMES DE CULTURE TOURAINES**1) SOLS SABLEUX¹ DES COTEAUX (La Gravelle)**



 LABOUR  TCS  SCV

Année	LABOUR (9 ans) suivi de TCS (5 ans)	TCS (2 ans) Suivi de SCV ² (12 ans)	
1996	Blé tendre	Tournesol	
1997	Orge hiver	Orge hiver	
1998	Tournesol	Tournesol	Analyses Sols
1999	Blé tendre	Avoine	
2000	Triticale	Orge hiver	
2001	Luzerne	Avoine + Sorgho	
2002	Luzerne	Orge hiver	
2003	Luzerne	Colza	Analyses Sols
2004	Seigle	Orge	
2005	Orge	Sorgho	
2006	Avoine	Orge	
2007	Sorgho	Colza	
2008	Triticale	Orge	
2009	Triticale	Sorgho	Analyses Sols

1 – Granulométrie (%) = Argile : 1 - 3 ; Limons fins : 3 - 5 ; Limons grossiers : 5 - 7 ; Sables fins : 7 - 11 ; Sables grossiers : 77 - 85.

2 – Intervalle d'entrées moyennes annuelles de carbone en SCV => C : 4-5 t/ha/an

2) SOLS ARGILLO-SABLEUX DE PLAINE³ (Les Chaumeteaux)

 TCS  SCV

Année	TCS (3 ans) suivi de SCV ⁴ (12 ans)	
1995	Blé	
1996	Maïs	
1997	Blé + Seigle	
1998	Maïs	Analyses Sols
1999	Blé + Avoine	
2000	Maïs	
2001	Blé + Avoine	
2002	Maïs	Analyses Sols
2003	Blé + Avoine	
2004	Maïs	
2005	Blé + Avoine	
2006	Maïs	
2007	Blé + (Avoine + Féverole)	
2008	Maïs	
2009	Blé + (Avoine + Féverole)	Analyses Sols

3 – Granulométrie (%) = Argile : 30 - 43 ; Limons fins : 15 - 25 ; Limons grossiers : 5 - 7 ; Sables fins : 6-12 ; Sables grossiers : 21 - 31.

4 – Intervalle d'entrées moyennes annuelles de carbone en SCV => C : 6,5 - 8,5 t/ha/an

TABLEAU 2 - SYSTÈMES DE CULTURE BERRY

1) SOLS ARGILO-SABLEUX DE PLAINE¹ (Chemin Est)

(Granulométrie semblable à sol de plaine de Touraine – Les Chaumeteaux)

 LABOUR  SCV

Année	LABOUR continu (7 ans)	SCV continu ² (7 ans)
2003	Blé	Blé
2004	Blé	Blé
2005	Colza	Colza ²
2006	Orge	Orge + Avoine
2007	Lentille	Lentille ²
2008	Blé	Blé
2009	Colza	Colza ² Analyses Sols

1 – Granulométrie (%) = Argile : 35 - 37 ; Limons fins : 21 - 23 ; Limons grossiers : 11 - 12 ; Sables fins : 7 - 8 ; Sables grossiers : 21 - 24.

2 – SCV = Résidus végétaux annuels + repousses colza et lentilles (2005, 2007, 2009) et couvert avoine automne-hiver 2006/07

Intervalle d'entrées moyennes annuelles de carbone en système SCV => C : 4 à 5 t/ha/an

2) SOLS LIMONO-SABLEUX DE PLAINE³ (Aiguillon)

Année	LABOUR continu (6 ans)	SCV continu ⁴ (6 ans)
2004	Blé	Blé + Avoine Analyses Sols
2005	Tournesol	Tournesol
2006	Blé	Blé + Vesce
2007	Orge	Orge
2008	Colza	Colza ⁴
2009	Blé	Blé Analyses Sols

3 – Granulométrie (%) = Argile : 21 - 26 ; Limons fins : 21 - 23 ; Limons grossiers : 14 - 15 ; Sables fins : 9 - 11 ; Sables grossiers : 26 - 30.

4 – SCV = Résidus végétaux annuels + repousses colza et lentilles (2005, 2007, 2009) et couvert avoine automne-hiver 2006/07. Intervalle d'entrées moyennes annuelles de carbone en système SCV => C : 4 à 5 t/ha/an

**TABLEAU 3 - EVOLUTION D'ATTRIBUTS DU SOL DANS L'HORIZON 0 – 20 cm: STOCK DE C (t/ha), N TOTAL (t/ha), CEC (meq/100 g)
EN FONCTION DE MODES DIFFERENCIES DE GESTION DES SOLS ET DES CULTURES SUR DES CHRONOSEQUENCES DE 6 A 14 ANS DANS DEUX GRANDES REGIONS CEREALIERES DE FRANCE (BERRY et TOURAINE)**

	Prof. (cm)	BERRY				TOURAINE			
		Sol limono-sableux (Aiguillon ¹)		Sols argilo-sableux (Chemin Est ¹)		Sols argilo-sableux ² (Chaumeteaux)		Sols sableux ² (La Gravelle)	
		Labour (6 ans)	SCV (6 ans)	Labour (6 ans)	SCV (6 ans)	TCS (3 ans) SCV (12 ans)	Labour (9 ans) TCS (5 ans)	TCS (2 ans) SCV (12 ans)	
STOCK De C (t/ha)	0-10 (CV%)	19,45	21,47	34,68	39,34	29,85	10,46	21,70	
		-	-	-	-	9,11	6,0	9,6	
	10-20 (CV%)	15,57	16,36	36,58	35,11	18,15	7,60	9,73	
		-	-	-	-	7,2	15,9	8,1	
	Total	30,52	37,83	71,26	74,46	48,00	18,06	31,43	
N TOTAL (t/ha)	0-10 (CV%)	1,39	1,86	2,46	3,08	2,82	0,82	1,85	
		-	-	-	-	7,9	6,7	17,6	
	10-20 (CV%)	1,42	1,47	2,62	2,62	2,00	0,67	0,80	
		-	-	-	-	7,3	12,9	11,6	
	Total	2,81	3,33	5,08	5,70	4,92	1,49	2,65	
CEC (meq/100g)	0-10 (CV%)	12,96	12,41	29,61	30,50	20,48	3,22	6,89	
		-	-	-	-	8,0	46,9	20,7	
	10-20 (CV%)	12,19	11,73	32,96	29,10	20,60	2,05	3,51	
		-	-	-	-	5,7	42,8	11,7	

1 – Un échantillon moyen composé de 4 sous-échantillons/mode de gestion/type de sol.

2 – 4 répétitions/mode de gestion/type de sol - CV = Coefficient de Variation en %

Source : J.C. et A. Quillet (Montlouis sur Loire) ; H. Charpentier (Issoudun), L. Ségué et O. Husson, CIRAD - Persyst - 2009

4/ CONCLUSIONS

Les performances des SCV pour la capacité de séquestration du Carbone, réunies dans le dossier carbone publié en 2003 (L. Séguy, S. Bouzinac, et al.), montraient déjà leur très nette supériorité sur tous les autres modes de gestion du sol et révélaient de très fortes capacités de séquestration dans toutes les écologies : tempérées, subtropicales et tropicales y compris la ZTH, directement proportionnelles aux quantités des entrées annuelles carbonées dans le système sol-plante et à leur qualité (*biodiversité fonctionnelle croissante*) - (Cf. – Tableau 4); ce dossier 2003 concluait, concernant les sols de Touraine (*extrait in extenso*):

“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 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.”

Ces résultats ont été confirmés et précisés pour la ZTH du Brésil central (Cf. Doc. “*La symphonie inachevée du semis direct dans le Brésil central 2008* – L. Séguy, S. Bouzinac, et al.).

Les derniers résultats exposés ici sur des chronoséquences de courte durée (6 ans dans le Berry) avec des entrées carbonées annuelles modestes comprises entre 4 et 6 t/ha/an, montrent une capacité de séquestration de C de 1,3 t/ha/an sur les 6 premières années en sol sablo-argileux qui sont conformes aux résultats espérés ; sur les sols argilo-sableux, très riches en matière organique (*près de 5%*), en voie de saturation en carbone, le différentiel de séquestration de C en faveur des SCV est plus faible, mais reste encore de 0,53 t/ha/an.

Dans les mêmes sols de Touraine qui ont fait l’objet de l’étude 2003, sur des chronoséquences SCV de 12 ans qui bénéficient de très fortes entrées carbonées annuelles, estimées entre 7 et 9 t/ha/an de 12 ans, la capacité de séquestration de C en sol argilo-sableux est de 1,6 t/ha/an ; sur sol très sableux de coteau, avec des entrées carbonées annuelles plus modestes, la capacité de séquestration de C est légèrement supérieure à 1 t/ha/an sur la même période.

Dans tous les cas, on assiste sous SCV, par rapport à la gestion avec labour, à une très forte capitalisation en C et en N organiques dans l’horizon 0-20 cm, qui permet de réduire progressivement et très significativement l’utilisation des intrants chimiques, soit de diminuer à la fois les coûts de production et les impacts environnementaux, pour des productivités des systèmes, en croissance : on peut donc produire plus avec moins d’intrants chimiques sur un sol dont la fertilité s’améliore par voie organo-biologique.

Ces résultats ne sont pas nouveaux pour notre unité de recherche qui a successivement imaginé, créé puis maîtrisé scientifiquement et dans la pratique les systèmes de culture SCV et mis en évidence les lois agronomiques d’applicabilité générale qui président au fonctionnement universel de ces systèmes ; il paraît important aujourd’hui, pour ne pas interrompre les progrès SCV, de voir comment superposer plusieurs courbes exponentielles de séquestration du Carbone ; en effet, lorsque les courbes de séquestration s’amortissent il serait vraiment fondamental tant au plan scientifique que pratique d’étudier comment faire redémarrer une nouvelle courbe exponentielle à partir du début marqué de l’amortissement de la première courbe ; nous savons déjà comment le faire et c’est sans aucun doute un thème

majeur de recherches qui mérite de l'investissement scientifiquement pour sa portée fondamentale au même titre que les modèles de Hénin-Dupuis, puis Powlson et autres auteurs.

Plus étonnant et utile de rappeler ici est l'inertie de la recherche française, qui en est toujours à une capacité de séquestration de C comprise entre 0,1 et 0,33 t/ha/an des sols de France, alors que ces mêmes sols sous SCV pourraient être des puits importants de Carbone ...J'avais, à l'occasion de diverses conférences en France entre 1998 et 2005, suggéré l'intérêt de transformer les primes en incitation à la conversion des pratiques actuelles en SCV (*primes environnementales*) ...alors que le monde entier s'agite sur le thème réduction des gaz à effet de serre, et que le moment est donc très propice à cette conversion.

Parmi les lenteurs et inerties diverses, il est important de rappeler que la recherche scientifique, en restructurations permanentes et de plus en plus spécialisée (*in vitro, in silico*), s'est éloignée très rapidement et dangereusement de la nature qui ne constitue plus pour elle une source d'inspiration prioritaire : « politiquement correcte » et « bien pensante », elle défend à cor et à cris la préservation de la biodiversité et dans le même temps concentre l'essentiel de ses moyens sur la biologie moléculaire au détriment des recherches sur la biodiversité et l'environnement, pour tenter de construire des plantes qui de part leurs multiples fonctions (*dont l'utilité et l'innocuité sont encore à prouver*) conduisent aux grandes monocultures, soit à une réduction rapide de cette même biodiversité ; ce double langage est orchestré par de puissantes multinationales, transnationales, pour qui seul le profit compte et qui prennent progressivement et sûrement le monde agricole de plus en plus en otage, et polluent l'environnement ; les SCV qui ont puisé leur origine et leur mise en œuvre dans la nature (*biodiversité fonctionnelle, multifonctionnalité des systèmes*) montrent au contraire comment reconstruire au moindre coût une biodiversité performante des systèmes de culture et bénéficier ainsi de services éco-systémiques gratuits offerts par la nature dont la liste n'en est qu'à ses débuts (*Cf. doc. « La symphonie inachevée du semis direct dans le Brésil central-2008 »*).

La recherche scientifique est outre, de plus en plus cloisonnée, inapte à traiter des objets complexes tels que les systèmes de culture et de production en harmonie participative avec les acteurs (R-D) ; on ne peut que déplorer que le monde scientifique soit dirigé par des spécialistes pointus qui ont l'écoute du pouvoir, ce qui est contre tout bon sens, dans un monde où infiniment petit et infiniment grand s'éloignent l'un de l'autre à grande vitesse et où à l'évidence la synthèse devrait avoir la prééminence sur l'analyse pour faire mieux appréhender (*vision élargie, multifonctionnelle*), faire fonctionner un monde dont la complexité augmente à vitesse grand V.

Il est donc, à mon sens, urgent de former des PHD systémiques qui pourraient orchestrer ce monde de spécialistes à la vision trop limitée ; le cas de l'agronomie, métier hier pluri disciplinaire par excellence, en voie de disparition rapide, en est un exemple éloquent !

BIBLIOGRAPHIE

- 1- **2004**- Cropping systems, carbon sequestration and erosion in Brazil, a review – M.Bernoux, C.Cerri, C.E.P.Cerri, M.Siqueira Neto et al.
- 2 – **2003**- Agriculture durable: Et si on avait sous estimé le potentiel de séquestration du carbone pour le semis direct ? Quelles conséquences pour la fertilité des sols et la production – L. Séguy, S. Bouzinac, et al . www.agroecologie.cirad.fr
- 3 – **2008** – La symphonie inachevée du semis direct dans le Brésil central – L. Séguy, S Bouzinac, et al . www.agroecologie.cirad.fr

TABLEAU 4 - 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
SUBTROPICALE			
Sud Brésil⁴	Semis Direct sur couverture végétale permanente (SCV)		+0,99 à +1,60
TEMPÉRÉE			
USA¹	Labour x monocultures blé ou maïs	-0,105 à -0,460	
	Labour x Rotations avec plante couverture	-0,033 à -0,065	
	Semis Direct x monocultures blé ou maïs		+0,33 à +0,585
	Semis Direct x Rotations avec plante couverture (SCV)		+0,66 à +1,30
Allemagne²	Agriculture "intégrée"		+0,93
Angleterre	Semis Direct		+0,18 à +0,60
France³	TCS (Techniques Culturelles Simplifiées)		+0,10 à +0,30
TROPICALE (5 premières années)			
Cerrados Brésil⁵	Semis Direct sur couverture végétale permanente (SCV)		+2,18
ZTH⁶: Brésil, Gabon Madagascar	Conventionnel disques (sol plat)	-0,33 à -0,44	
	Conventionnel disques (sol en pente)	-1,00 à 1,40	
	Semis Direct (SCV) intégrant ou non l'élevage		+0,83 à +3,46
Zone Tropicale d'altitude (Madagascar)	Labour x monoculture maïs, soja haricot	-1,00 à -1,40	
	Semis Direct sur couverture végétale permanente diversifiée (SCV)		+1,80 à 3,00

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

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

² Smith et al. (1998).

³ INRA – France (2002).

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

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