

Impact des techniques culturales sans labour (TCSL) sur le bilan énergétique et le bilan des gaz à effet de serre des systèmes de culture

Jérôme Labreuche¹
Afsaneh Lellahi¹
Chloé Malaval¹
Jean-Claude Germon²

¹ ARVALIS-Institut du végétal
91720 Boigneville

France
<j.labreuche@arvalisinstitutduvegetal.fr>
<a.lellahi@arvalisinstitutduvegetal.fr>
<c.malaval@arvalisinstitutduvegetal.fr>

² Inra
UMR 1229 « Microbiologie du sol
et de l'environnement »
Inra/université de Bourgogne
17, rue Sully
BP 86510
21065 Dijon cedex
France
<jc.germon@dijon.inra.fr>

Résumé

Après une synthèse de mesures sur les réductions de consommation de carburant par la mise en place des techniques de culture sans labour (TCSL), un bilan énergétique et un bilan d'émission de gaz à effet de serre (GES) ont été réalisés à partir de l'essai de longue durée de Boigneville (Bassin parisien). Dans cet essai, la réduction de la consommation annuelle de carburants est estimée à 28 L/ha en travail superficiel et à 41 L/ha en semis direct. Ces données sont cohérentes avec les données collectées par ailleurs qui indiquent que, par rapport au labour, un itinéraire technique avec travail superficiel, pratique la plus courante, permet une économie moyenne de 20 L/ha/an dans des sols limoneux ou limono-argileux, valeur qui peut doubler en sols argileux. L'estimation de la diminution de dépenses énergétiques ainsi induite sur l'ensemble des pratiques culturales est de 6 à 11 % : le gain n'est plus que de 1 à 1,5 %, lorsqu'on intègre dans ce bilan l'énergie stockée dans la biomasse récoltée, dont le rendement dans cette situation n'a pas été affecté par la mise en place des TCSL. Les TCSL ont un effet positif sur le bilan d'émission de GES, à travers la réduction de consommation de carburant et l'accroissement du stockage de carbone dans les sols : cet effet bénéfique est amputé par les émissions accrues de N₂O mesurées dans les sols en TCSL. Le bilan global sur ce site indique une réduction d'émissions de l'ordre de 200 kg CO₂/ha/an pour les sols en travail superficiel ou en semis direct. Ce bilan est le solde de flux de carbone et N₂O aux effets contraires et dont on connaît la forte variabilité. De faibles variations pourraient profondément affecter les conclusions des calculs effectués. Avant d'extrapoler de telles données, il apparaît nécessaire de les conforter par des observations complémentaires.

Mots clés : bilan énergétique ; gaz à effet de serre ; labour ; semis direct ; travail du sol.

Thèmes : productions végétales ; ressources naturelles et environnement ; sols.

Abstract

Impact of no-tillage agricultural methods on the energy balance and the greenhouse gas balance of cropping systems

A presentation of different measurements of decreased energy consumption achieved by reduced- or no-tillage is followed by an analysis of the energy balance and greenhouse gas (GHG) emission balance drawn from the long-term trial at Boigneville in the Basin of Paris (France). The estimated decrease in annual fossil fuel consumption was 28 L/ha under superficial tillage and 41 L/ha under direct seeding. These data are consistent with data collected elsewhere which indicate that reduced tillage, as compared with conventional tillage methods, allows an average saving of 20 L/ha/yr of fossil fuel in loamy or silt-clay soils. This saving can be doubled in clay soils. Energy expenditure in the cropping system as a whole was thus reduced by 6 to 11%. The energy saving is much lower (1-1.5%) when the balance includes energy stored in the harvested biomass, as, in this situation, biomass yield is not affected by reduced- or no-tillage practices. Reduced- or no-tillage practices had a positive effect on the balance of GHG emissions by reducing fuel consumption and

Pour citer cet article : Labreuche J, Lellahi A, Malaval C, Germon JC, 2011. Impact des techniques culturales sans labour (TCSL) sur le bilan énergétique et le bilan des gaz à effet de serre des systèmes de culture. *Cah Agric* 20 : 204-15. doi : 10.1684/agr.2011.0492

Tirés à part : J. Labreuche

increasing carbon storage in the soil. However, this beneficial effect was counter-balanced by the increase in N₂O emissions measured under reduced tillage. The overall GHG balance on the site indicated an increase in CO₂ storage of about 200 kg ha/yr under reduced tillage or direct seeding. This resulted from the balance between carbon and N₂O fluxes which have contradictory effects and are known to be extremely variable. Slight variations in these fluxes could strongly modify the conclusions drawn from our observations. Further studies are required to corroborate these data before they can be extrapolated.

Key words: direct sowing; energy balance; greenhouse gases; ploughing; tillage.

Subjects: natural resources and environment; soils; vegetal productions.

Le contexte de changement climatique et la perspective d'une raréfaction des sources d'énergie fossile conduisent à mettre au point des modes de développement économique moins émetteurs de gaz à effet de serre (GES) et plus économes en énergie. En agriculture, les techniques de travail du sol utilisées pour maîtriser le développement des mauvaises herbes et favoriser l'implantation des plantes cultivées sont responsables d'une part importante de la consommation d'énergie par les systèmes de culture. Le développement des techniques de culture sans labour (TCSL) au cours des dernières décennies (Agreste, 2007), destinées initialement à lutter contre différentes formes d'érosion éolienne et hydrique et à limiter les temps de travaux, apparaît comme un moyen de réduire la consommation d'énergie et de peser favorablement sur le bilan de GES des systèmes de culture. L'évaluation de l'impact des méthodes de travail du sol sur les bilans énergétiques et d'émission de GES est devenue un critère écologique et économique à prendre en compte dans l'optimisation des systèmes de production.

Des travaux ont été développés pour évaluer l'impact de différentes techniques simplifiées de travail du sol sur les bilans énergétiques des systèmes de culture, incluant les différents postes de consommation - et de production - d'énergie (Deike *et al.*, 2008 ; Khaledian *et al.*, 2010 ; Rathke *et al.*, 2007), complétés éventuellement par des estimations de la réduction des émissions de CO₂ consécutives à la diminution de consommation de

carburants fossiles. Cependant, l'établissement de bilans de GES nécessite de compléter ces données par la prise en compte des modifications des émissions de CO₂ par le système sol-plante, évaluées principalement par la variation de stock de carbone du sol (Borin *et al.*, 1997) et par les émissions des autres GES, en particulier de N₂O car ce gaz émis en faible quantité par le sol présente un fort potentiel de réchauffement global. Les variations de stocks de carbone et d'émission de N₂O sous l'effet des TCSL font actuellement l'objet d'abondants travaux (Arrouays *et al.*, 2002 ; Six *et al.*, 2002 ; Gregorich *et al.*, 2005 ; Oorts *et al.*, 2007a ; Méty *et al.*, 2009) et de discussions serrées car elles constituent l'un des enjeux environnementaux importants du développement de ces systèmes de culture.

Ces quelques données illustrent le peu de travaux tentant de faire une évaluation globale de l'impact des TCSL comparées au labour traditionnel sur le bilan énergétique et le bilan GES des systèmes de culture. C'est pourquoi nous avons cherché à évaluer l'impact des TCSL (semis direct et techniques de travail superficiel, accompagnés des modifications des techniques culturales qui leur sont liées) comparées aux techniques avec labour sur : i) la consommation de carburants au cours des différentes opérations culturales ; ii) le bilan énergétique global de cultures de céréales ; iii) le bilan d'émissions de gaz à effet de serre de ces mêmes cultures. Dans ce but, nous avons utilisé, d'une part, un ensemble de données sur les consommations de carburants mesurées sur des essais

dans différentes situations agronomiques du territoire français et, d'autre part, des estimations et des mesures réalisées sur les parcelles de l'essai de longue durée de Boigneville (91), portant à la fois sur les consommations de carburant, les rendements des récoltes et différentes caractéristiques du sol impliquées dans l'effet de serre. Cet essai conduit par Arvalis-Institut du végétal, est le seul en France pour lequel nous disposons de données suffisamment complètes pour évaluer simultanément les bilans énergétiques et de GES sur le moyen terme : cette gestion de longue durée permet notamment d'estimer sur plusieurs dizaines d'années les effets sur le stockage de carbone dans le sol et les rendements des récoltes.

Matériel et méthode

Modalités d'établissement des bilans énergétiques et d'émission de GES par les systèmes de culture

Les bilans énergétiques et de GES sont calculés selon une méthodologie similaire à celle utilisée pour les analyses de « cycles de vie » (Van der Werf, 2004). Dans le cas des systèmes de culture, ces bilans sont établis par hectare et regroupent la totalité des dépenses en énergie ou des émissions de GES liées aux productions. Au regard de ces dépenses ou émissions, il est attribué une valeur énergétique ou une valeur carbone à chaque

production. Ce type de calcul peut être fait sur un pas de temps annuel ou pluriannuel.

Bilan énergétique

Les dépenses en énergie d'une culture sont calculées en convertissant chaque intervention technique et chaque produit utilisé ou élaboré en son équivalent énergétique. On comptabilise alors :

- les dépenses directes en énergie lors des interventions techniques : elles se traduisent par un coût énergétique dit de fonctionnement et englobent dans les essais référencés ici les consommations de fioul et de lubrifiants ;
- les dépenses indirectes en énergie lors de la fabrication et du transport d'un intrant agricole ou d'une machine agricole. Ainsi, pour l'engrais, on comptabilise l'énergie dépensée pour l'extraction des matières premières, la fabrication de l'engrais et son transport jusqu'à la ferme ;

Différentes estimations des dépenses d'énergie par opération ont été réalisées (Dalgaard *et al.*, 2001 ; Rathke *et al.*, 2007). Nous utilisons ici un précédent travail (ITCF et Ademe, 1993) actualisé en ce qui concerne les dépenses liées à la fertilisation azotée. La valeur énergétique attribuée à la production végétale récoltée correspond à son contenu énergétique exprimé par le PCI (pouvoir calorifique inférieur) des grains de blé ou de maïs, les résidus de récolte étant laissés sur le sol après récolte.

Bilan des émissions de GES

L'établissement d'un bilan des émissions de GES d'un itinéraire technique vise à prendre en compte l'ensemble des émissions liées à cet itinéraire, en utilisant les coefficients d'équivalence entre gaz basés sur leurs potentiels de réchauffement global (PRG) respectifs (Forster *et al.*, 2007). Ces émissions doivent être considérées sur l'ensemble du cycle annuel et peuvent être décomposées en deux sous-ensembles : celles liées à la mise en place de la culture et aux pratiques agricoles nécessaires à son suivi, et celles liées au fonctionnement du sol et du couvert végétal.

En ce qui concerne les émissions liées à la mise en place et au suivi de la culture, le bilan est calqué, pour

l'essentiel, sur le bilan énergétique et se décompose en émissions directes et en émissions indirectes pour la production concernée :

- les émissions indirectes sont celles qui sont induites par l'élaboration des différents types d'intrants agricoles (semences, produits phytosanitaires, engrais), consommation de carburants fossiles, et par la construction des différentes catégories de machines agricoles utilisées ;
- les émissions directes sont celles directement quantifiables au niveau de l'exploitation ; elles incluent toutes les émissions associées à la consommation de carburants fossiles par le matériel agricole dans son sens le plus large. Les émissions dues à la consommation de biocarburants d'origine agricole ne seraient pas prises en compte dans cette estimation dans la mesure où elles impliquent un recyclage biologique du carbone et ne contribuent pas à l'accroissement de l'effet de serre ;

En ce qui concerne les émissions liées au fonctionnement du sol et du couvert végétal, les bilans reposent en premier lieu sur une évaluation de la variation du stock de carbone organique des sols, qui, sur le moyen terme, est la résultante des échanges de CO₂ entre l'atmosphère et le système sol-plante. Ces bilans doivent être complétés par les autres gaz à effet de serre émis par ce système et convertis en équivalents-CO₂ ou en équivalents carbone : nous avons pris en compte les émissions de protoxyde d'azote (N₂O). En ce qui concerne le méthane, nous avons considéré que ces sols aérés ne sont pas émetteurs et que la capacité d'absorption de ce gaz par le sol est faible et similaire dans les trois traitements (Le Mer et Roger, 2001). Nous n'avons pas pris en compte les émissions de NO_x, indirectement impliquées dans l'effet de serre par leur rôle de précurseurs d'ozone troposphérique.

Pour l'évaluation des émissions directes et indirectes de GES liées aux techniques culturales sur le site de Boigneville, nous faisons appel à une transposition du référentiel énergétique ITCF et Ademe (1993). Nous utilisons par ailleurs un ensemble de données expérimentales obtenues sur ce site et portant sur l'évaluation des émissions de N₂O (Oorts *et al.*, 2007a) et sur le stockage de carbone dans le

sol (Thévenet *et al.*, 2002 ; Métay *et al.*, 2009).

Évaluation de l'impact des TCSL sur la consommation de carburant

L'impact du mode de travail du sol et d'implantation des cultures – labour, travail superficiel, semis direct – sur la consommation de fioul a été évalué par des mesures effectuées sur des tracteurs équipés à cette fin et réalisant différentes opérations de travail du sol et de semis dans deux séries d'essais :

- une première série étalée sur 4 ans, comparant les consommations en fonction de la texture des sols et de leur plus ou moins grande plasticité (ITCF, 1993) ;
- une seconde série d'essais pluri-annuels prenant en compte différentes rotations culturales sur plusieurs sites (ITCF et Ademe, 1993).

Les données ainsi obtenues ont pu être comparées aux données tirées d'enquêtes auprès des milieux professionnels (Le Garrec *et al.*, 2003).

Évaluation de l'impact des TCSL sur les bilans énergétiques et d'émission de GES de l'essai longue durée de Boigneville

Les bilans ont été réalisés à partir de données collectées sur cet essai mis en place à l'automne 1970 (Bodet *et al.*, 1976 ; Boisgontier, 1982 ; Labreuche *et al.*, 2003). Il permet de comparer les effets de trois modes de travail du sol (labour, travail superficiel, semis direct) sur une rotation maïs-blé dans un dispositif en blocs à trois répétitions par traitement. Cet essai est implanté sur un sol brun calcique sur loess (Haplic Luvisol) ; les principales caractéristiques de l'horizon labouré au début de l'expérimentation étaient les suivantes : argile : 22 % ; limon (2-50 µm) 70 % ; sable : 8 % ; carbone organique : 10 mg/g ; N total Kjeldhal : 1,2 mg/g ; CEC : 12,5 cmol / +kg ; pH : 6,1.

Les consommations de carburant et les émissions de GES correspondant aux carburants fossiles consommés par le

matériel de traction ont été évaluées à partir des relevés des itinéraires techniques mis en œuvre (temps de travaux et consommation spécifique de chaque équipement).

Nous disposons des données concernant l'évolution du stock de carbone dans les sols au cours des 30 premières années (Méray *et al.*, 2009) et les émissions de N₂O sur une année (Oorts *et al.*, 2007a).

Itinéraires techniques mis en œuvre

Les trois modes de travail du sol et d'implantation des cultures mis en comparaison ont peu évolué depuis le démarrage de l'essai ; les opérations des itinéraires techniques réalisées sur un cycle cultural sont décrites dans les *tableaux 1 et 2*. Les bilans réalisés n'ont porté que sur des parcelles non irriguées.

Les doses d'azote appliquées sont les mêmes entre les trois traitements, en accord avec les travaux de Oorts *et al.* (2007b) qui indiquent que l'effet du travail du sol sur les disponibilités en azote sur ce dispositif est très limité. L'engrais azoté est apporté en association sous forme de fertilisants NPK, et en complément sous forme d'ammonitrate.

Évaluation de la consommation de carburant

Les consommations de carburant ont été évaluées à partir du barème d'entraide du Bureau de coordination du machinisme agricole (BCMA, Paris). La consommation de fioul est calculée à partir d'une consommation spécifique de 0,22 L/cv/h, de la puissance du tracteur en cv, du temps de travail en h/ha et du taux de charge du moteur en pourcentage. La valeur de 0,22 L/cv/h est applicable aux tracteurs de nouvelle génération avec rampe commune. Les données obtenues avec ce barème sont très proches de celles obtenues avec le logiciel Deltameq d'Arvalis.

Établissement des bilans énergétiques

Nous avons intégré dans les bilans énergétiques, les rendements des cultures qui contribuent à stocker du

CO₂ ou de l'énergie. Les productivités retenues sur l'essai de Boigneville portent sur les campagnes 1978 à 2006 incluses, les rendements antérieurs à 1978 ayant été jugés non représentatifs à la suite de difficultés d'implantation des cultures en semis direct (matériel non adapté). Les rendements en blé sont de 8,33 t/ha après labour, 8,36 t/ha après travail superficiel et 8,30 t/ha après semis direct. Les rendements en maïs sont respectivement de 7,01, 7,03 et 6,98 t/ha.

Stockage de carbone dans les sols

L'évolution des stocks de carbone dans les sols sur la période 1970-1998 a été évaluée sur la base d'une masse de terre de 3 900 t/ha (Thévenet *et al.*, 2002), et est reprise de données publiées par Méray *et al.* (2009).

Émissions de N₂O

Des mesures d'émission de N₂O sur ce dispositif ont été réalisées par Oorts *et al.* (2007a) sur des parcelles en labour et en semis direct ; elles ont permis une extrapolation sur une année entière ; dans le bilan GES on a accepté l'hypothèse que les émissions à partir du sol soumis à un travail superficiel étaient semblables à celles du sol en semis direct.

Résultats et discussion

Impact des TCSL sur la consommation de carburant : synthèse des données collectées au niveau du territoire français

Les mesures réalisées indiquent que les méthodes d'implantation des cultures par TCSL (avec ou sans maintien de certaines opérations de travail du sol) permettent une économie systématique de carburant par rapport aux implantations avec labour. Le gain est cependant très variable : de 11 à 46 litres de fioul/ha/an (*tableau 3*).

En mode de travail superficiel, les économies se situent entre 11 et 23 L/ha/an en sol limoneux ou limono-

argileux, et atteignent 37 L/ha/an en sols argileux. Les données obtenues en semis direct montrent des économies par rapport au labour plus fortes qu'entre travail superficiel et labour. Les gains sont toujours aussi hétérogènes et varient de 26 à 31 L/ha/an pour les sols de texture limoneuse ou limono-argileuse, et à 46 L/ha/an pour les sols argileux. Ces gains plus marqués en sols argileux, qui atteignent parfois 50 à 60 L/ha/an (ITCF, 1982 ; Koeller, 1989 ; ITCF, 1993), sont la conséquence des difficultés de labour de ces sols qui nécessitent dans certains cas d'être retravaillés et affinés après le labour et avant le semis.

Les mesures effectuées sur un ensemble de sols limoneux, limono-argileux ou de rendzines, avec différentes rotations culturales (*tableau 4*) montrent que le type de sol au sein de cette gamme d'essais a peu d'impact sur les effets des TCSL sur les consommations de carburant. L'économie moyenne par rapport au labour est de 14 L/ha/an en travail superficiel et de 21 L/ha/an en semis direct. Les itinéraires avec labour sont les plus consommateurs en fioul pour les cultures de printemps (betteraves, maïs, tournesol, pois) ainsi que pour le colza : cela s'explique par la nécessité de gérer une interculture longue pour les cultures de printemps (précédent blé, voire maïs) avec des labours de sols humides en fin d'hiver nécessitant de retravailler le sol en surface pour implanter la culture suivante dans de bonnes conditions physiques. Pour le semis du colza, les conditions estivales sont parfois très sèches, rendant difficiles les labours et impliquant la nécessité de reprendre plusieurs fois les états structuraux grossiers ainsi créés. Le réseau d'essais (ITCF et Ademe, 1993) montre que la culture de blé est celle où les écarts de consommation de fioul sont les moins importants. L'enquête de Le Garrec *et al.* (2003) confirme que la culture qui permet les plus fortes économies avec les TCSL est le maïs. Les écarts restent cependant équivalents pour le colza et pour le blé, dans un contexte de sols plutôt légers et humides du Centre et de l'Ouest de la France.

L'ensemble de ces données a permis la mise au point d'abaques de consommation de carburant, par type d'opération ainsi que par texture et consistance de sol, et aussi de logiciels

Tableau 1. Itinéraires techniques mis en œuvre sur la culture de maïs dans l'essai longue durée de Boigneville et utilisés pour l'évaluation des consommations de carburants.

Table 1. Crop management systems implemented on the corn crop in the long-term experiment in Boigneville and used for the evaluation of fuel consumption.

Opérations culturales sur maïs	Nombre de passages liés au mode de préparation du sol			Date du passage	Outils utilisés	Puissance du tracteur utilisé (cv)	Temps (h/ha)	Carburant consommé (L/ha)	Poids outil (kg)	Apports d'intrants	
	Labour	Travail superficiel	Semis direct							Produits ou matières actives utilisés	Doses/ha
Désherbage	1	1	1	01-sept	pulvérisateur 24 m 3 000 l	100 CV	0,10	1,0	2 900	Glyphosate	0,72 kg
Préparation du sol		1		01-oct	rotavator 4 m	150cv	0,66	18,0	1 900		
Désherbage			1	01-nov	pulvérisateur 24 m 3 000 l	100 CV	0,10	1,0	2 900	Glyphosate	0,72 kg
Labour	1			20-nov	charrue 5 socs portée	150cv	1,17	32,0	2 290		
Préparation du sol	1			01-avr	vibroculteur 6 m	140 cv	0,28	6,0	1 000		
Désherbage		1	1	10-avr	pulvérisateur 24 m 3 000 l	100 CV	0,10	1,0	2 900	Glyphosate	0,72 kg
Préparation du sol	1	1		15-avr	herse rotative 4 m	120 cv	0,67	14,0	1 690		
Semis	1	1	1	15-avr	semoir maïs 4 rangs	100 CV	1,00	14,0	1 600	Semence	28 kg
Désherbage	1	1	1	15-mai	pulvérisateur 24 m 3 000 l	100 CV	0,10	1,0	2 900	Mésotrione	0,025 kg
Épandage engrais ternaire	1	1	1	15-avr	épandeur centri 24 m 1 200 L	110 cv	0,20	2,0	340	Engrais NPK	60 kg N 40 kg P ₂ O ₅ 40 kg K ₂ O
Épandage engrais azoté	1	1	1	15-mai	épandeur centri 24 m 1 200 L	110 cv	0,20	2,0	340	Ammonitrate	120 kg N
Anti-limace			1	01-mai	distributeur anti-limace	100 CV	0,06	0,5	20	Métaldéhyde	0,25 kg
Désherbage		1	1	15-juin	pulvérisateur 24 m 3 000 L	100 CV	0,10	1,0	2 900	Cycloxydime	0,15 kg
Insecticide	1	1	1	01-juil	pulvérisateur 24 m, 3 000 L	100 CV	0,10	1,0	2 900	Lambda-cyhalothrine	0,0075 kg
					moissonneuse-batteuse 200 CV				22,0		10 000
Récolte	1	1	1	15-oct	benne 12 t	100 CV	0,80	9,0	5 140		
					benne 14 t	100 CV		9,0	5 140		

Tableau 2. Itinéraires techniques mis en œuvre sur la culture de blé dans l'essai longue durée de Boigneville et utilisés pour l'évaluation des consommations de carburants.

Table 2. Crop management systems implemented on the wheat crop in the long-term experiment in Boigneville and used for the evaluation of fuel consumption.

Opérations culturales sur blé	Nombre de passages liés au mode de préparation du sol			Date du passage	Outils utilisés	Puissance du tracteur utilisé (cv)	Temps (h/ha)	Carburant consommé (L/ha)	Poids outil (kg)	Apports d'intrants	
	Labour	Travail superficiel	Semis direct							Produits ou matières actives utilisées	Doses/ha
Rebroyage résidus		1		15-oct	broyeur 4m	145 cv	0,67	15,0	2 280		
Labour	1			15-oct	charrue 5 socs portée	150 cv	1,17	32,0	2 290		
Préparation sol et semis	1			15-oct	herse rotative				1 690		
					semoir	150 cv	0,67	15,0	850	Semence	150 kg
Préparation sol et semis	1			15-oct	rotavator				1 900		
					semoir	150 cv	0,67	18,0	850	Semence	150 kg
Semis			1	15-oct	semoir semis direct	130 cv	0,52	11,0	2 760	Semence	150 kg
Désherbage	1	1	1	15-févr	pulvérisateur 24 m, 3 000 L	100 CV	0,10	1,0	2 900	Mesosulfuron + Iodosulfuron	0,008 + 0,008 kg
Épandage engrais ternaire	1	1	1	01-mars	épandeur centri 24 m 1 200 L	110 cv	0,13	1,0	340	Engrais NPK	60 kg N
											30 kg P ₂ O ₅
											30 kg K ₂ O
Épandage engrais azoté	1	1	1	01-avr	épandeur centri 24 m 1 200 L	110 cv	0,13	1,0	340	Ammonitrate	120 kg N
Régulateur de croissance	1	1	1	01-avr	pulvérisateur 24 m 3 000 L	100 cv	0,10	1,0	2 900	Trinexapac éthyl	0,075 kg
Fongicide	1	1	1	10-avr	pulvérisateur 24 m, 3 000 L	100 cv	0,10	1,0	2 900	Pyraclostrobin Epoconazole	0,066 + 0,025 kg
Fongicide	1	1	1	01-juin	pulvérisateur 24 m, 3 000 L	100 cv	0,10	1,0	2 900	Tebuconazole	0,187 kg
Récolte	1	1	1	15-oct	moissonneuse-batteuse 200 CV				22,0	10 000	
					benne 12 t	100 CV	0,70	9,0	5 140		
					benne 14 t	100 CV		9,0	5 140		

Tableau 3. Consommation moyenne de carburant (fioul, L/ha/an), pour les opérations de travail du sol et de semis, avec des sols de différentes textures et différents états structuraux, selon les trois modes de travail des sols (Essais ITCF ; 1989 à 1993).

Table 3. Average fuel consumption (L/ha/year), for tillage and seedling in soils with different textures and structural states, according to three soil management methods (ITCF trials, 1989 to 1993).

Type de sol	Labour	Travail superficiel	Semis direct
Sol argileux dur	Non mesuré *	18	6
Sol argileux friable	54	19	8
Sol argileux semi-plastique	52	15	6
Sol limono-argileux dur	Non mesuré	11	5
Sol limono-argileux friable	34	13	6
Sol limono-argileux semi-plastique	37	17	6
Sol limoneux battant friable	36	13	6
Sol limoneux battant semi-plastique	31	20	5
Moyenne	40,7	15,7	6
Écart type	9,8	3,2	0,9

Culture de blé avec un précédent maïs grain ; Labour = labour + préparation de lit de semence ; Travail superficiel = Sémavator sans broyage des résidus ; Semis direct = semoir à disques sans broyage ; la dureté ou la plasticité du sol font référence à son état plus ou moins sec.

* Labour impossible.

Tableau 4. Consommation moyenne de carburant (fioul, L/ha/an), pour les opérations de travail du sol et de semis, en fonction du mode de travail de sols de textures différentes et pour différentes rotations culturales (essais ITCF-Ademe, 1990 à 1993).

Table 4. Average fuel consumption (L/ha/year) for tillage and seeding in soils with different textures and crop rotations and submitted to 3 different modes of management (ITCF-Ademe, trials, 1990 to 1993).

Localisation	Sol	Rotation	Labour	Travail superficiel	Semis direct
Coudray (45)	Limon argileux	B-BI-C-BI-P-BI-T-BI	27	18	9
La Jaillière (44)	Limon drainé	C-BI-L-BI-T-BI-P-BI	33	23	19
Le Magneraud (17)	Rendzine *	MG-MG	44	23	21
Le Magneraud (17)	Rendzine *	P-BI-T-BI	37	24	14
Parisot (81)	Limon drainé	MG-S	36	17	9
Suscy (77)	Limon sain	B-BI-P-BI-C-BI	40	25	20
Moyenne			36,2	21,7	15,3
Écart type			5,9	3,3	5,5

B = betterave sucrière ; BI = blé ; C = colza ; L = lupin ; MG = maïs grain ; P = pois ; S = soja ; T = tournesol.

* rendzine ou sol argilo-calcaire superficiel.

tels que le logiciel « DELTAMEQ » mis au point par Arvalis-Institut du végétal.

Impact des TCSL sur le bilan énergétique des systèmes de culture de l'essai longue durée de Boigneville

Les consommations de carburant estimées à partir des itinéraires techniques mis en œuvre pour l'essai de Boigneville (*tableau 5*) sont sensiblement supérieures à celles mentionnées précédemment du fait de la prise en compte de l'ensemble des opérations culturales comptabilisées au cours de l'année ; les écarts de consommation sont estimés respectivement à 28 et 41 L/ha/an entre l'itinéraire technique avec labour et ceux avec travail superficiel ou avec semis direct. Ils sont dans la fourchette des valeurs observées précédemment comparant les sols de différentes textures (*tableau 3*). L'écart entre le labour et le travail superficiel est en accord avec les valeurs pour les sols limono-argileux ; concernant le semis direct, il est intermédiaire entre les sols limono-argileux et les sols argileux. Les bilans des dépenses énergétiques estimées sur ce même dispositif expérimental (*tableau 6*) se situent dans la fourchette des valeurs rencontrées dans la littérature ; les valeurs de 13 000 à 15 000 MJ/ha/an sont légèrement supérieures aux valeurs données par Deike *et al* (2008) sur des dispositifs du Nord de l'Europe. Elles sont identiques à celles obtenues dans le Sud de la France par Khaledian *et al.* (2010), déduction faite des consommations liées à l'irrigation. Ces don-

nées indiquent que les TCSL permettent de réduire l'ensemble des dépenses énergétiques de 6 à 11 %. Cela s'explique par une réduction importante des dépenses liées à la mécanisation, qui atteint 41 %. En revanche, l'absence d'impact sur le poste fertilisation, qui représente à lui seul 65 % des dépenses énergétiques totales, limite la portée des TCSL sur cet ensemble des dépenses énergétiques : ce poste aurait représenté une part encore plus importante si l'azote avait été apporté sous forme de solution azotée. En revanche, l'augmentation des dépenses de produits phytosanitaires pèse faiblement sur l'ensemble de ce bilan.

Le *tableau 7* établit le bilan énergétique des systèmes de culture de la rotation maïs-blé faisant usage des trois modes de travail du sol. Il repose sur le solde entre les dépenses d'énergie pour conduire les cultures et l'énergie produite et stockée dans les grains à la récolte. Ce tableau fait ressortir des productions d'énergie comparables dans les trois situations de travail du sol, conséquence des rendements équivalents : ce constat, basé sur une moyenne d'observations sur 30 ans est une conclusion forte de cette expérimentation de longue durée, en contradiction avec certaines indications de la littérature montrant des baisses de production en systèmes TCSL (Borin *et al.*, 1997 ; Deike *et al.*, 2008). Ce maintien des rendements est vraisemblablement dû aux bonnes conditions d'implantation des cultures dans ce type de sol limono-argileux sous climat tempéré, y compris en conditions de semis direct. En conséquence de ces rendements équivalents et d'une diminution des dépenses énergétiques, les TCSL per-

mettent d'améliorer le bilan énergétique des systèmes de culture. Les écarts sont cependant modestes (1 à 1,5 % du total), du fait du rôle atténuateur de la valeur énergétique de la production végétale dans ce bilan. Ce calcul montre que dans le cas présent l'économie d'énergie permise par les TCSL ne se fait pas au détriment de la capacité de production d'énergie par les cultures elles-mêmes.

Impact des TCSL sur le bilan carbone du sol et le bilan des émissions de GES des systèmes de culture de l'essai longue durée de Boigneville

Au cours de la période 1970-1998, les stocks de carbone des sols de l'expérimentation de Boigneville sont passés de 39,9 à 42,7 t C/ha avec le labour, de 39,9 à 45,6 t C/ha avec le travail superficiel et de 40,3 à 45,5 t C/ha en semis direct. Cela représente respectivement une augmentation moyenne annuelle de 99, 205 et 187 kg C/ha/an. Comparé au labour, le travail superficiel a évité le rejet atmosphérique de 106 kg C/ha/an sur cette durée de 30 ans ; le semis direct donne une valeur sensiblement équivalente de 88 kg C/ha/an. Ces valeurs sont dans la partie basse des valeurs de stockage de carbone de la littérature internationale actuellement sujettes à discussion (Arrouays *et al.*, 2002 ; Méty *et al.*, 2009) ; elles confortent l'idée que sous nos conditions naturelles le stockage de carbone par les sols en TCSL est faible, et certainement plus faible que ce que l'on a pu prétendre (Bellamy

Tableau 5. Consommation de carburant (en L/ha/an) estimée à partir de l'ensemble des opérations techniques mises en œuvre au cours du cycle cultural avec les trois modes de travail du sol de l'essai de Boigneville et les systèmes de culture correspondants.

Table 5. Fuel consumption (L/ha/year) estimated from the entire technical operations implemented during the crop cycle with 3 modes of soil management on the Boigneville field experimentation and its cropping system.

Culture	Labour	Travail superficiel	Semis direct
Maïs	99	82	60
Blé	90	51	48
Rotation maïs-blé	95	67	54

Tableau 6. Dépenses énergétiques (MJ/ha/an) en fonction des trois modes de travail du sol de l'essai de Boigneville et des systèmes de culture correspondants basés sur une rotation maïs-blé.

Table 6. Energy consumption (MJ/ha/year) with the three modes of soil management on the Boigneville field experimentation and its cropping system based on a wheat-corn rotation.

Culture	Postes de consommation	Labour	Travail superficiel	Semis direct
Maïs	Mécanisation	4 857	4 141	3 049
	Engrais	9 672	9 672	9 672
	Phytoprotecteurs	222	479	778
	Semences	344	344	344
	Total	15 096	14 636	13 843
Blé	Mécanisation	4 406	3 127	2 426
	Engrais	9 423	9 423	9 423
	Phytoprotecteurs	73	73	73
	Semences	519	519	519
	Total	14 421	13 142	12 441
Rotation maïs-blé	Mécanisation	4 632	3 634	2 738
	Engrais	9 548	9 548	9 548
	Phytoprotecteurs	148	276	426
	Semences	431	431	431
	Total (MJ/ha/an)	14 758	13 889	13 142
	Total (%)	100,0	94,1	89,0

et al., 2005 ; Constantin *et al.*, 2010 ; Powlson *et al.*, 2011).

En ce qui concerne les émissions de N₂O, les mesures obtenues sur ce dispositif (Oorts *et al.*, 2007a), sont de 0,80 kg N-N₂O/ha/an à partir du sol labouré et de 1,32 kg N-N₂O/ha/an pour le semis direct. Ces valeurs issues d'un nombre limité de mesures entachées d'une très forte variabilité spatiale et temporelle sont dans la partie basse des données d'émission en sols cultivés (Hénault *et al.*, 1998 ; Rochette, 2008) : la différence entre sol labouré et sol en semis direct est cependant conforme aux ordres de grandeur de la littérature (Nicolardot et Germon, 2008). En équivalent carbone, cela représente respectivement 102 et 168 kg C/ha/an. Pour la suite, en absence de mesure sur le sol en travail superficiel nous avons considéré que les émissions à partir de ce dernier traitement sont semblables à celles du semis direct.

Le regroupement des éléments précédents (tableau 8) indique qu'au niveau du sol, l'effet favorable du stockage de carbone observé avec les TCSL peut être en grande partie, sinon totalement, gommé par l'effet défavorable des émissions de N₂O.

Au niveau des opérations liées à la conduite des cultures, les TCSL permettent une nette réduction des émissions de CO₂ liées à la mécanisation (tableau 9) : dans le cas du semis direct cette réduction est estimée à 42 % par rapport au labour. Cette forte baisse est atténuée par les autres émissions de CO₂ liées à la conduite des cultures et ne représente finalement que 6 à 8 % de l'ensemble des émissions pour les deux formes de TCSL prises en considération. En effet, le poste fertilisation, qui représente 76 % du total des émissions, n'est pas modifié par le mode de travail du sol du fait du maintien de rendements

équivalents dans les trois traitements de ce dispositif. Exprimée en valeur absolue, la baisse des émissions de CO₂ par rapport au labour représente 115 kg de CO₂/ha/an dans le cas du semis direct et 82 kg de CO₂/ha/an dans le cas du travail superficiel.

Si l'on introduit dans ce bilan les augmentations de stocks de carbone du sol et les émissions de N₂O (tableau 8) converties en émissions de CO₂, les effets bénéfiques du stockage de carbone sont de l'ordre de 3 à 4 fois supérieurs à ceux de la réduction de la consommation de carburants auxquels ils s'ajoutent : ils sont atténués par l'augmentation d'émission de N₂O. Finalement, on observe que dans la situation étudiée les TCSL améliorent le bilan d'émissions de GES de l'ordre de 200 kg de CO₂/ha/an (tableau 10), ce qui représente une réduction de 13 à 16 % des émissions par rapport au

Tableau 7. Bilan énergétique en fonction des trois modes de travail du sol de l'essai de Boigneville et des systèmes de culture correspondants basés sur une rotation maïs-blé (en MJ/ha/an).

Table 7. Energy balance (MJ/ha/year) with the three modes of soil management on the Boigneville field experimentation and its cropping system based on a wheat-corn rotation.

	Labour	Travail superficiel	Semis direct
Dépense maïs	- 15 096	- 14 636	- 13 843
Production maïs	101 645	101 935	101 210
Dépense blé	- 14 421	- 13 142	- 12 441
Production blé	119 119	119 548	118 690
Dépense moyenne maïs-blé	- 14 758	- 13 889	- 13 142
Production moyenne maïs-blé	110 382	110 742	109 950
Bilan énergétique total (MJ/ha/an)	95 624	96 853	96 808
Bilan énergétique global (%)	100,0	101,3	101,2

labour : cet effet bénéfique est cependant sensiblement inférieur à des données plus optimistes de la littérature (Borin *et al.*, 1997 ; Robertson *et al.*, 2000), fondées sur des capacités de stockage de carbone nettement supérieures à qui sont celles observées sur cet essai. Il convient de rappeler que ces données optimistes sur le stockage de carbone par le sol ont tendance à être revues à la baisse, notamment sous nos conditions environnementales (Constantin *et al.*, 2010 ; Powlson *et al.*, 2011) et illustrent la nécessité de données complémentaires.

Conclusion

Les bilans énergétiques et d'émission de gaz à effet de serre présentés sont estimés à partir du dispositif expérimental de Boigneville, seul dispositif expérimental de longue durée en France permettant de disposer des données nécessaires à l'établissement de tels bilans : cela incite à la prudence quant à la généralisation de nos conclusions.

La méthodologie utilisée repose sur l'assemblage de données de plusieurs sources : une évaluation des temps de

travaux et un calcul des consommations de carburants reposent sur des données de référence qui ont pu être comparées à un ensemble de mesures directes ; une évaluation moyenne des rendements des récoltes et de l'évolution des stocks de carbone du sol sur une trentaine d'années ; et une première estimation des émissions de N₂O à partir de mesures ponctuelles extrapolées sur une année.

De cet assemblage de données et de son analyse, nous retiendrons les points suivants :

- la mise en place de TCSL conduit à une réduction significative de la consommation de carburant consécutive à la réduction des travaux de traction : les estimations obtenues, - 28 L/ha/an en système avec travail superficiel, et 41 L/ha/an en système de semis direct, - se situent dans la fourchette de 20 à 40 % d'économie de carburant sur le cycle annuel mentionnée par les professionnels ;
- cette économie est d'un poids relatif plus faible si l'on prend en considération le bilan portant sur l'ensemble des consommations d'énergie liées à la culture, notamment l'énergie nécessaire à l'élaboration des produits fertilisants ;
- si l'on prend en considération la valeur énergétique de la biomasse formée, le bilan reste faiblement favorable dans ce système TCSL où les rendements des récoltes n'ont pas été affectés par cette pratique : il

Tableau 8. Bilan carbone du sol, prenant en compte le stockage de carbone et les émissions de gaz à effet de serre (GES) au niveau du sol avec les 3 modes de gestion du sol et les systèmes de culture correspondants de l'essai de Boigneville (en kg C/ha/an).

Table 8. Soil C balance (kg C/ha/year) taking into account C storage and greenhouse gas (GHG) emissions with the 3 modes of soil management and the corresponding cropping systems in the Boigneville field experimentation.

	Labour	Travail superficiel	Semis direct
Stockage de carbone*	99	205	187
Émissions de N ₂ O*	- 102	- 168**	- 168
Total	- 3	37	19

* : le stockage de carbone est évalué à partir du suivi sur 30 ans ; les émissions de N₂O sont évaluées à partir de mesures ponctuelles sur une année et sont considérées équivalentes en semis direct et en travail superficiel ; les émissions de CH₄ ont été considérées comme négligeables.

** : valeur estimée égale à celle observée avec le semis direct.

Tableau 9. Estimation des émissions de gaz à effet de serre (GES) (en kg de CO₂/ha/an) en fonction des trois modes de travail du sol lors des opérations de conduite des cultures de l'essai de Boigneville basé sur une rotation maïs-blé.

Table 9. Estimated greenhouse gas (GHG) emissions (kg CO₂/ha/year) with the three modes of soil management and the corresponding cropping systems based on a wheat-corn rotation in the Boigneville field experimentation.

Culture	Postes d'émission	Labour	Travail superficiel	Semis direct
Maïs	Mécanisation	317	267	197
	Engrais	1 114	1 114	1 114
	Phytosanitaires	7	15	27
	Total	1 463	1 422	1 364
Blé	Mécanisation	288	165	157
	Engrais	1 100	1 100	1 100
	Phytosanitaires	2	2	2
	Total	1 465	1 342	1 334
Rotation maïs-blé	Mécanisation	302	216	177
	Engrais	1 107	1 107	1 107
	Phytosanitaires	5	8	15
	Total kg (CO₂/ha/an)	1 464	1 382	1 349
	Total (%)	100	94	92

Tableau 10. Estimation des émissions de gaz à effet de serre (GES) par les cultures et le sol (en kg de CO₂/ha/an) et émissions comparées (en %) en fonction des trois modes de travail du sol dans les systèmes de culture de l'essai de Boigneville sur la base d'une rotation maïs-blé.

Table 10. Estimated greenhouse gas (GHG) emissions from crops and soil (kg CO₂/ha/year), and emission comparison (%) according to the three modes of soil management and the corresponding cropping systems based on a wheat-corn rotation in the Boigneville field experimentation.

	Labour	Travail superficiel	Semis direct
Émission maïs	1 463	1 422	1 364
Émission blé	1 465	1 342	1 334
Stockage carbone sol	- 363	- 752	- 686
Émissions N ₂ O sol	374	616	616
Émissions CH ₄ sol	0	0	0
Émission cultures	1 464	1 382	1 349
Stockage sol	11	-136	- 70
Solde	1 475	1 246	1 279
Émissions comparées des systèmes de culture (%)	100,0	84,5	86,7

pourrait ne plus l'être si ces TCSL s'accompagnaient d'une diminution de ces rendements ;

– l'économie d'énergie liée à la moindre consommation de carburants fossiles a un effet favorable sur le bilan d'émission de GES, mais celui-ci peut être compensé par une faible augmentation des émissions de N₂O souvent mentionnée avec les TCSL ;

– les marges de progrès par les TCSL tant en termes de bilan énergétique que de bilan effet de serre sont étroites : la variabilité des effets mesurés, qui se superpose ou s'ajoute à celle des facteurs du milieu, fait que l'on peut facilement passer d'un effet favorable à un effet défavorable ;

– avec ce travail, nous confortons l'idée développée dans un précédent article (Métyay *et al.*, 2009), fortement étoffée par Constantin *et al.* (2010), et reprise par nos collègues anglais (Powlson *et al.*, 2011), à savoir que le restockage de carbone dans les sols, et l'effet favorable sur le bilan effet de serre des systèmes de culture, consécutifs au développement des techniques sans labour en conditions de climat tempéré, sont plus faibles que ce qu'ont laissé espérer les publications très optimistes des années 2000 ;

– en matière de bilans d'énergie et de GES des systèmes de culture, il convient cependant de mentionner que d'autres voies d'amélioration demandent à être évaluées avec la démarche développée ici : le poids important des produits fertilisants dans ces bilans conduit notamment à spéculer sur l'effet favorable que pourrait apporter un plus grand usage de la fixation d'azote biologique. Il en est de même d'autres techniques en fort développement, telles les cultures dérobées ou les cultures sous couverts ; ■

Remerciements

Cet article a été le support d'une communication lors de la séance de l'Académie d'agriculture de France du 10 juin 2009 intitulée « Développement des techniques de cultures sans labour (TCSL) : implications agronomiques et environnementales ».

Références

Agreste, 2007. Dans le sillon du non-labour. Un tiers des grandes cultures semées en 2006 sans retournement des sols. *Agreste Primeur* : (207).

Arrouays D, Balesdent J, Germon JC, Jayet PA, Soussana JF, Stengel P, eds, 2002. *Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Expertise collective*. Paris : Inra [Téléchargeable sur www.inra.fr].

Bellamy PH, Loveland PJ, Bradley RI, Lark RM, Kirk GJD, 2005. Carbon losses from soils across England and Wales. *Nature* 437 : 245-8.

Bodet JM, Nolot JM, Perroy J, Fourbet JF, 1976. *Présentation des essais*. Actes du colloque ITCF « Simplification du travail du sol en production céréalière », 1976.

Boisgontier D, 1982. Matière organique, simplification du travail du sol et irrigation. *Perspectives Agricoles* 6 : 16-23.

Borin M, Menini C, Sartori L, 1997. Effects of tillage systems on energy and carbon balance in north-eastern Italy. *Soil Till Res* 40 : 209-26.

Constantin J, Mary B, Laurent F, Aubrion G, Fontaine A, Kerveillant P, Beaudoin N, 2010. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agric Ecosyst Environ* 135 : 268-78.

Dalgaard T, Halberg N, Porter JR, 2001. A model for fossil energy use in Danish agriculture used to compare organic and conventional farming. *Agric Ecosyst Environ* 87 : 51-65.

Deike S, Pallutt B, Melander B, Strassemeyer J, Christen O, 2008. Long-term productivity and environmental effects of arable farming as affected by crop rotation, soil tillage intensity and strategy pesticide use. A case-study of two long-term field experiments in Germany and Denmark. *Eur J Agronomy* 29 : 191-9.

Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, Bernsten T, Betts R, Fahey DW, *et al.*, 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In : *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*. Cambridge (Great Britain) : Cambridge University Press.

Gregorich EG, Rochette P, VandenBygaart AJ, Angers DA, 2005. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in eastern Canada. *Soil Till Res* 83 : 53-72.

Hénault C, Devis X, Page S, Justes E, Reau R, Germon JC, 1998. Nitrous oxide emission under different soil and land management conditions. *Biol Fertil Soils* 26 : 199-207.

ITCF, 1982. *Compte rendu des essais de Boigneville, Bougy les Neuville, Champcevrains et Nangeville*. Boigneville (France) : ITCF.

ITCF, 1993. *Banc d'essai d'outils de travail du sol et de semis*. Boigneville (France) : ITCF.

ITCF ; Ademe, 1993. *Compte rendu des essais simplification du travail du sol et économie d'énergie*. Boigneville (France) : ITCF ; Ademe.

Khaledian MR, Mailhol JC, Ruelle P, Mubarak I, Perret S, 2010. The impact of direct seeding into mulch on the energy balance of crop production

system in the SE of France. *Soil Till Res* 106 : 218-26.

Koeller K, 1989. Machinery requirements and possible energy savings by reduced tillage. *European Report* 11258 : 7-16.

Labreuche J, Couture D, Bodet JM, 2003. Essai travail du sol de longue durée de Boigneville. *Perspectives Agricoles* 286 : 56-8.

Le Garrec L, Degraeve C, Fossard A, 2003. *Troisième rapport annuel de l'étude économique et environnementale sur un référentiel d'exploitations en techniques culturales simplifiées en France*. Rapport Inra-Apad.

Le Mer J, Roger PA, 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils : a review. *Eur J Soil Biol* 37 : 25-50.

Métyay A, Mary B, Arrouays D, Martin M, Nicolardot B, Germon JC, 2009. Effets des techniques culturales sans labour (TCSL) sur le stockage de carbone dans le sol. *Can J Soil Sci* 89 : 623-34.

Nicolardot B, Germon JC, 2008. Émissions de méthane (CH₄) et d'oxydes d'azote (N₂O et NO_x) par les sols cultivés : aspects généraux et effet du non travail du sol. *Etudes et Gestion des Sols* 15 : 171-82.

Oorts K, Merckx R, Gréhan E, Labreuche J, Nicolardot B, 2007a. Determinants of annual fluxes of CO₂ and N₂O in long-term no-tillage and conventional tillage systems in northern France. *Soil Till Res* 95 : 133-48.

Oorts K, Laurent F, Mary B, Thiébeau P, Labreuche J, Nicolardot B, 2007b. Experimental and simulated soil mineral N dynamics for long-term tillage systems in northern France. *Soil Till Res* 94 : 441-56.

Powlson DS, Whitmore AP, Goulding KWT, 2011. Soil carbon sequestration to mitigate climate change : a critical re-examination to identify the true and the false. *Eur J Soil Sci* 62 : 42-55.

Rathke GW, Wienhold BJ, Wilhelm WW, Diepenbrock W, 2007. Tillage and rotation effect on corn-soybean energy balances in eastern Nebraska. *Soil Till Res* 97 : 60-70.

Robertson GP, Paul EA, Harwood RR, 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to radiative forcing of the atmosphere. *Science* 289 : 1922-5.

Rochette P, 2008. No-till only increases N₂O emissions in poorly aerated soils. *Soil Till Res* 101 : 97-100.

Six J, Feller C, Denef K, Ogle SM, de Moraes Sa JC, Albrecht A, 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils. Effects of no-tillage. *Agronomie* 22 : 755-75.

Thévenet G, Mary B, Wylleman R, 2002. Carbon sequestration and soil cultivation in temperate climate: results of a 30 years' experimentation of arable crops. *CR Acad Agr Fr* 88 : 71-8.

Van der Werf HMG, 2004. Life cycle analysis of field production of fibre hemp, the effect of production practices on environmental impacts. *Euphytica* 140 : 13-23.