



HAL
open science

Effets des techniques culturales sans labour sur le stockage de carbone dans le sol en contexte climatique tempéré

Aurélie Metay, Bruno B. Mary, Dominique Arrouays, Jérôme Labreuche, Manuel Pascal Martin, Bernard Nicolardot, Jean-Claude Germon

► **To cite this version:**

Aurélie Metay, Bruno B. Mary, Dominique Arrouays, Jérôme Labreuche, Manuel Pascal Martin, et al.. Effets des techniques culturales sans labour sur le stockage de carbone dans le sol en contexte climatique tempéré. Canadian Journal of Soil Science, 2009, 89 (5), pp.623 - 634. <10.4141/CJSS07108>. <hal-01862332>

HAL Id: hal-01862332

<https://institut-agro-dijon.hal.science/hal-01862332v1>

Submitted on 29 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Effets des techniques culturales sans labour sur le stockage de carbone dans le sol en contexte climatique tempéré

Aurélie Metay^{1,2}, Bruno Mary³, Dominique Arrouays⁴, Jérôme Labreuche⁵, Manuel Martin⁴, Bernard Nicolardot⁶, et Jean-Claude Germon⁷

¹ISTOM, 32 bd du Port 95094 Cergy-Pontoise cedex 5, France; ²IRD UR SeqBio 2 place Viala, Bâtiment 12, 34060 Montpellier cedex 1, France; ³Unité d'Agronomie de Laon, INRA, Reims, Mons, Rue Fernand Christ, 02007 Laon cedex, France; ⁴Unité InfoSol, INRA, 2163 avenue de la Pomme de Pin, BP 20619 Ardon, 45166 Olivet cedex, France; ⁵ARVALIS-Institut du Végétal, 91720 Boigneville, France; ⁶UMR BGA, ENESAD/INRA /Université de Bourgogne, 26 Bd Docteur Petitjean, BP 87999, 21079 Dijon cedex, France; and et ⁷UMR 1229 Microbiologie du Sol et de l'Environnement, CMSE INRA/Université de Bourgogne, 17 rue Sully, BP 86510, 21065 Dijon cedex, France. Reçu le 26 novembre 2007, acceptée 23 juin 2009.

Metay, A., Mary, B., Arrouays, D., Labreuche, J., Martin, M., Nicolardot, B. et Germon, J.-C. 2009. **Effets des techniques culturales sans labour sur le stockage de carbone dans le sol en contexte climatique tempéré**. *Can. J. Soil Sci.* **89**: 623–634. En régions de climat tempéré, les terres cultivées ont un potentiel de stockage de carbone que l'on peut tenter d'utiliser pour réduire d'autant les émissions de CO₂ atmosphérique par des pratiques culturales adaptées et notamment par les techniques culturales sans labour (TCSL). Cette capacité de stockage de carbone dans le sol a été évaluée sur l'essai de longue durée de Boigneville (Bassin de Paris, France) et a été comparée aux données de la littérature internationale. Le suivi du stock de carbone du sol sous une rotation maïs-blé indique une tendance à un stockage modéré tant en système labouré (0,10 t C ha⁻¹ an⁻¹ sur 28 ans) qu'en TCSL (respectivement 0,21 t et 0,19 t C ha⁻¹ an⁻¹ pour le travail superficiel et le semis direct sur cette même période). Avec une absence de différence significative entre le semis direct et le travail superficiel, l'effet spécifique moyen des TCSL évalué à 0,10 t C ha⁻¹ an⁻¹ sur 28 ans apparaît sensiblement plus faible que celui mesuré sur les 20 premières années et évalué à 0,20 t C ha⁻¹ an⁻¹. Ces valeurs, inférieures à d'autres valeurs largement diffusées par ailleurs, et cette variation décroissante de la capacité de stockage avec la durée de TCSL sont cohérentes avec la tendance moyenne observée à partir d'un large échantillonnage de données de la littérature internationale. L'évolution de ce stockage de carbone est discutée en lien avec les indications sur l'évolution du stock de carbone des sols de cette même région, les indicateurs de stockage potentiel, et les implications liées à l'évolution du climat.

Mots clés: Techniques de culture sans labour, travail superficiel, semis direct, stockage de carbone, séquestration, mitigation, gaz à effet de serre, essai de longue durée, climat tempéré

Metay, A., Mary, B., Arrouays, D., Labreuche, J., Martin, M., Nicolardot, B. and Germon, J.-C. 2009. **Effects of reduced or no tillage practices on C sequestration in soils in temperate regions**. *Can. J. Soil Sci.* **89**: 623–634. Cultivated soils in temperate regions have the potential for carbon storage, which can be used to limit CO₂ emissions with the aid of adapted agricultural practices, and, more particularly, with no-tillage techniques. The C storage capacity was evaluated over a long-term experiment in Boigneville (Basin of Paris, France) and results compared with data from the international literature. The evolution of soil carbon storage under a corn-wheat rotation indicates a tendency for moderate carbon storage under plowed systems (0.10 t C ha⁻¹ yr⁻¹ for 28 yr), reduced tillage or no tillage systems (0.21 t and 0.19 t C ha⁻¹ yr⁻¹, respectively, for the same period). With no significant difference between direct seeding and reduced tillage, the average effect of these techniques is estimated to be 0.10 t C ha⁻¹ yr⁻¹ for 28 yr. This, however, appears to be moderately lower than the 0.20 t C ha⁻¹ yr⁻¹ estimated for the first 20 yr. The C storage values we have found, showing decreasing storage capacity over time, are consistent with the average tendency drawn from data based on an extensive review of the international literature. In this paper we discuss soil C sequestration, its potential level and the role of climate change in the context of soils from the same region.

Key words: No-tillage, reduced tillage, carbon storage, sequestration, mitigation, greenhouse gas, long term plot, temperate climate

Au niveau planétaire le stock de carbone organique des sols est estimé à 1560 10⁹ t (IPCC 2001), soit le double

du carbone atmosphérique (730 10⁹ t). Une forte proportion de ce carbone est retenue dans les sols continuellement cultivés qui couvrent environ 700 10⁶ ha. Toute modification de la gestion de ces sols peut perturber le cycle de la matière organique (MO) et induire des pertes ou des gains de carbone stocké. Les

Auteur correspondant : Jean Claude Germon (courriel: jc.germon@dijon.inra.fr)

pertes sont principalement attribuables à la mise en cultures des sols qui accélère la minéralisation du carbone organique (Arrouays et Péliissier 1994 ; Jolivet et al. 1997), et augmente les émissions de CO₂ vers l'atmosphère. Inversement, on peut observer un enrichissement en matière organique du sol (MOS) sous l'effet d'apports qui se décomposent à une vitesse plus lente que le flux d'entrée. Ainsi, le sol peut jouer un rôle de source ou de puits de carbone en interaction avec la composition de l'atmosphère, en fonction de régulations dont certaines sont sous contrôle anthropique telles que le niveau et la qualité des restitutions organiques, les modes d'utilisation des terres et les pratiques culturales (Lal 1997). Dans le contexte de changement climatique et de mise en place de mesures susceptibles d'atténuer l'effet de serre, la question de l'évolution du stock de carbone du sol et des possibilités de l'augmenter pour compenser une part des émissions de CO₂ demeure une question d'actualité (Paustian et al. 2000 ; Arrouays et al. 2002 ; Smith et al. 2005 ; IPCC 2007).

Parmi les modes de gestion des sols ou des systèmes de culture susceptibles d'augmenter le stock de carbone du sol, les techniques culturales sans labour (TCSL) occupent une place particulière aux plans agronomique et environnemental. Développées en Amérique du Nord à partir du milieu du XXe siècle pour endiguer l'érosion des sols, ces TCSL ont pris une large ampleur à travers le monde, notamment en Australie, au Brésil et en Argentine. En France, ces méthodes ont eu un succès limité jusqu'aux années 90 et connaissent depuis un fort développement sous l'effet d'une extensification des exploitations agricoles et d'une nécessaire réduction des temps de travaux, avec en perspective un éventuel effet favorable sur le stock de carbone organique et la préservation de l'état physique des sols : elles couvrent actuellement plus d'un tiers des surfaces cultivées en céréales (Labreuche, 2008).

Dans le cadre de la mise en oeuvre du Protocole de Kyoto et de l'estimation de la contribution de l'agriculture aux émissions de gaz à effet de serre (GES), l'évaluation de l'impact des TCSL sur les émissions de CO₂ et des autres GES fait l'objet de différents débats scientifiques.

(i) Sur la méthode d'estimation de la contribution du sol aux émissions de CO₂.

Bien que dans la période qui suit le labour on observe en général des émissions de CO₂ supérieures à celles des sols en TCSL (Reicosky et Lindstrom 1993 ; Dao 1998 ; Kessavalou et al. 1998 ; Alvarez et al. 2001 ; Al-Kaisi et Yin 2005), il n'y a pas de consensus sur les effets à moyen terme du labour sur ces émissions. Ces flux peuvent être plus grands sous TCSL que sous labour (Hendrix et al. 1998), identiques (Fortin et al. 1996 ; Kessavalou et al. 1998 ; Aslam et al. 2000) ou plus

grands à certaines périodes et plus petits à d'autres (Ball et al. 2000 ; Vinten et al. 2002). Cela conduit à évaluer l'effet du labour ou des TCSL sur les émissions de CO₂ à travers les bilans de carbone organique des sols qui intègrent les fluctuations d'émission sur le moyen terme, méthode qui, malgré les incertitudes de mesure, apparaît la plus fiable pour évaluer les échanges de carbone entre le sol et l'atmosphère.

(ii) Sur la localisation et les formes de carbone à prendre en compte

La MOS provient principalement des résidus végétaux dont les apports et les transformations sont variables selon le type de couvert végétal, les sols et le climat. En général, les 20 premiers centimètres de sol concentrent plus de la moitié du carbone du premier mètre et sont le siège de 80% des flux : cela conduit à évaluer les bilans de carbone dans les sols sur une épaisseur au moins égale ou légèrement supérieure à la profondeur des labours anciens ou actuels les plus profonds. On fait ainsi l'hypothèse, implicite et discutable, que le labour ou les TCSL n'ont pas d'effet sur les horizons plus profonds. Pour caractériser l'impact des TCSL sur la dynamique de cette MOS on est amené à distinguer différents compartiments de carbone (libre, particulière ou associé aux micro-agrégats et aux macro-agrégats) dont les temps de résidence dans le sol varient avec leur composition biochimique et leur protection par la phase minérale, allant de moins d'un an à quelques années pour les composés facilement biodégradables, et à des dizaines, centaines voire des milliers d'années pour les fractions les plus stables (Falloon et Smith 2000).

(iii) Sur la distinction entre l'effet du non labour et l'effet des apports organiques

L'analyse des mécanismes d'enrichissement en carbone organique des sols en TCSL conduit à distinguer l'effet strict du non-labour de celui des apports organiques. Le labour est généralement considéré comme défavorable au stockage de carbone par une stimulation de la minéralisation de la MOS due à la meilleure aération du sol, et par une diminution de la stabilité des agrégats et une moindre protection physique des MOS (Oades 1995), conséquence de leur dilution dans les horizons de surface par mélange avec des horizons de profondeur.

L'effet spécifique des restitutions organiques apparaît lié à leur quantité qui peut influencer fortement sur le stockage à long terme dans le sol (Bayer et al. 2000 ; Thévenet et al. 2002), à leur qualité et à leur mode de placement, en surface ou enfoui (Drinkwater et al. 1998 ; Razafimbelo et al. 2003). Leur composition, notamment leur teneur en azote, peut intervenir par ailleurs sur les flux de N₂O (Erickson et al. 2001 ; Millar et Baggs 2004).

(iv) *Sur les mécanismes responsables du stockage, le rôle des pratiques culturales et la stabilité du carbone stocké*

En plus de son effet purement mécanique de mélange et de répartition de la MO, le retournement des couches de sol induit une modification des conditions de surface tant hydriques que thermiques qui favorise une uniformisation de l'évolution des stocks de carbone sur l'ensemble de l'horizon travaillé (Alvarez et al. 1995 ; Mary et al. 1996 ; Stockfish et al. 1999 ; Wander et al. 1998). De son côté, la suppression du travail du sol accentue la stratification de la distribution des MOS avec un enrichissement des horizons de surface (0–10 cm) et un appauvrissement progressif avec la profondeur (Alvarez et al. 1995 ; Tebbrügge et Düring 1999). Cependant, la différence des stocks de carbone entre les systèmes labourés et non labourés est en général faible et souvent non significative sur l'ensemble du profil (Alvarez et al. 1995).

Parmi les mécanismes susceptibles d'expliquer les plus fortes teneurs en MOS en absence de labour en milieu tempéré, Alvarez et al. (1995) les attribuent à un ralentissement de la minéralisation du stock organique initial du sol plutôt qu'à une meilleure humification des résidus de récolte. Balesdent et al. (2000) ont ainsi observé une vitesse de minéralisation de la MOS en semis direct 2 fois plus lente que celle sous labour. L'enrichissement en MO des sols en TCSL pourrait être aussi favorisé par un ralentissement de la dégradation des MO apportées sous l'effet de températures plus froides en surface du sol non labouré durant les saisons pluvieuses (Al-Kaisi et al. 2005) ou de la faible teneur en eau de la couche organique en surface du sol durant les saisons sèches (Stockfish et al. 1999).

Cependant l'effet bénéfique des TCSL sur le stockage de carbone n'est pas toujours observé du fait notamment de l'alternance avec des labours épisodiques (Stockfish et al. 1999 ; Pankhurst et al. 2002), de situations avec de faibles apports de matière organique au sol, ou d'une durée insuffisante en TCSL (Fortin et al. 1996 ; Six et al. 2004). Le stockage de carbone peut aussi se trouver limité dans les situations où la vitesse de minéralisation nette du carbone est similaire à celle obtenue en système labouré (Wander et Yang 2000). Un corollaire attendu de l'effet du labour sur l'association de la MOS et de la matrice minérale du sol devrait être une forte interaction de l'effet du labour avec la texture du sol et la durée de la couverture végétale, qui est en général peu mise en évidence.

Ces considérations nous ont amenés à synthétiser les résultats disponibles sur l'évolution du stock de carbone dans un dispositif expérimental de longue durée mis en place sur un sol représentatif d'une importante zone cultivée du territoire français et visant à comparer 3 techniques de travail du sol : le labour conventionnel, le maintien d'un travail superficiel sans labour, l'absence totale de labour. La présentation a trois objectifs.

- (i) rassembler les valeurs de stockage de carbone obtenues sur cet essai de longue durée géré en zone de climat tempéré,
- (ii) situer les valeurs obtenues par rapport aux données de la littérature internationale issues principalement d'Amérique du Nord,
- (iii) s'interroger sur les perspectives d'évolution du potentiel de stockage de carbone organique des sols.

MATERIEL ET METHODES

Caractérisation de l'évolution du stock de carbone sur l'essai de longue durée de Boigneville

Une expérimentation de longue durée destinée à évaluer les effets des modes de travail du sol a été mise en place en 1970 sur le site de Boigneville (2°37'E; 48°33'N), au sud de Paris (Boisgontier 1982). Le dispositif expérimental, géré par ARVALIS-Institut du Végétal, est constitué de 8 blocs complets randomisés de 5 parcelles (50 m × 8 m) en rotation maïs-blé : trois modalités de travail du sol ont été mises en comparaison au sein de ces blocs: labour, travail superficiel et semis direct. Des dispositifs secondaires permettent de comparer ces traitements sous monoculture de maïs ou de blé. Cet essai est actuellement le seul au niveau du territoire français, pour lequel on dispose de jeux de données complets sur une longue durée ; il a été le support de différents travaux (Balesdent et al. 1990; Wylleman et al. 2001 ; Thévenet et al. 2002 ; Oorts et al. 2006a, b, 2007).

Le sol est 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⁻¹ ; N total Kjeldhal : 1,2 mg g⁻¹ ; CEC : 0,125 mmol_c g⁻¹ ; pH 6,1.

Concernant les pratiques culturales, le semis direct ne comporte aucun travail du sol, excepté celui réalisé par le disque du semoir. Le travail superficiel effectué pendant les 10 premières années à une profondeur moyenne de 10 cm a été progressivement amené à 5 cm et est principalement réalisé à l'aide d'outils animés de type Rotavator. Le labour dans les parcelles concernées est pratiqué depuis le début de l'essai à une profondeur moyenne de 23 cm. Les résidus de culture sont laissés sur le champ après la récolte jusqu'à l'enfouissement par labour dans les parcelles labourées, partiellement mélangés avec les techniques de travail superficiel ou maintenus en surface dans les parcelles en semis direct.

L'échantillonnage du sol a été effectué tous les 4 ans de 1970 à 1998 sur les parcelles des différents traitements par couche de 5 cm jusqu'à une profondeur de 30 cm pour prendre en compte l'ensemble du profil concerné par le labour antérieur. Les prélèvements ont été effectués pendant l'automne, après les récoltes, en séparant la litière fraîche de l'horizon de surface, et excluant de ce fait du bilan la matière organique posée

sur le sol: dix prélèvements indépendants ont été effectués par parcelle et ont été regroupés pour constituer un échantillon moyen par horizon et par parcelle ou pour un couple de parcelles, conduisant à des valeurs moyennes issues de 4 ou 8 répétitions selon les dates. Des mesures de densité apparente ont été réalisées aux différentes dates sur les différents horizons à l'aide de plusieurs techniques soumises à une inter-calibration : densitomètre à membrane, gammamétrie, cylindres de terre. Tous les calculs de stocks de carbone ont été évalués sur la base de 3900 t de terre par hectare, l'épaisseur de sol du dernier horizon servant de variable d'ajustement pour permettre de travailler avec une masse de sol constante (Balesdent et al. 1990). Des échantillons de sol correspondant aux différents prélèvements ont été séchés, tamisés à 2 mm et conservés à l'état sec pour des analyses a posteriori. Les analyses de carbone total ont été effectuées sur les échantillons tamisés et broyés à 200 μm par combustion sèche à l'aide d'un analyseur élémentaire (Carlo Erba).

Synthèse des données de la littérature sur l'impact des TCSL sur le stock de carbone du sol

Pour comparer les données obtenues à partir de notre site expérimental aux capacités de stockage évaluées sous d'autres conditions, nous avons utilisé l'ensemble des résultats tiré de la synthèse d'Arrouays et al. (2002), que nous avons complété par quelques données complémentaires, en prenant en considération la durée de mise en TCSL et les augmentations de stocks de carbone attribuées à cette pratique culturale. Il importe de souligner que ces données proviennent essentiellement de la littérature nord américaine et sont issues de régions aux conditions d'humidité fortement contrastées : elles comparent des situations de non labour à des situations de travail du sol conventionnel de ces régions, qui recouvrent à la fois du labour avec retournement et du travail du sol à l'aide de « cultivateurs canadiens » qui déplacent et mélangent le sol sans le retourner.

RESULTATS

Caractérisation de l'évolution du stock de carbone sur l'essai de longue durée de Boigneville

Les données de la Fig. 1 comparent l'effet des deux itinéraires techniques simplifiés par rapport au labour traditionnel sous la rotation maïs-blé et sous les monocultures correspondantes ; elles indiquent une importante variabilité des estimations du stock de carbone et des variations très fluctuantes suivant les parcelles et la culture mise en place. Cependant, les moyennes indiquent une augmentation des stocks de carbone dans la plupart des situations malgré une baisse au cours des premières années dans quelques situations, sous monoculture de blé en travail superficiel et en semis direct, suivie d'une hausse après 10 ou 15 ans; on observe de même des fluctuations importantes dans l'évolution de

ce stock sous la rotation maïs-blé, avec un maximum après 20 ans et une décroissance ensuite.

L'analyse diachronique sur les traitements principaux (Fig. 2) montre que les stocks de carbone ont augmenté pour tous les traitements, mais davantage avec le semis direct et le travail superficiel qu'avec le labour. L'analyse des mesures réalisées tous les 4 ans indique un effet marqué de la durée de l'expérimentation sur l'intensité du stockage: la différenciation des stocks de carbone entre traitements se manifeste rapidement avec une augmentation quasi linéaire au cours des 20 premières années et qui se ralentit notablement au-delà.

Après 8 ans (1970 à 1978), les écarts sont de 1,0 t C ha^{-1} entre semis direct et labour et supérieurs à 2,3 t C ha^{-1} entre travail superficiel et labour, soit un restockage de 120 kg à 300 kg C $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$. Après 20 ans (1970-1990), l'augmentation de stock de carbone par rapport au sol labouré est 3,8 t C ha^{-1} pour le semis direct et de 5,4 t C ha^{-1} pour le travail superficiel, soit une augmentation de 190 à 270 kg C $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$. Enfin, après 28 ans (1970 à 1998), on observe une augmentation de stock de 2,8 t C ha^{-1} en sol labouré, de 5,6 t C ha^{-1} avec le travail superficiel et de 5,2 t C ha^{-1} en semis direct, valeurs non significativement différentes entre le labour et les techniques simplifiées de travail du sol. Cette augmentation de stock est semblable dans le sol en travail superficiel et dans le sol en semis direct avec des différences moyennes de 2,8 et 2,4 t C ha^{-1} par rapport au labour, soit une augmentation annuelle supplémentaire dans les sols soumis aux TCSL de 100 kg C $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$. La comparaison des stocks de carbone en 1970 (40 t C ha^{-1}) et 1998 dans le traitement labour, fait apparaître une augmentation que l'on devrait pouvoir attribuer au premier abord à un accroissement des résidus de récolte enfouis, dont la production a très vraisemblablement crû avec les rendements des cultures, passés en moyenne de 6 à 8 t $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ pour le blé au cours de cette période.

Synthèse des données de la littérature sur l'impact des TCSL sur le stock de carbone du sol

La compilation de données de la littérature internationale, essentiellement nord-américaine, comparant l'évolution des stocks de carbone dans des sols labourés et des sols en TCSL a permis de caractériser l'évolution du stockage en fonction de la durée du non labour : les données précédentes tirées de l'essai de Boigneville y sont intégrées et complétées par celles obtenues sur ce même dispositif expérimental avec les traitements en monocultures de blé ou de maïs (Wylleman et al. 1999). Malgré les incertitudes liées aux comparaisons individuelles, la Fig. 3 permet de montrer une tendance au stockage de carbone consécutif à la mise en place des TCSL, avec une importante variabilité des estimations, en particulier pour les durées d'expérimentation les plus courtes, de l'ordre de 5 ans. Ces données qui prennent en compte l'ensemble des différences, significatives ou non, des stocks de carbone entre systèmes labourés et

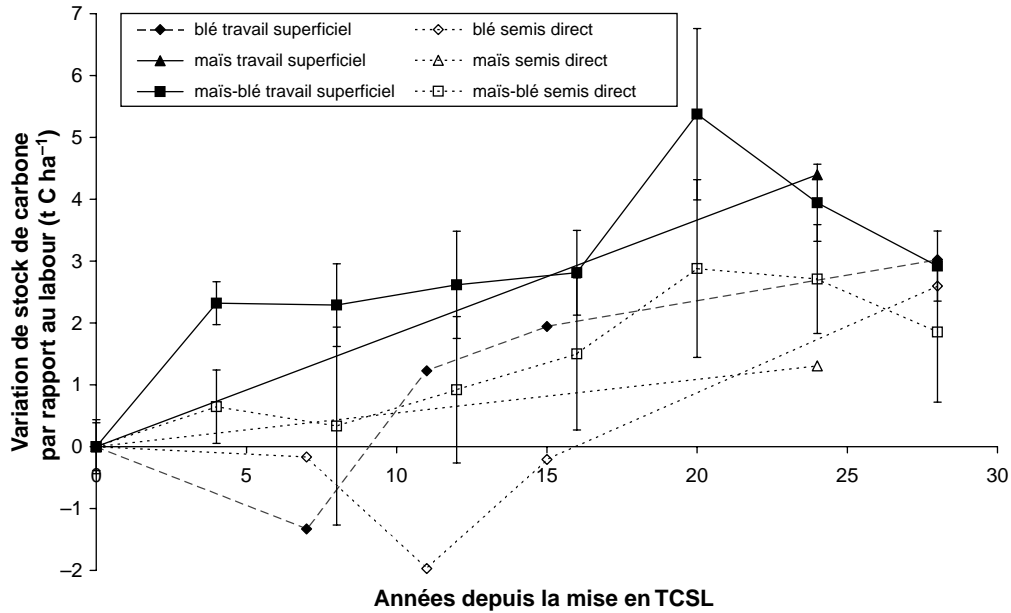


Fig. 1. Evolution des différences de stock de carbone du sol entre les systèmes de culture en travail du sol simplifié ou en semis direct et le système avec labour en fonction des différentes rotations sur l'essai longue durée de Boigneville ($t C \cdot ha^{-1}$, sur la base d'une masse de terre de $3900 t \cdot ha^{-1}$). Les données manquantes correspondent à des défauts d'échantillonnage. Les barres d'erreur indiquent les valeurs d'écart type pour les données relatives à la rotation maïs-blé.

systèmes non labourés, conduisent à une valeur moyenne de l'ordre de $240 kg \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ de C stocké alors que la régression linéaire sur l'ensemble des valeurs compilées donne une valeur de $150 kg \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ ($r^2 = 0,07$). On note cependant des valeurs négatives corre-

spondant à un déstockage de C pour des pas de temps courts. La non prise en compte de ces valeurs négatives, inexplicables dans ce contexte, donne une régression linéaire avec un coefficient directeur de $300 kg \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$ ($r^2 = 0,19$).

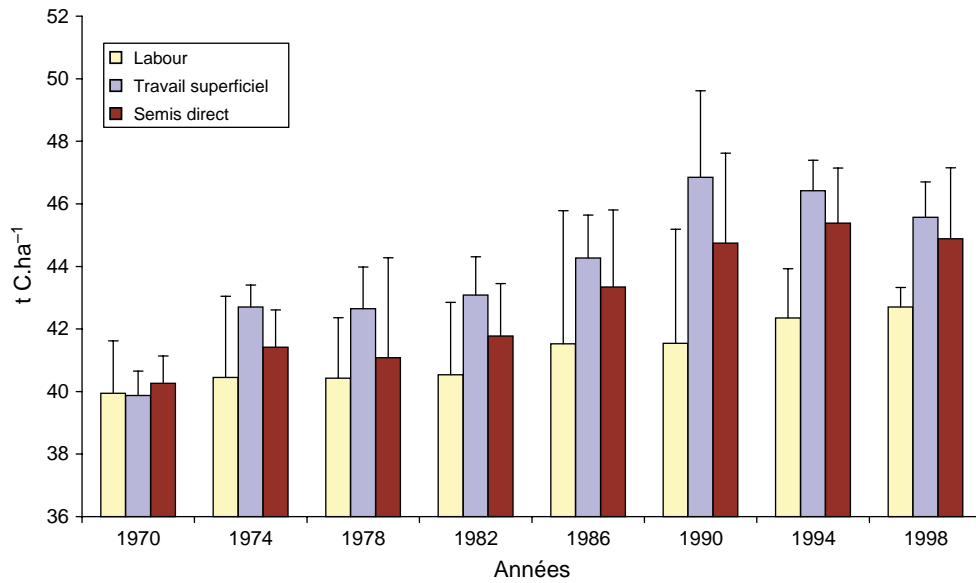


Fig. 2. Evolution des stocks de carbone du sol au cours du temps selon le mode de travail du sol sur l'essai longue durée de Boigneville ($t C \cdot ha^{-1}$, sur la base d'une masse de terre de $3900 t \cdot ha^{-1}$). Les barres d'erreur indiquent les valeurs d'écart type pour les données relatives à la rotation maïs-blé.

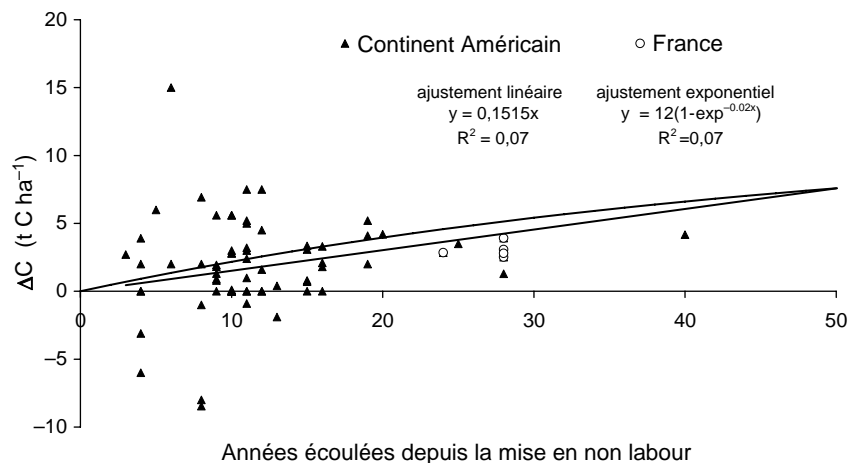


Fig. 3. Estimation des variations de stock moyen de carbone des sols sous TCSL versus sols en travail conventionnel ($\text{t C}\cdot\text{ha}^{-1}$); diagramme construit d'après les données d'Arrouays et al. (2002) provenant de Lamb et al. (1985), Balesdent et al. (1990), Campbell et al. (1995, 1996), Nyborg et al. (1995), Jones et al. (1996), Angers et al. (1997), Black et Tanaka (1997), Larney et al. (1997), Potter et al. (1997, 1998), Alvarez et al. (1998), Buyanovsky et Wagner (1998), Dick et al. (1998), Franzluebbers et al. (1998), Hendrix et al. (1998), Rasmussen et al. (1998), Taboada et al. (1998), Wander et al. (1998), Clapp et al. (2000), Hao et al. (2001), Chan et al. (2002), Sainju et al. (2002).

DISCUSSION

Caractérisation de l'évolution du stock de carbone sur l'essai de longue durée de Boigneville

La variation non linéaire de la capacité de stockage de carbone au cours du temps observée dans l'expérimentation de Boigneville a été largement discutée dans l'expertise conduite par Arrouays et al. (2002); elle met en défaut l'évaluation d'une vitesse de stockage constante, souvent proposée de façon implicite dans la littérature. En se basant sur le suivi des données sur les 20 premières années, on observe une augmentation moyenne du stock de carbone de l'ordre de $0,2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ qui est la valeur retenue comme base d'évaluation du potentiel de restockage de carbone pour des techniques simplifiées de travail du sol à l'échelle du territoire français sur une période de 20 ans (Arrouays et al. 2002). Si l'on se réfère aux valeurs observées sur 28 ans, l'augmentation moyenne est alors respectivement de $0,10 \text{ t}$, $0,21 \text{ t}$ et $0,19 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour le labour, le travail superficiel et le semis direct. L'augmentation du stockage liée à la réduction du travail du sol n'est pas significativement différente pour le semis direct et le travail superficiel et n'est que de $0,10 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, valeur sensiblement inférieure à celle obtenue sur 20 ans.

L'important écart observé entre les résultats sur 20 et 28 ans résulte des effets convergents d'un ralentissement, voire d'une diminution, du stockage de carbone dans les sols en TCSL et d'une augmentation constatée du stock du sol labouré (Fig. 2). Ces observations confortent l'idée d'une nécessaire prise en compte du facteur temps dans l'évaluation des capacités de stockage de carbone et d'une limitation de ce stockage sur le long terme avec le passage d'un état d'équilibre en système labouré à un

nouvel équilibre en système de non labour. Une conclusion importante que l'on peut tirer de ces données est que le niveau de cette capacité de stockage de carbone dans les conditions naturelles du Bassin Parisien est significativement plus faible que les valeurs fréquemment rencontrées dans la littérature, tels les ordres de grandeur de 300 à $500 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (Lal 2002; Alvarez 2005), ou tirées du coefficient d'enrichissement annuel du stock organique de $0,73\%$ calculé par Smith et al. (1998) et largement repris ensuite. Ces dernières données de restockage tendent cependant à être actuellement revues à la baisse (Smith et al. 2005).

Ce faible effet des TCSL sur les stocks totaux de carbone peut être accompagné d'effets plus marqués sur les flux bruts comme l'ont montré Balesdent et al. (1990) à l'aide de traçages isotopiques. Ce stockage limité est la résultante de différents mécanismes, parfois contradictoires, mis en avant par ce même auteur (Balesdent et al. 2000): (i) une diminution des apports de carbone au sol dans le cas du non labour, du fait d'une minéralisation hors sol d'une partie du carbone de la biomasse aérienne non récoltée, notamment la fraction soluble, alors que l'enfouissement rapide par le labour favorise son incorporation par interaction avec la matrice solide du sol; (ii) une plus faible vitesse de minéralisation des résidus laissés en surface, par rapport aux résidus enfouis par le labour, du fait de leur éloignement de la population de décomposeurs; (iii) une augmentation du taux de minéralisation et une diminution du taux d'humification des débris végétaux en voie de décomposition en contact avec la couche de surface du sol, par un mélange moins intense avec la matrice solide du sol et une moins grande incorporation au sein d'agrégats en néoformation dans le sol; (iv) une diminution de la

vitesse de minéralisation des MO humifiées, par une moindre perturbation-destruction des agrégats du sol et une moindre aération.

Ces résultats sont complétés par les observations de Oorts et al. (2006a, b, 2007) sur ce même dispositif concernant l'analyse des mécanismes susceptibles d'expliquer les différences d'évolution des compartiments de la matière organique sous l'influence des traitements appliqués. Ils montrent ainsi que l'horizon de surface du sol sous semis direct présente des stocks de carbone et d'azote respectivement supérieurs de 5 à 15% et de 3 à 10% à ceux mesurés dans l'horizon labouré correspondant, avec des différences entre traitements qui ne sont pas toujours statistiquement significatives. Parallèlement, les concentrations de carbone diminuent avec la profondeur en semis direct alors qu'elles sont distribuées de façon homogène dans la couche labourée. Le fractionnement granulométrique a permis d'identifier la localisation de la matière organique dans les différentes fractions et d'en déduire les niveaux de protection au bout de 30 ans de pratiques culturales différenciées. Ainsi, 66% de la différence des stocks de carbone total des sols peuvent être expliqués par la différence des stocks présents dans la matière organique particulaire (58%) et les résidus de culture libres (8%) (Fig. 4) ; la fraction associée aux particules minérales présentes à l'intérieur ou à l'extérieur des agrégats ne couvre finalement qu'une part minoritaire de cette différence. Ces résultats nous conduisent à penser que dans cette situation l'augmentation du stock de carbone dans le semis direct qui se situe essentiellement dans des agrégats, peut être attribuée d'une part à la formation de macro-agrégats plus prononcée dans la couche 0–5 cm, due à la stimulation de l'activité microbienne et aux entrées plus importantes de matière organique dans cet horizon, et d'autre part à la meilleure protection de la matière organique du sol dans la couche 5–20 cm due à une porosité plus faible du sol et à l'absence de destruction de la structure du sol par les pratiques culturales (Fig. 5). L'enrichissement plus marqué dans l'horizon 0–5 cm des systèmes en semis

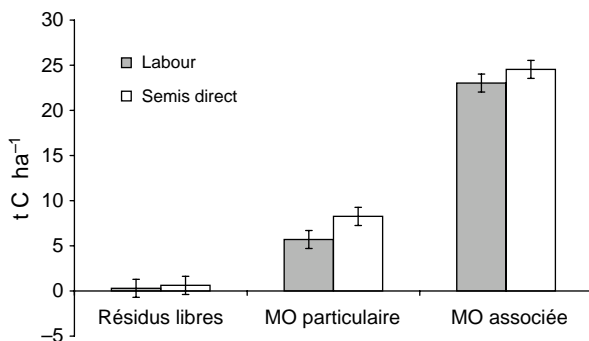


Fig. 4. Stocks de carbone dans les différentes fractions de sol sous labour et sous semis direct pour une couche de sol équivalente à la profondeur du labour. Les barres verticales indiquent les valeurs d'écart-type (d'après Oorts et al. 2006a).

direct est plus particulièrement dû aux matières organiques particulières (MOP) des micro- et des macro-agrégats et, à un degré moindre, à la matière organique physiquement protégée par son association à la fraction minérale (Fig. 5).

Synthèse des données de la littérature sur l'impact des TCSL sur le stock de carbone du sol

La majorité des résultats de la Fig. 3 sont issus du Canada et des Etats-Unis ; certains ont été déjà intégrés dans différentes synthèses (Paustian et al. 1998; Lal 1997; Reicosky et Lindstrom 1995). Ils concernent des sols mis en culture à partir de la prairie originelle et portant différentes cultures annuelles. Ces données nord-américaines montrent qu'après un important déstockage du carbone des sols consécutif à leur mise en culture et étalé sur une durée de l'ordre du siècle, on observe ensuite une tendance à un restockage d'amplitude variable selon le travail du sol et les autres pratiques culturales. Le niveau actuel de cette augmentation varie de 10 à 30% du stock mesuré après la phase de déstockage consécutive à la mise en culture. La comparaison des quantités de carbone stocké en système de travail du sol conventionnel et en non-labour ne présente pas de différence significative entre traitements dans la majorité des situations examinées individuellement. Par ailleurs, dans le contexte climatique des sites expérimentaux de ces régions marqué par une longue saison froide, on observe une stabilité des stocks des deux systèmes de travail du sol.

L'examen de ces résultats suscite trois séries de remarques : (i) on observe une évolution du stockage au cours du temps, comme nous l'avons observé sur les résultats expérimentaux issus de Boigneville, avec des valeurs plus fortes au cours des 10 premières années, et une stabilisation ensuite, avec une difficulté pour conclure au delà de 20 ans au vu du faible nombre de données disponibles ; (ii) le stockage moyen déduit des pentes des droites de régression varie de 150 à 300 kg C ha⁻¹ an⁻¹ selon que l'on prend ou ne prend pas en compte les valeurs négatives observées pour certains dispositifs de courte durée. Ces valeurs moyennes, entachées d'une très forte incertitude au vu de la dispersion des données pour les expérimentations de durée inférieure à 12 ans, sont sensiblement inférieures aux valeurs de 300 à 500 kg C ha⁻¹ an⁻¹ mentionnées précédemment ; (iii) les valeurs de stockage obtenues à partir des résultats expérimentaux du site de Boigneville se situent parmi les valeurs basses de cet ensemble tout en étant en cohérence avec les valeurs observées sur les sites où la durée d'expérimentation en TCSL est supérieure à 15 ans. Enfin, cette synthèse met en évidence le faible nombre de données disponibles sur des dispositifs de longue durée et souligne l'intérêt de tels dispositifs expérimentaux pour valider les hypothèses de nouveaux équilibres sur le long terme.

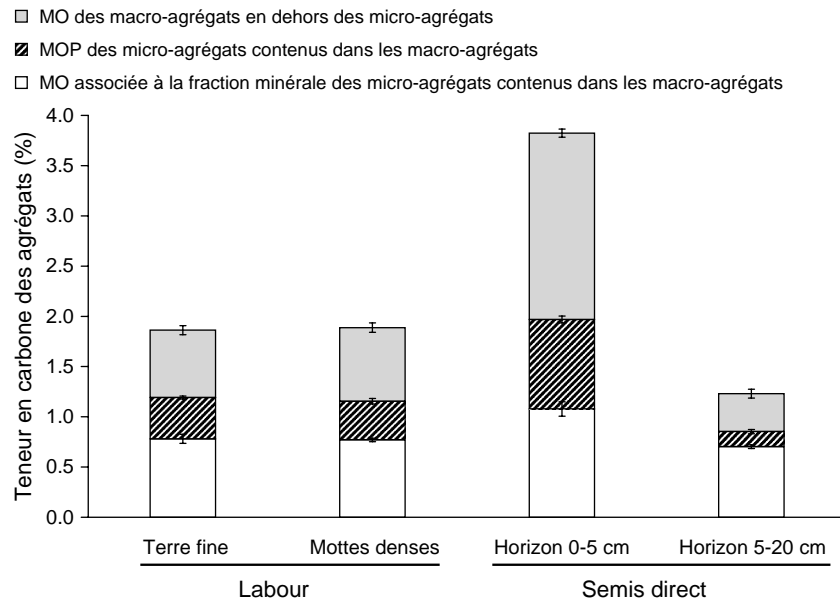


Fig. 5. Teneurs en carbone des micro-agrégats au sein des macro-agrégats pour les différentes zones de sol dans les systèmes avec labour ou en semis direct. Les barres verticales indiquent les valeurs d'écart-type (d'après Oorts et al. 2006a). MO : Matière organique ; MOP : Matière organique particulaire.

Quelles perspectives d'évolution du stock de carbone du sol et quelles limites au potentiel de stockage?

Malgré la fréquente absence de différence significative entre les stocks de carbone des sols labourés et non labourés observée à partir des essais individualisés de la littérature, l'augmentation du stockage de carbone sous TCSL est aujourd'hui globalement admise par la communauté de science du sol ; cependant le niveau de cette capacité de stockage et sa durabilité sont vivement discutés. Le récent article de Bellamy et al. (2005), basé sur une large série de résultats originaux sur l'évolution des stocks de carbone des sols à l'échelle de l'Angleterre et du Pays de Galles, va à l'encontre de ces perspectives de stockage en milieu tempéré. Il fait état des conclusions suivantes :

- (i) des pertes non négligeables de carbone ont eu lieu au cours des dernières décennies dans l'ensemble des sols examinés, indépendamment de leurs caractéristiques physico-chimiques ou pédologiques, mettant en cause certaines des connaissances sur la stabilité du carbone dans le sol.
- (ii) les pertes observées sont globalement proportionnelles à la teneur en carbone des sols, en accord avec une cinétique de disparition du 1^{er} ordre ; de ce fait, les sols les plus riches en carbone sont ceux qui ont le plus perdu, ce qui est contradictoire avec l'idée que ces sols contiendraient une proportion plus importante de carbone stable ;
- (iii) des pertes de carbone ont été observées indépendamment des conditions d'utilisation des sols,

et notamment de leurs modes d'exploitation. Le changement climatique et les augmentations de température qui lui sont liées pourraient être le principal moteur de l'évolution des pertes sur des sols non agricoles ;

- (iv) l'observation de ces pertes remet en cause l'idée que les sols pourraient constituer un puits de carbone utilisable pour modifier le bilan des émissions de CO₂. Cette conclusion remet implicitement en question les stratégies de stockage de carbone par des techniques culturales telles que le non travail du sol.

Cependant d'autres observations sont susceptibles de contredire cette perception d'une tendance généralisée de déstockage de carbone du sol. Ainsi l'examen de la base de données d'analyses de terre, regroupant les résultats d'analyses à l'échelle de la France métropolitaine (cartes en ligne sur <http://gissol.orleans.inra.fr/programme/bdat/bdat.php>) (Saby et al. 2004 ; Lemerrier et al. 2006) conduit à mentionner des tendances contradictoires, à savoir :

- (i) des déstockages prolongés de carbone du sol à l'échelle régionale dans les régions où des surfaces importantes de prairies ou de forêts ont été remises en culture dans un passé relativement récent, ainsi que dans certaines régions montagneuses ;
- (ii) une tendance à une augmentation du stock de carbone du sol dans certains secteurs d'agriculture céréalière du Bassin Parisien. Cette tendance peut être mise en parallèle avec la vraisemblable augmentation des apports au sol de résidus végétaux

liée à l'augmentation de la production de biomasse, et au développement simultané des TCSL et des cultures intermédiaires pièges à nitrates.

Ces dernières données confortent donc les stratégies visant à favoriser le stockage de carbone du sol. En utilisant ces mêmes données, Arrouays et al. (2006) montrent que l'on peut définir un potentiel de stockage des sols en relation directe avec leurs teneurs en éléments fins ($< 20 \mu\text{m}$), et que la plupart des sols de nos régions tempérées n'auraient pas atteint leur capacité maximum de stockage associée à ces particules fines. Dans le cas du site de Boigneville, avec des teneurs en argile et limons fins voisines de 65%, le potentiel de stockage est ainsi estimé à plus de 80 t C ha^{-1} , indiquant ainsi la marge dont nous disposerions sur ce site où les stocks actuels, dans les situations les plus favorables sont de l'ordre de 45 t C ha^{-1} . Une telle perspective de stockage sur ce sol est en accord avec un essai de modélisation à l'aide du modèle RothC de Coleman et Jenkinson (1995) appliqué aux données collectées sur ce dispositif (Martin, communication personnelle). Cette perspective radicalement orthogonale aux conclusions de Bellamy et al. (2005), nécessite d'être vérifiée à partir de démonstrations expérimentales conséquentes, et souligne la nécessité de maintenir la gestion de dispositifs expérimentaux de longue durée permettant de traiter de telles questions.

Il importe de situer ces possibilités de stockage de carbone par le sol dans le bilan global des émissions de GES au niveau d'un territoire donné : au niveau du territoire français les activités humaines engendrent un déstockage annuel estimé à 126 millions t C (CITEPA 2009); parallèlement la mise en TCSL de 30% des 18 millions d'ha de terres labourables avec une capacité de restockage de $100 \text{ à } 200 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ne peut induire qu'une augmentation annuelle du stock de carbone du sol de 0,5 à 1 million t, soit moins de 1% des quantités déstockées par ailleurs. Il convient par ailleurs de souligner que ce stockage est susceptible d'être contrebalancé par une accentuation d'émissions de N_2O (Nicolardot et Germon 2008).

Ces perspectives de stockage de carbone par les TCSL doivent être replacées dans le contexte actuel de mise en valeur des sources d'énergie renouvelables à partir de l'agriculture, et de mentionner que l'évolution du stock organique du sol sera vraisemblablement davantage conditionnée par la gestion des résidus de récolte que par le travail du sol. Ainsi alors que la gestion en TCSL d'un retour au sol de $2,4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ à partir de paille permet un accroissement de stock de carbone du sol de $100 \text{ à } 200 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ dont la pérennité n'est pas assurée, la production d'énergie par combustion de cette même quantité de paille permettrait un évitement d'émission de $2,25 \text{ t C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ à partir de carburant fossile, valeur quasi constante au cours du temps (Arrouays et al. 2002).

CONCLUSION

En régions de climat tempéré, les terres cultivées ont une capacité à accumuler de la matière organique dans leurs horizons superficiels qui peut être exprimée en potentiel de stockage de carbone du sol et que l'on peut tenter d'utiliser pour réduire d'autant les émissions de CO_2 atmosphérique par des pratiques culturales spécifiques. En l'état actuel des connaissances, les TCSL favorisent globalement ce stockage de carbone ; dans l'essai longue durée de Boigneville, seul essai sur le territoire français permettant d'évaluer le bilan de matière organique à moyen terme (30 ans) sous ces pratiques culturales, les TCSL ont permis une augmentation par rapport au labour traditionnel de $100 \text{ à } 200 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ en fonction de l'échelle de temps prise en compte ; ces valeurs sont nettement inférieures à celles de la littérature qui vont de $300 \text{ à } 500 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, voire davantage (Lal 2002). Cependant, ce restockage de carbone par les TCSL ne peut être significatif que dans le cas d'un développement important et durable de ces techniques au niveau de l'ensemble d'un territoire : les perspectives de développement de ces TCSL sont suffisamment fortes (Labreuche 2008) pour qu'il apparaisse nécessaire de les prendre en compte dans l'inventaire des émissions de GES au niveau du territoire français, dans lequel elles ne pèsent que faiblement (moins de 1%). En d'autres termes, le développement des TCSL peut contribuer à entretenir et restaurer le taux de matière organique des sols et les propriétés qui lui sont liées, mais il ne contribuera que de façon marginale à la réduction des émissions de GES.

L'examen de la littérature et les résultats obtenus laissent penser que l'augmentation du stock de carbone en TCSL est plutôt due à un ralentissement de la minéralisation du stock initial du sol et que le carbone nouvellement stocké est intégré durablement au sol, protégé en particulier au sein des micro- agrégats ou des macro- agrégats. Cependant, aucune différence significative de stock de C entre les parcelles en travail superficiel et les parcelles en semis direct n'a été mise en évidence après 30 ans de différenciation.

Il convient par ailleurs de garder à l'esprit que l'effet globalement positif des TCSL sur le stockage du carbone dans le sol, pourrait être annulé par : (i) un déstockage généralisé du carbone sur le long terme sous l'effet du changement climatique ; (ii) des émissions de N_2O susceptibles de contrebalancer ce stockage. Il importe enfin de replacer les perspectives de stockage de C par les TCSL dans le contexte actuel de mise en valeur des sources d'énergie renouvelables, en soulignant qu'une même quantité de résidus de récolte utilisée à des fins énergétiques peut avoir un effet beaucoup plus marqué sur la réduction d'émission de CO_2 que son maintien en surface d'un sol géré en TCSL afin d'augmenter le stock organique du sol. Ce travail permet aussi de rappeler que la dynamique du carbone du sol est lente et que la perte des stocks est plus rapide que le gain. Il importe donc de promouvoir une politique de

gestion des sols sur le long terme visant en priorité à éviter une réduction des stocks de carbone organique par des pratiques agricoles inadaptées.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Pierre Stengel, directeur scientifique de l'INRA, qui a été l'initiateur de ce groupe de ce travail, l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) qui a soutenu l'étude qui a servi de support à cette publication, ainsi qu'Irène Félix (ARVALIS-Institut du Végétal), et Tiphaine Chevallier pour leurs apports à la préparation de ce document.

Al-Kaisi, M. M. et Yin, X. 2005. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotation. *J. Environ. Qual.* **34**: 437–445.

Al-Kaisi, M. M., Yin, X. et Licht, M. A. 2005. Soil carbon and nitrogen changes as affected by tillage systems and crop biomass in a corn-soybean rotation. *Appl. Soil Ecol.* **30**: 174–191.

Alvarez, R. 2005. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. *Soil Use Manage.* **21**: 38–52.

Álvarez, R., Álvarez, C. R. et Lorenzo, G. 2001. CO₂-C fluxes following tillage from a Mollisol in the Argentine Rolling Pampa. *Eur. J. Soil Biol.* **37**: 161–166.

Alvarez, R., Diaz, R. A., Barbero, N., Santanoglia, O. J. et Blotta, L. 1995. Soil organic-carbon, microbial biomass and CO₂-C production from 3 tillage systems. *Soil Tillage Res.* **33**: 17–28.

Alvarez, R., Russo, M. E., Prystupa, P. et Scheiner, J. D. 1998. Soil carbon pools under conventional and no-tillage systems in the Argentine Rolling Pampa. *Agron. J.* **90**: 138–143.

Angers, D. A., Bolinder, M. A., Carter, M. R., Gregorich, E. G., Drury, C. F., Liang, B. C., Voroney, R. P., Simard, R. R., Donald, R. G., Beyaert, R. P. et Martel, J. 1997. Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool, humid soils of eastern Canada. *Soil Tillage Res.* **41**: 191–201.

Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J. C., Jayet, P. A., Soussana, J. F. et Stengel, P. (eds.) 2002. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France. Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Expertise collective INRA, Paris, France. 332 pp.

Arrouays, D. et Péliissier, P. 1994. Changes in carbon storage in temperate humic loamy soils after forest clearing and continuous corn cropping in France. *Plant Soil* **160**: 215–223.

Arrouays, D., Saby, N., Walter, C., Lemerrier, B. et Schwartz, C. 2006. Relationships between particle-size distribution and organic carbon in French arable topsoils. *Soil Use Manage.* **22**: 48–51.

Aslam T., Choudhary, M. A. et Saggari, S. 2000. Influence of land-use management on CO₂ emissions from a silt loam soil in New Zealand. *Agric. Ecosyst. Environ.* **77**: 257–262.

Balesdent, J., Chenu, C. et Balabane, M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Tillage Res.* **15**: 215–230.

Balesdent, J., Mariotti, A. et Boisgontier, D. 1990. Effect of tillage on soil organic carbon mineralization estimated from ¹³C abundance in maize fields. *J. Soil Sci.* **41**: 587–596.

Ball, B. C., Campbell, D. J. et Hunter, E. A. 2000. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in the UK. *Soil Tillage Res.* **57**: 83–91.

Bayer, C., Martin-Neto, L., Mieleniczuk, J. et Cerreta, C. A. 2000. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. *Soil Tillage Res.* **53**: 95–104.

Bellamy, P. H., Loveland, P. J., Bradley, R. I., Lark, R. M. et Kirk, G. J. D. 2005. Carbon losses from soils across England and Wales. *Nature* **437**: 245–248.

Black A. L. et Tanaka D. L. 1997. A conservation tillage-cropping systems study in the Northern Great Plains of the United States. Pages 335–342 *dans* E. A. Paul et al., éd. *Soil organic matter in temperate agroecosystems-Long-term experiments in North America*. CRC Press, Boca Raton, FL.

Boisgontier, D. 1982. Matière organique, simplification du travail du sol et irrigation. *Perspectives Agricoles* **64**: 16–23.

Buyanovsky, G. A. et Wagner, G. H. 1998. Carbon cycling in cultivated land and its global significance. *Global Change Biol.* **4**: 131–141.

Campbell, C. A., McConkey, B. G. et al. 1996. Tillage and crop rotation effects on soil organic C and N in a coarse-textured typic haploboroll in southwestern Saskatchewan. *Soil Tillage Res.* **37**: 3–14.

Campbell, C. A., McConkey, B. G. et al. 1995. Carbon sequestration in a brown chernozem as affected by tillage and rotation. *Can. J. Soil Sci.* **75**: 449–458.

Chan, K. Y., Heenan D. P. et Oates A. 2002. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management. *Soil Tillage Res.* **63**: 133–139.

CITEPA. 2009. Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au titre de la convention cadre des nations unies sur le changement climatique. CITEPA, Paris, France. 131 pp. et annexes.

Clapp, C. E., Allmaras, R. R., Layese, M. F., Linden, D. R. et Dowdy, R. H. 2000. Soil organic carbon and ¹³C abundance as related to tillage, crop residue, and nitrogen fertilization under continuous corn management in Minnesota. *Soil Tillage Res.* **55**: 127–142.

Coleman, K. et Jenkinson, D. S. 1995. Roth C-26.3, a model for the turnover of carbon in soil: model description and users guide. Lawes Agricultural Trust, Harpenden, UK.

Dao, T. H. 1998. Tillage system and crop residue effects on surface compaction of a Paleustoll. *Agron. J.* **88**: 141–148.

Dick, W. A., Blevins, R. L., Frye, W. W., Peters, S. E., Christenson, D. R., Pierce, F. J. et Vitosh, M. L. 1998. Impacts of agricultural management practices on C sequestration in forest-derived soils of the eastern Corn Belt. *Soil Tillage Res.* **47**: 235–244.

Drinkwater, L. E., Wagoner, P. et Sarrantonio, M. 1998. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature* **396**: 262–265.

Erickson, H., Keller, M. et Davidson, E. A. 2001. Nitrogen oxide fluxes and nitrogen cycling during postagricultural succession and forest fertilization in the humid tropics. *Ecosystems* **4**: 67–84.

Falloon P. D. et Smith, P. 2000. Modelling refractory soil organic matter. *Biol. Fertil. Soil.* **30**: 388–398.

Fortin, M. C., Rochette, P. et Pattey, E. 1996. Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-tillage small-grain cropping system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **60**: 1541–1547.

- Franzluebbers, A. J., Hons, F. M. et Zuberer, D. A. 1998.** In situ and potential CO₂ evolution from a fluventic ustochrept in southcentral Texas as affected by tillage and cropping intensity. *Soil Tillage Res.* **47**: 303–308.
- Hao, X., Chang, C. et Lindwall, C. W. 2001.** Tillage and crop sequence effects on organic carbon and total nitrogen content in an irrigated Alberta soil. *Soil Tillage Res.* **62**: 167–169.
- Hendrix, P. F., Franzluebbers, A. J. et McCracken, D. V. 1998.** Management effects on C accumulation and loss in soils of the southern Appalachian Piedmont of Georgia. *Soil Tillage Res.* **47**: 245–251.
- IPCC. 2007.** Climate change 2007. The physical science basis. Cambridge University Press, UK, 1009 pp.
- IPCC. 2001.** Climate change 2001. The science basis. Cambridge University Press, UK, 881 pp.
- Jolivet, C., Arrouays, D., Andreux, F. et Lèvéque, J. 1997.** Soil organic carbon dynamics in forested spodosols converted to maize cropping. *Plant Soil* **191**: 225–231.
- Jones, O. R., Stewart, B. A. et Unger, P. W. 1996.** Management of dry-farmed southern Great Plains soils for sustained productivity. Pages 387–401 *dans* E. A. Paul, K. A. Paustian, E. T. Elliot, et C. V. Cole, eds. *Soil organic matter in temperate agroecosystems*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Kessavalou, A., Mosier, A. R., Doran, J. W., Drijber, R. A., Lyon, D. W. et Heinemeyer, O. 1998.** Fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide, and methane in grass sod and winter wheat-fallow tillage management. *J. Environ. Qual.* **27**: 1094–1104.
- Labreuche, J. 2008.** Les techniques culturales sans labour concernent un tiers des surfaces françaises. *Perspectives Agricoles* **342**: 38–43.
- Lal, R. 1997.** Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂ enrichment. *Soil Tillage Res.* **43**: 81–107.
- Lal, R. 2002.** Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. *Environ. Pollut.* **116**: 353–362.
- Lamb, J. A., Peterson, G. A. et Fenster, C. R. 1985.** Wheat fallow tillage systems effect on a newly cultivated grassland soils nitrogen budget. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **49**: 352–356.
- Larney, F. J., Bremer, E., Janzen, H. H., Johnston, A. M. et Lindwall, C. W. 1997.** Changes in total, mineralizable and light fraction soil organic matter with cropping and tillage intensities in semiarid southern Alberta, Canada. *Soil Tillage Res.* **42**: 223–240.
- Lemercier, B., Walter, C., Saby, N., Schwartz, C., Arrouays, D. et Follain, S. 2006.** Suivi des teneurs en carbone organique et en phosphore extractible dans les sols agricoles de trois régions françaises. Analyse à partir de la Base de Données des Analyses de Terre. *Etude Gestion Sols.* **13**: 165–180.
- Mary, B., Recous, S., Darwis, D. et Robin, D. 1996.** Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. *Plant Soil* **181**: 71–82.
- Millar, N. et Baggs, E. M. 2004.** Chemical composition, or quality, of agroforestry residues influences N₂O emissions after their addition to soil. *Soil Biol. Biochem.* **36**: 935–943.
- Nicolardot, B. et Germon, J. C. 2008.** Effet du mode travail du sol sur les émissions de méthane (CH₄) et d'oxydes d'azote (N₂O et NO_x) par les sols. *Etude Gestion Sols.* **15**: 171–182.
- Nyborg, M., Solberg, E. D., Malhi, S. S. et Izaurralde, R. C. 1995.** Fertilizer N, crop residue, and tillage alter soil C and N content in a decade. Pages 93–99 *dans* R. Lal et al., eds. *Soil management and greenhouse effect*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Oades, J. M. 1995.** An overview of processes affecting the cycling of organic carbon in soils. The role of nonliving organic matter in the earth's carbon cycle. Pages 293–303 *dans* R. G. Zepp and C. Sonntag, éd. John Wiley and Sons, New York, NY.
- Oorts, K. 2006b.** Effect of tillage systems on soil organic matter stocks and C and N fluxes in cereals cropping systems on a silt loam soil in Northern France, KUL Leuven-INA-PG, Paris, France. 178 pp.
- Oorts, K., Bossuyt, H., Labreuche, J., Merckx, R. et Nicolardot, B. 2007.** Carbon and nitrogen stocks in relation to organic matter fractions, aggregation and pore size distribution in no-tillage and conventional tillage in northern France. *Eur. J. Soil Sci.* **58**: 248–259.
- Oorts, K., Nicolardot, B., Merckx, R., Richard, G. et Boizard, H. 2006a.** C and N mineralisation of undisturbed and disrupted soil from different structural zones of conventional tillage and no-tillage systems in northern France. *Soil Biol. Biochem.* **38**: 2576–2586.
- Pankhurst, C. E., Kirkby, C. A., Hawke, B. G. et Harch, B. D. 2002.** Impact of a change in tillage and crop residue management practice on soil chemical and microbiological properties in cereal producing red duplex soil in NSW, Australia. *Biol. Fertil. Soils* **35**: 189–196.
- Paustian, K., Elliot, E. T. et Carter, M. R. 1998.** Tillage and crop management impacts on soil C storage: use of long-term experimental data. *Soil Tillage Res.* **47**: 7–12.
- Paustian, K., Six, J., Elliott, E.T. et Hunt, H. W. 2000.** Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry* **48**: 147–163.
- Potter, K. N., Jones, O. R., Torbert, H. A. et Unger, P. W. 1997.** Crop rotation and tillage effects on organic carbon sequestration in the semi-arid southern Great plains. *Soil Sci.* **162**: 140–147.
- Potter, K. N., Torbert, H. A., Jones, O. R., Matocha, J. E., Morrison, J. E. et Unger, P. W. 1998.** Distribution and amount of soil organic C in long-term management system in Texas. *Soil Tillage Res.* **47**: 309–321.
- Rasmussen, P. E., Albrecht, S. L. et Smiley, R. W. 1998.** Soil C and N changes under tillage and cropping systems in semi-arid Pacific Northwest agriculture. *Soil Tillage Res.* **47**: 197–205.
- Razafimbelo, T., Barthès, B., DeLuca, E. F., Larré-Larrouy, M.-C., Laurent, J.-Y., Cerri, C. C. et Feller, C. 2003.** Effet du paillis des résidus de canne à sucre sur la séquestration de carbone dans un sol ferrallitique argileux du Brésil. *Etude Gestion Sols* **10**: 191–200.
- Reicosky, D. C. et Lindstrom, M. J. 1995.** Impact of fall tillage on short-term carbon dioxide flux. Pages 177–198 *dans* R. Lal, J. Kimbl, E. Levine, et B. A. Stewart, eds. *Soils and global change*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Reicosky, D. C. et Lindstrom, M. J. 1993.** Fall tillage method: effect on short-term carbon dioxide flux from soil. *Agron. J.* **85**: 1237–1243.
- Saby, N., Schwartz, C., Walter, C., Arrouays, D., Lemercier, B., Roland, N. et Squidant, H. 2004.** Base de données d'analyses de terre. Procédure de collecte et résultats de la campagne 1995–2000. *Etude Gestion Sols* **11**: 235–254.
- Sainju, U. M., Singh, B. P. et Whitehead, W. F. 2002.** Long-term effects of tillage, cover crops, and nitrogen fertilization on organic carbon and nitrogen concentrations in sandy loam soils in Georgia, USA. *Soil Tillage Res.* **63**: 167–179.
- Six, J., Ogle, S. M., Breidt, F. J., Conant, R. T., Mosier, A. R. et Paustian, K. 2004.** The potential to mitigate global warming

with no-tillage management is only realized when practised in the long term. *Global Change Biol.* **11**: 155–160.

Smith, P., Andrén, O., Karlsson, T., Perälä, P., Regina, K., Rounsevell, M. et Van Wesemael, B. 2005. Carbon sequestration potential in European croplands has been overestimated. *Global Change Biol.* **11**: 2153–2163.

Smith, P., Powelson, D., Glendining, M. et Smith, J. U. 1998. Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. *Global Change Biol.* **4**: 976–685.

Stockfish, N., Forstreuter, T. et Ehlers, W. 1999. Ploughing effects on soil organic matter after twenty years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany. *Soil Tillage Res.* **52**: 91–101.

Taboada, M. A., Micucci, F. G., Cosentino, D. J. et Lavado, R. S. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil Tillage Res.* **49**: 57–63.

Tebrügge, F. et Düring, R. A. 1999. Reducing tillage intensity: a review of results from a long-term study in Germany. *Soil Tillage Res.* **53**: 15–28.

Thévenet, G., Mary, B. et Wylleman, R. 2002. Stockage du carbone et techniques de travail du sol: Bilan de 30 années

d'expérimentation en grande culture. *C. R. Acad. Agric. France* **88**: 71–78.

Vinten, A. J. A., Ball, B. C., O'Sullivan, M. F. et Henshall, J. K. 2002. The effects of cultivation method, fertilizer input and previous sward type on organic C and N storage and gaseous losses under spring and winter barley following long-term leys. *J. Agric. Sci.* **139**: 231–243.

Wander, M. M., Bidart, M. G. et Aref, S. 1998. Tillage experiments on depth distribution of total and particulate organic matter in 3 Illinois soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **62**: 1704–1711.

Wander, M. M., Bidart, M. G. et Aref, S. 1998. Tillage experiments on depth distribution of total and particulate organic matter in 3 Illinois soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **62**: 1704–1711.

Wander, M. M. et Yang, X. 2000. Influence of tillage on the dynamics of loose- and occluded- particulate and humified organic matter fractions. *Soil Biol. Biochem.* **32**: 1151–1160.

Wylleman, R., Mary, B., Machet, J. M., Guérif, J. et Degrendel, M. 2001. Evolution des stocks de matière organique dans les sols de grande culture: analyse et modélisation. *Perspectives Agricoles* **206**: 16–19.