

Séquestration du carbone dans le sol

Martial BERNOUX¹, Christian FELLER², Vincent ESCHENBRENNER²,
Carlos C. CERRI³, Carlos E. P. CERRI³

¹IRD – UR Seq-C/CENA/USP, CP 96, 13400-970 Piracicaba – SP, Brésil (mbernoux@cena.usp.br)

²UR Seq-C, IRD, Laboratoire MOST, BP 64501, 34394 Montpellier cedex 5, France

³CENA/USP, CP 96, 13400-970 Piracicaba – SP, Brésil

Résumé

Les préoccupations sur le réchauffement global et l'augmentation des teneurs en gaz à effet de serre (GES, en particulier CO₂, CH₄, N₂O) de l'atmosphère conduisent à s'interroger sur le rôle des sols en terme de source ou de puits de C. Les sols constituent un important réservoir de C, environ 1500 Gt C, ce qui équivaut à presque trois fois la quantité stockée dans la biomasse terrestre, et deux fois celle de l'atmosphère. Toute modification de l'usage des terres et, même pour les systèmes agricoles à l'équilibre, toute modification de l'itinéraire technique, peut induire des variations du stockage du carbone dans les sols. Ponctuellement ces variations du stock sont dues à divers processus: modification des apports de matière organique, transfert sous forme solide (particulièrement par érosion en nappe) ou soluble (lixiviation et ruissellement), et pertes par minéralisation (CO₂, CH₄) de la matière organique des sols. Il est donc naturel que les sols apparaissent comme potentiellement importants dans le contrôle des stocks et flux de carbone.

Ainsi la « séquestration du carbone par les sols » apparaît sous de nombreux points de vue (économique, environnemental, et agronomique par exemple) comme une solution avantageuse d'atténuation des concentrations des GES atmosphériques.

Mais en premier lieu il convient de définir ce que l'on entend par « séquestration » de carbone. En effet ce terme est (trop) souvent employé uniquement pour traduire une augmentation des stocks de carbone du sol. Hors, en plus du CO₂, les sols sont concernés par les flux de méthane et de N₂O. Le protocole de Kyoto couvre l'ensemble des sources et des puits de ces gaz. Les calculs des émissions nettes des signataires de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques sont faits en équivalents CO₂, en tenant compte du potentiel de réchauffement global des différents GES. Nous proposons donc une définition différente de la « séquestration du carbone » qui prend en compte tous les transferts de matière sous forme solide (érosion, dépôts), liquide (C dissous) et gazeuse (flux de GES à l'interface sol-atmosphère) exprimé en équivalent CO₂.

Mots clés : Définition, Stocks, Flux, Gaz à Effet de Serre, Potentiel de Réchauffement Global, Compartiments

Abstract

Concerns on global warming and on increasing atmospheric greenhouse gas concentrations (GHG, mainly CO₂, CH₄, N₂O) have lead to question on the role of the soils in term of C source or sink. Soils constitute a large pool of C, approximately 1500 Gt C, which is equivalent to almost three times the quantity stored in the terrestrial biomass, and twice that in atmosphere. Any modification of the land-use and, even for the agricultural systems at steady state, any modification of the management, can induce variations of the soil C stocks. Punctually these variations of stock are due to various processes: modification of the organic matter inputs, transfer in solid form (particularly by erosion) or soluble (leaching and run-off),

and losses by mineralisation (CO_2 , CH_4) of the soil organic matter. It is therefore natural that the soils seem potentially significant in the control of the C stocks and fluxes.

Thus the "soil carbon sequestration" appears under many points of view (economic, environmental, and agronomic for example) as an advantageous solution to mitigate the atmospheric GHG concentrations.

But initially it is advisable to define what one understands by "carbon sequestration". Indeed this term (too much) often is only used to represent an increase in soil C stocks. In addition to CO_2 , soils are concerned with methane and N_2O fluxes. And, the Kyoto Protocol covers all sources and sinks of the gases. Calculations of the net emissions of the signatories of United Nations Framework Convention on the Climate Change (UNFCCC) are made in equivalents of CO_2 , by taking account of the potential of global warming potential of each gas. Therefore, We propose a different definition of the " carbon sequestration " which takes into account all the exchanges of matter in solid form (erosion, deposits), liquid form (C dissolved) and gaseous form (fluxes of GHG at the soil-atmosphere interface) expressed in equivalent CO_2 .

I. Introduction

L'attention portée au réchauffement global et à l'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère (principalement CO_2 , CH_4 , et N_2O) a conduit à s'interroger sur le rôle joué par les sols en tant que source ou puits de carbone (C) (Houghton, 2003). Si l'on exclue les roches carbonatées, les sols constituent le plus grand compartiment de C à la surface de la Terre, approximativement 1500 Gt C, l'équivalent d'environ trois fois les stocks de la biomasse continentale et deux fois ceux de l'atmosphère (Lal, 2003). Le stock de C du sol étant fortement dépendant du mode d'usage des terres ou des pratiques culturales, une modification de ceux-ci peut conduire à des changements importants des stocks de C des horizons de surface des sols, dans le sens d'une diminution ou d'une augmentation (Schuman et al., 2002). Ces variations, qui concernent essentiellement les horizons de surface (entre 0 et 30 cm de profondeur), sont dues, à l'échelle parcelle, à divers processus comme : les modifications du niveau et de la qualité des restitutions organiques (Jenkinson et al., 1992; Paustian et al., 1992; Trumbore et al., 1995), le transfert (dépôt, érosion, ruissellement, lixiviation) de matières organiques (MO) sous formes solide et soluble (Chan, 2001; Lal, 2002), les pertes par minéralisation (CO_2 , CH_4) de la MO du sol (Schimel, 1995; Shang et Tiessen, 1997). Pour les sols tropicaux, l'ensemble de ces variations peut représenter parfois jusqu'à 50 % du stock initial des 20 premiers centimètres du sol (Feller et al., 1991 ; Feller et Beare, 1997). Ainsi, par son mode de gestion des sols, l'homme peut espérer agir sur les flux de C entre les écosystèmes continentaux et l'atmosphère pour un meilleur contrôle des flux de GES (King et al., 1997; Schlesinger, 2000).

Au début des années 1990, la société globale a pris conscience de l'importance potentielle que représente, pour le changement climatique, l'augmentation des concentrations de GES d'origine anthropique dans l'atmosphère, et de la nécessité de diminuer ces concentrations. Deux types d'actions peuvent être envisagées : 1) diminuer le niveau des émissions de GES, 2) favoriser le transfert et stockage de ces gaz dans d'autres compartiments terrestres où ils seraient sous une forme stabilisée (par exemple, sous forme de sédiments carbonatés, de biomasse végétale ligneuse, ou de MO des sols). Le sol représente donc un de ces compartiments. Pour nommer ce phénomène de transfert, transformation et de stabilisation de ces GES de l'atmosphère dans d'autres compartiments, les termes de

« séquestrer » et « séquestration » sont souvent utilisés pour renforcer le côté spectaculaire du phénomène et exercer un effet médiatique.

Quand ces dénominations sont appliquées au potentiel que représente le sol pour limiter l'effet de serre en relation à l'usage des terres, au changement d'usage ou encore à la reforestation (LULUCF en anglais), on utilise la locution « séquestration de carbone dans le sol ». De plus en plus de publications scientifiques réfèrent aux trois termes Séquestration, Carbone et Sol et leurs équivalents anglais (Tableau 1). On peut noter que, bien que la recherche bibliométrique concernant le Tableau 1 ait commencé avec l'année 1945, la première apparition des trois termes semble dater de 1991 seulement.

Tableau 1. Nombre de références indexées dans le « Science Citation Index Expanded » du ISI-Web of science (1945-2003) avec les trois termes « sol (ou soil) », « carbone (ou carbon) » et « séquestration (ou sequestration) » (recherche 1) ou les deux termes « sol (ou soil) » et « carbone (ou carbon) » (recherche 2), respectivement dans le texte et dans le titre (entre parenthèses).

Années	Nombre de références trouvées selon les recherches		Recherche1/ Recherche2
	Recherche 1	Recherche 2	%
1945-1990	0	719	0
1991	1 ^a	643	1,6
1992	5 (1 ^b)	694	7,2
1993	14 (1)	816	17,2
1994	7	908	7,7
1995	21 (1)	985	22,3
1996	24	1220	19,7
1997	36 (2)	1398	25,7
1998	47 (3)	1520	30,9
1999	38 (3)	1565	24,3
2000	94 (9)	1616	58,2
2001	104 (18)	1725	60,3
2002	150 (14)	1850	81,1
2003 (jusqu'au 6 aout)	83 (7)	1282	64,7
Total (1940-2003)	625 (59)	16941	36,9

^aThornley et al., 1991; ^bDewar et Cannell, 1992.

Si, comme le montre le Tableau 1, ces termes sont de plus en plus utilisés, il est toutefois rarement donné une définition précise du terme « séquestration ». L'objet de cet article est une revue et discussion des définitions disponibles actuelles ainsi qu'une proposition d'une nouvelle définition en insistant sur les précautions à prendre quand on se réfère à la séquestration du carbone dans le sol.

II. Définitions disponibles et concepts

Une liste des définitions disponibles dans les publications, ou sur les sites web est donnée ci-dessous.

- Définition du Département de l' Energie USA (USDOE) : « La Séquestration du Carbone dans les écosystèmes continentaux est soit le prélèvement net du CO₂ de l'atmosphère

soit l'empêchement d'émissions nettes de CO₂ des écosystèmes terrestres vers l'atmosphère." (US Department of Energy, 1999)

- Définition du Département de l'Agriculture (USDA): " Qu'est-ce que la Séquestration du Carbone? Les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone peuvent être diminuées, ou par une réduction des émissions, ou par un prélèvement du dioxyde de carbone de l'atmosphère et son stockage dans des écosystèmes océaniques, aquatiques d'eaux douces ou continentaux." (USDA – Frequently Asked Questions, <http://www.usda.gov/oce/gcpc/sequeste.htm>);
- Définition du Laboratoire National de Oak Ridge (ORNL): "Du point de vue des écosystèmes continentaux, la Séquestration du Carbone est le prélèvement du dioxyde de carbone de l'atmosphère par un renforcement naturel des processus d'absorption et le stockage du carbone à long terme dans la végétation et les sols. La séquestration du carbone peut être faite en fixant plus de carbone dans les plantes par la photosynthèse, en augmentant la productivité de la biomasse végétale (biomasse par unité de surface), en réduisant la décomposition de la matière organique du sol, et en augmentant les superficies de terres couvertes par des systèmes séquestrants » (Jacobs, 1999)
- Position de la Société Américaine de Science du Sol (SSSA): " La Séquestration du Carbone réfère au stockage de carbone sous une forme solide et stable. [...] La quantité de carbone séquestré sur un site donné reflète le bilan à long terme dû aux mécanismes de prélèvement et de largage du carbone. (Position of the SSSA, 25 octobre, 2001: document www.soils.org/carbseq.html)"

Par ailleurs, des spéculations fortes sont en cours au sujet d'un futur marché du C. Les pratiques de LULUCF ont été acceptées comme des options d'atténuation du changement climatique en vue des « Crédits Carbone » dans un marché financier international pour les 5 premières années de la période d'engagement du Protocole de Kyoto (2008-2012). En ce qui concerne le « Mécanisme de Développement Propre (MDP) », les négociations internationales ne reconnaissent que l'afforestation et la reforestation comme éligibles en tant qu'activités LULUCF « puits de C » (Bernoux et al., 2002). Le MDP sera établi sur des projets spécifiques pris en charge financièrement par les pays de l'Annexe I (grosso modo les pays du Nord) et développés dans les pays de la Non Annexe I (grosso modo les pays du Sud). Aussi, nous rapportons ci-dessous, les définitions de la séquestration du C, données par les entités potentielles qui organiseront ces projets et/ou le commerce du marché du C :

- Corporation Ecoénergétique Internationale (Ecoenergy International Corporation, EIC): « La Séquestration du Carbone est une stratégie pour ralentir l'accumulation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère par absorption de ce carbone dans le sol et la végétation pérenne. Ceci peut être atteint par la reforestation, l'agroforesterie ou la gestion des forêts, toutes activités qui protègent ou augmentent le « puits » de carbone existant. Les puits de carbone comprennent les forêts et les autres écosystèmes, ainsi que les cultures en agriculture durable qui séquestrent du carbone dans le sol et dans les produits agricoles à longue durée de vie » (<http://www.eic-co.com/sequestration.htm>);
- CO2e.com (www.CO2e.com): « La Séquestration du Carbone est une Catégorie du Marché Boursier de CO2e. Cela réfère aux projets qui capturent et stockent le carbone, pour une période de temps donné, de telle sorte qu'ils empêchent qu'il soit relargué dans l'atmosphère ; l'étendue de surface concernée est communément nommée puits de carbone (Un puits de carbone est un réservoir qui peut absorber ou « séquestrer » le dioxyde de carbone de l'atmosphère. Les forêts sont les formes les plus communes de puits, aussi bien que les sols, les tourbes, les permafrosts, les eaux océaniques et les dépôts de carbonate au fond des océans). Les projets de Séquestration du Carbone comprennent: la Séquestration par les Forêts; la Conservation des Terres; la Conservation

des Sols et l'Usage des Terres; la Récupération du CO₂ Perdu/ Injection Profonde » (<http://www.co2e.com/common/glossary.asp>).

Il est notable que, dans le Protocole de Kyoto (UNFCCC, 1998), le mot "séquestration" n'apparaît qu'une seule fois, dans l'article 2.1: "Each Party included in Annex I, in achieving its quantified emission limitation and reduction commitments under Article 3, in order to promote sustainable development, shall: (a) Implement and/or further elaborate policies and measures in accordance with its national circumstances, such as: [...] (iv) Research on, and promotion, development and increased use of, new and renewable forms of energy, of carbon dioxide **sequestration** technologies and of advanced and innovative environmentally sound". Dans la traduction française de cet article, le terme « sequestration » est remplacé par « piégeage », et « séquestration » ou « séquestrer » n'apparaissent pas : « Chacune des parties visées à l'annexe I, pour s'acquitter de ses engagements chiffrés en matière de limitation et de réduction prévus à l'article 3, de façon à promouvoir le développement durable : a) Applique et/ou élabore plus avant des politiques et des mesures, en fonction de sa situation nationale, par exemple les suivantes : [...] Recherche, promotion, mise en valeur et utilisation accrue de sources d'énergie renouvelables, de technologies de **piégeage** du dioxyde de carbone et de technologies écologiquement rationnelles et innovantes. » Qui plus est, c'est dans une partie qui n'a pas de relation directe avec le secteur LULUCF qui, lui est traité par les points a-ii et a-iii du même article.

Un autre document important, qui concerne les sols et leur gestion, est le Rapport Spécial sur LULUCF de la Commission Internationale sur le Changement Climatique (IPCC, 2000). Ce rapport définit la séquestration, comme « le processus d'augmentation de la teneur en carbone d'un compartiment carboné autre que l'atmosphère »

III. Discussion

La plupart de ces définitions (spécifiques ou non au sol) sont basées sur l'enlèvement du CO₂ de l'atmosphère et son stockage sous une forme organique dans les compartiments sol et plante. Seuls SSSA et IPCC (dans son Rapport Spécial sur LULUCF) donnent une définition basée seulement sur le stockage du C, et précisent que cela doit être dans un compartiment stable. Quelques autres définitions envisagent d'autres compartiments comme les eaux douces et océaniques et les sédiments carbonatés.

Un défaut majeur de ces définitions est de considérer seulement les flux de CO₂. En fait, concernant les GES, en plus de CO₂, les sols sont concernés aussi par les flux de méthane (CH₄) et d'oxyde nitreux (N₂O). Aussi, le Protocole de Kyoto couvre toutes les sources et les puits des GES. Qui plus est, le calcul des émissions nettes pour les signataires de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (UNFCCC) doit être exprimé en équivalents de CO₂, en prenant en compte le potentiel de réchauffement global (PRG) de chaque gaz. Les PRGs sont les mesures relatives, pour une période de temps déterminé, de l'effet radiatif d'une substance donnée en prenant ici, comme référence, le CO₂ auquel on attribue une valeur de 1. Sur cette base, le Troisième Rapport d'Évaluation de l'IPCC (IPCC, 2001) donne pour les PRGs, et pour un horizon séculaire (100ans-PRG), des valeurs de 23 pour le CH₄ et de 296 pour le N₂O. Ceci signifie qu'un seul kg de CH₄ ou de N₂O en terme de forçage radiatif est aussi efficace respectivement que 23 ou 296 kg de CO₂. Exprimé sur une base de quantités de C-CO₂, 1 kg de C-CH₄ équivaut à 8,36 kg de C-CO₂, et 1kg de N-N₂O à 126,86 kg C-CO₂.

Une revue bibliographique récente par Six et al. (2002) illustre l'importance de ces considérations. Les auteurs trouvent que, aussi bien pour les sols tempérés que tropicaux, une augmentation moyenne des stocks (0-30 cm) de C ($325 \pm 113 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) est observée dans les systèmes impliquant des non labours et semis direct dans couverture végétale (systèmes SCV) en comparaison avec les systèmes traditionnels. Mais les données disponibles pour les sols tempérés montrent aussi que, sous SCV la fixation du méthane est accrue ($0,42 \pm 0,10 \text{ kg C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) tandis qu'à l'opposé les émissions de N_2O (effet négatif) augmentent notablement ($2,91 \pm 0,78 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$). Lorsque ces émissions de N_2O sont exprimées en équivalent C- CO_2 , dans certains cas, elles contrebalancent, en terme de potentiel de réchauffement, l'effet positif du C stocké dans le sol par ces pratiques. Les auteurs citent d'autres changements liés aux pratiques de SCV et concluent que, si du point de vue agronomique les systèmes SCV sont intéressants, sur les aspects de bilans de GES, il est nécessaire de poursuivre les recherches pour préciser et quantifier les interactions entre le travail du sol, le niveau et le mode d'application des engrais et les rotations culturales, et les conséquences, non seulement sur le stockage de C dans le sol, mais aussi sur les flux de CH_4 et N_2O , particulièrement pour les sols tropicaux pour lesquels l'on manque de données sur ce sujet. Concernant les bilans de N_2O , la même question se pose pour tous les systèmes améliorants à base de légumineuses utilisées comme plante de couverture ou engrais vert, car quelques travaux indiquent que les émissions de N_2O avec certaines légumineuses peuvent être non négligeables au cours de la décomposition de leur matière végétale (Giller et al., 2002 ; Flessa et al., 2002; Millar et al., soumis). D'une manière générale, les différents compartiments à considérer à l'échelle de la parcelle pour une estimation des flux d'équivalents C au cours d'une période donnée sont représentés sur la Figure 1.

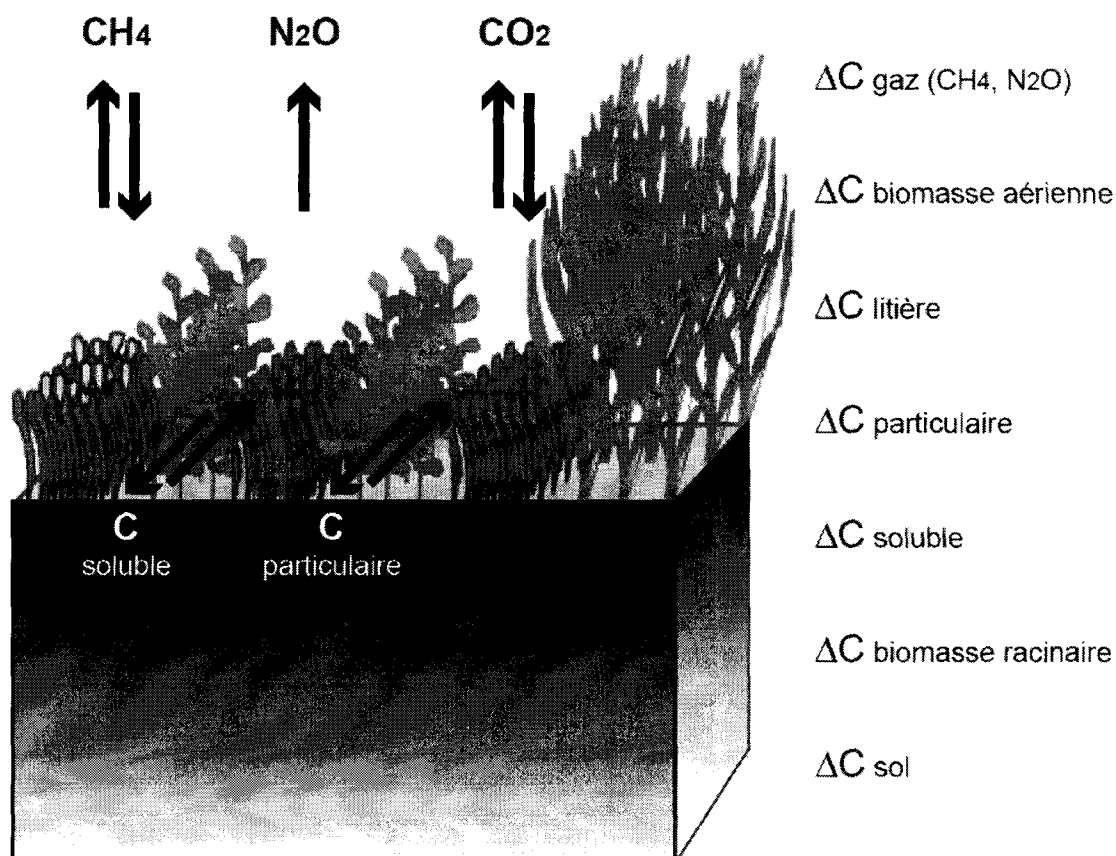


Figure 1. Flux (flèches) et changements () à prendre en considération, à l'échelle parcelle, pour une estimation complète des bilans de C et de potentiel de réchauffement global pour un agrosystème donné.

En fait, pour être complet, la comparaison de systèmes séquestrants et conventionnels devrait comptabiliser tous les contributeurs au PRG net pour ces systèmes de production à la parcelle et hors parcelle (Robertson et al., 2000 ; Flessa et al., 2002), comme les machines agricoles, les émissions directes ou indirectes liées au chaulage (Bernoux et al., 2003) et à l'application de pesticides, d'herbicides et d'engrais azotés..

A partir de ces considérations, il apparaît clairement que le concept de « séquestration du carbone dans le sol » ne peut être limité aux seules approches de stockage du C ou de bilans de CO₂. Tous les flux de GES doivent être comptabilisés en les exprimant en équivalents de C-CO₂ sur une base de potentiel de réchauffement global, et en considérant la totalité des sources d'émissions et des puits de stockage au niveau parcelle et pour l'ensemble du système sol-plante. C'est d'ailleurs, en fait l'ensemble du système sol-plante qui doit être considéré, car on ne peut définir un niveau de séquestration de C pour un sol donné sans faire référence à un agrosystème donné. Ceci pose d'ailleurs différents problèmes de ce qui doit être pris en considération, à l'échelle parcelle, ou au niveau de la comptabilité nationale, pour l'établissement des bilans nationaux de GES. Lors de l'élaboration d'un inventaire national des émissions, les calculs sont fait par secteurs d'activité. Ainsi par exemple, on comptabilise en équivalent CO₂ les émissions produites lors de la fabrication des engrais, ou encore lors de la fabrication de la chaux (Bernoux et al., 2002). Ces émissions, sous peine de double comptabilisation, ne peuvent pas être prises en compte dans un bilan des flux directs et indirects à la parcelle qui serait étendu à la nation. Mais, par exemple, si pour une même quantité d'engrais apporté on observe des émissions différentes selon la gestion des parcelles (semis direct versus semis conventionnel), il faut prendre en compte ces différences lors de l'extrapolation au niveau national. Par contre, à l'échelle de la parcelle, ce sont bien tous les flux directs et indirects qu'il faut comptabiliser pour pouvoir comparer en absolu des agro-écosystèmes différents (pâturage versus agroforesterie par exemple) entre eux.

Aussi, nous proposons une nouvelle définition qui peut-être appliquée éventuellement au seul compartiment Sol, mais qui est plus intéressante pour l'ensemble du système Sol-Plante des agro-écosystèmes continentaux, et qui prend en compte, pour une période donnée, l'ensemble des flux gazeux des GES aux interfaces sol-plante-atmosphère, flux exprimés en équivalents C ou en équivalents CO₂. Ces flux gazeux peuvent être originaires de différents compartiments, solides ou solubles, organiques ou minéraux, de l'écosystème.

La « Séquestration du Carbone dans le Sol » ou plutôt « Séquestration du Carbone dans le système Sol-Plante » pour un agro-écosystème donné, en comparaison avec un agro-écosystème de référence, et pour une période et une surface données, doit être considérée comme le résultat du bilan net, exprimé en équivalents C-CO₂ ou en équivalents CO₂, de tous les flux directs de GES à l'interface sol-plante-atmosphère, mais aussi de tous les flux indirects (combustibles, émissions animales, ...).

Au-delà de cette définition générale, il est important de préciser les points suivants :

- quels sont la forme et le temps moyen de résidence du C séquestré à l'échelle parcelle ?
- quelles sont les échelles de temps concernées ?
- comment considérer les transferts de C ou équivalents C hors sites ?
- comment prendre en compte la séquestration du carbone, mesurée à l'échelle parcelle, pour les bilans d'émission aux échelles nationales ?

A. Quels sont la forme et le temps moyen de résidence du C séquestré à l'échelle parcelle ?

La séquestration du C sera d'autant plus efficace que le temps moyen de résidence du nouveau C stocké sera plus long. Il est donc absolument nécessaire d'évaluer ces formes de C en relation avec une estimation de leur temps de renouvellement. Comme il n'est pas question de mener systématiquement des recherches sur ce point, deux types d'approche sont envisageables en se basant sur les résultats de la littérature :

- mesurer, par des méthodes simples, les variations de compartiments organiques du sol dont on a, par ailleurs, une évaluation de leur temps moyen de résidence ; différentes approches de fractionnement, tant chimique que physique sont, a priori, envisageables, mais il apparaît clairement que ce sont les fractionnements physiques, en particulier granulométriques, qui permettent de distinguer aisément des compartiments organiques à biostabilités très différentes : MO de la taille des sables, limons et argiles (Feller et Beare, 1997 ; Balesdent et al., 1998) ;
- utiliser des modèles de dynamique de la MO faisant intervenir des compartiments conceptuels définis entre autres par leur biostabilité (comme "actif", "lent", "passif") tels que les modèles Century (Parton et al, 1987), Roth-C (Jenkinson et Rayner, 1977) ou Morgane (Arrouays et al., 1999).

B. Quelles sont les échelles de temps concernées ?

Certaines précautions liées à des considérations d'échelles de temps et d'espace doivent être soulignées. L'échelle de temps considérée doit être suffisante pour couvrir l'ensemble des successions de végétation et de pratiques agricoles pour un agro-écosystème donné (par exemple les successions jachères – cultures) et doit être considéré à des échelles pluridécennales. Selon le Protocole de Kyoto, la première évaluation sera faite en 2010 en considérant la date de référence de 1990. Autrement dit l'échelle de temps considéré ici est de 21 ans.

Par ailleurs, comme le bilan net pour un agro-écosystème donné est toujours déterminé par rapport à un système de référence, ceci pose le problème du choix de l'année 0, ou de son équivalent, date à laquelle l'agro-écosystème séquestrant étudié a été mis en place. Deux approches sont envisageables : diachronique et synchronique (Fig.2).

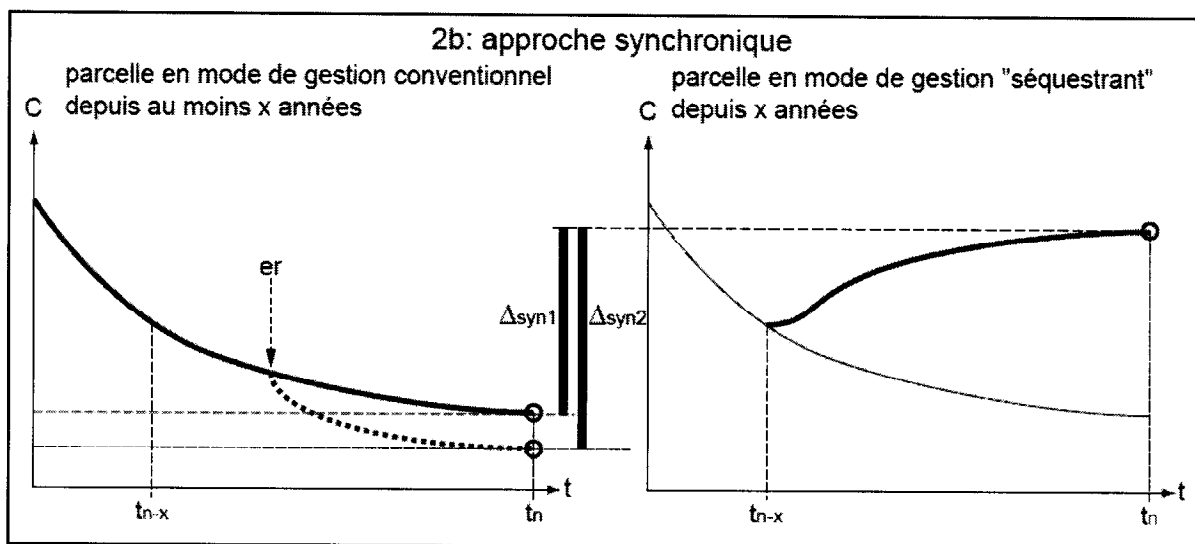
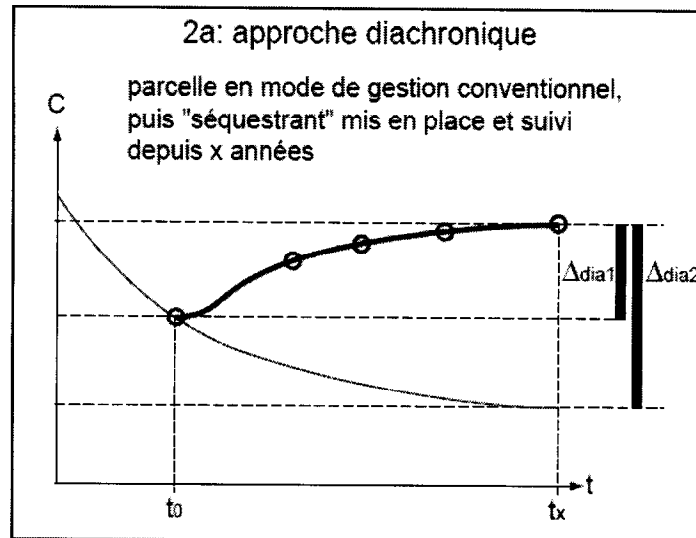


Figure 2. Comparaison des approches diachronique (2a) et synchronique (2b). Cercles noirs : déterminations des stocks de carbone ; er : érosion.

L'approche diachronique consiste à mesurer au cours des années (Δt), **sur une même parcelle**, la séquestration de C dans le sol entre un temps 0 (mise en place du nouveau système) et un temps x. Le C séquestré est alors représenté (Fig.2a) par Δ_{dia1} . Cette valeur n'est exacte que si le C du sol sous l'agrosystème précédent de référence était à l'équilibre. Si ce n'était le cas, et que la dynamique du C allait vers une perte supplémentaire par minéralisation pendant la durée Δt , il faudrait alors considérer, non Δ_{dia1} mais Δ_{dia2} . La seule mesure de Δ_{dia1} n'est donc alors qu'une approximation par défaut du C séquestré. Il faut donc être capable d'évaluer par ailleurs la perte supplémentaire par minéralisation ($\Delta_{dia2} - \Delta_{dia1}$) que l'on aurait eu durant Δt avec l'agrosystème original sans changement des pratiques.

L'inconvénient majeur de l'approche diachronique est que l'observateur doit attendre et mesurer pendant de longues années avant de pouvoir évaluer la quantité de C séquestré, d'où généralement une approche de type synchronique.

L'approche synchronique consiste, à **un instant donné t_n** , à comparer le stock de C d'une parcelle correspondant à la pratique séquestrante menée pendant x années à celui d'une parcelle en mode de gestion conventionnel n'ayant pas subi de modifications de gestion et

supposée représenter le temps t_0 de la parcelle en système séquestrant (Fig. 2b). Le C séquestré est alors représenté par $\Delta_{\text{syn}1}$ (équivalent à $\Delta_{\text{dia}2}$ Fig. 2a). Il se peut toutefois que la parcelle de référence ait subi de fortes modifications (non connues) de ses stocks de C, comme, par exemple, un épisode érosif (er, Fig. 2b). Il y a eu alors pertes de C dans la parcelle de référence sous forme de transfert de C solide hors de la parcelle et la différence des stocks de C du sol entre les deux parcelles est une séquestration apparente $\Delta_{\text{syn}2}$. Cette différence est attribuée au seul processus de séquestration, alors qu'il est en fait la somme d'un processus net de séquestration $\Delta_{\text{syn}1}$ (fixation de C-CO₂) et d'un processus de transfert sous forme de C érodé ($\Delta_{\text{syn}2} - \Delta_{\text{syn}1}$), qui, a priori, n'a pas à être comptabilisé comme une forme de séquestration ou déséquestration (cf. partie suivante). Dans ce cas, $\Delta_{\text{syn}2}$ surestime la séquestration du C. Il faut donc être très attentif dans ce type d'approche aux risques d'érosion existants pour la parcelle en mode de gestion conventionnel, d'autant que l'on sait que les quantités de C susceptibles d'être perdues par érosion au niveau parcelle (de 0 à 1tC/ha/an) sont du même ordre de grandeur que celles susceptibles d'être gagnées par séquestration (Conclusions du colloque « Erosion et séquestration du carbone », Montpellier, septembre 2002).

C. Comment considérer les transferts de C ou équivalents C hors sites ?

Un problème important rarement pris en considération est celui du transfert interparcellaire de C sous forme solide ou soluble : c'est le cas du cycle érosion / sédimentation tel que présenté sur la Figure 3 le long d'une toposéquence. Pendant l'échelle de temps de la mesure des variations des stocks de C sur différentes parcelles de la toposéquence, il se peut qu'une partie des variations observées (diminution ou augmentation) soit due à une perte de C solide ou soluble par érosion et ruissellement sur les parcelles en amont et par une accumulation en aval. La seule mesure des différences de stocks de C à la parcelle pour une échelle de temps Δt ne reflète donc pas uniquement des variations de flux de C-CO₂. Les variations dues aux seuls transferts de C solide ou soluble (C_{ér?} et C_{séd.tot?}; Fig. 3) ne devraient alors pas être comptabilisées dans le bilan des flux de GES. Ce problème est particulièrement important pour les milieux méditerranéens et tropicaux où les processus d'érosion sont très fréquents, même sur de très faibles pentes. Les résultats du colloque « Erosion et séquestration du carbone » (Montpellier, septembre 2002) montrent justement que les quantités de C solide transféré par érosion hydrique peuvent être du même ordre de grandeur, entre 0 et 1tC/ha/an, que celles susceptibles d'être séquestrées sous l'effet d'un mode de gestion améliorant. On peut donc largement sous- ou surestimer le niveau réel de la séquestration du C si l'on ne prend en compte, au moins approximativement en absence de mesures au champ, les transferts interparcellaires de C solide ou soluble.

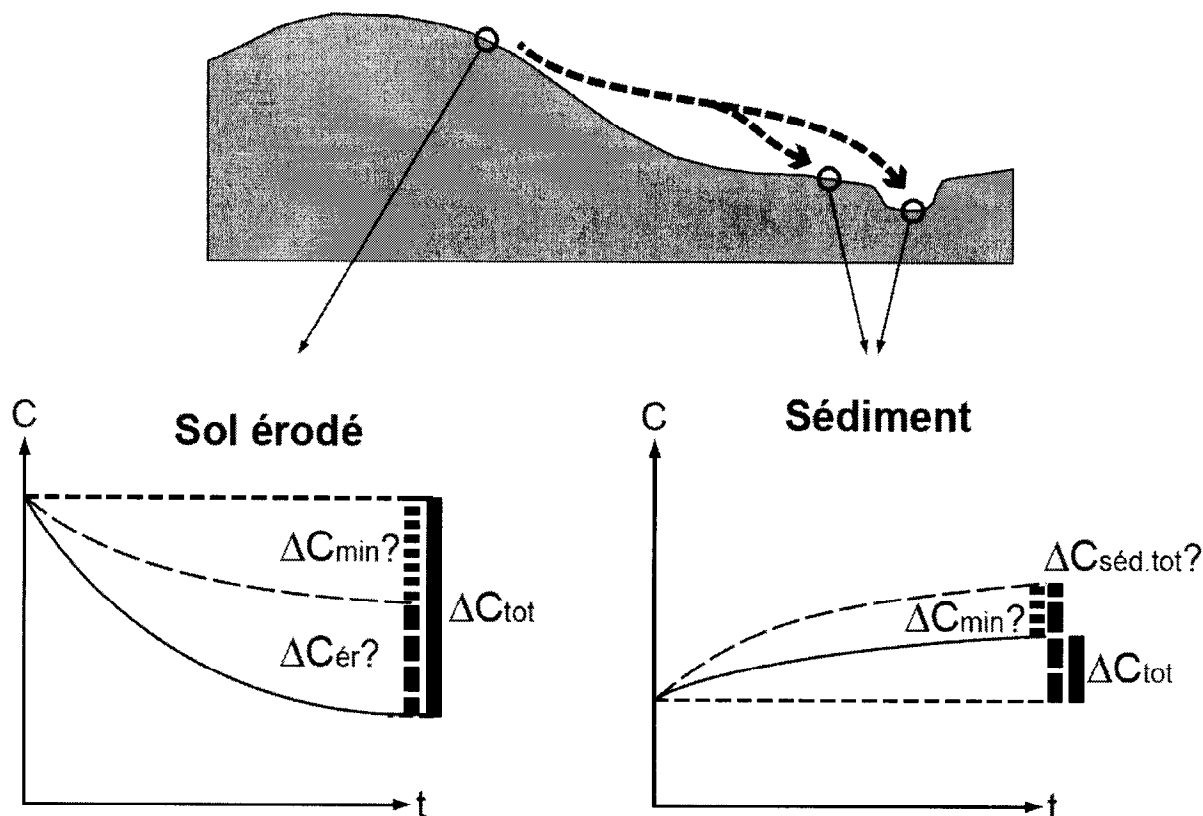


Figure 3. Variation des stocks de carbone résultant de transferts latéraux (solides et/ou solubles) pendant t . Sol érodé : la diminution mesurable des stocks (C_{tot}) correspond à la somme de l'érosion ($C_{ér?}$) et de la minéralisation ($C_{min?}$). Sédiment : l'augmentation mesurable (C_{tot}) provient de la différence entre la sédimentation totale ($C_{séd.tot?}$) et la minéralisation pendant et après le transport ($C_{min?}$).

Un autre aspect très peu documenté est celui du changement, ou non, du temps moyen de résidence du C transféré et/ou déposé. Si l'on considère le cas du C érodé et redéposé ($C_{séd.tot?}$; Fig. 3), on peut s'interroger sur les modifications induites, en terme de turnover de ce C, tout au long du processus de transfert : désagrégation et détachement des particules de sol sur le site initial, transfert par érosion hydrique, déposition en bas de pente ou sédimentation dans des eaux douces ou marines ($C_{min?}$; Fig. 3). L'on sait que le seul processus de désagrégation tend à augmenter le potentiel de minéralisation du C organique par déprotection de la matière organique initialement protégée au sein des agrégats. Des valeurs de l'ordre de 30 % de C minéralisé supplémentaires sont données par Lal (ce symposium), valeurs qui sont à prendre en considération dans l'établissement des flux de GES. Par ailleurs, le C solide une fois déposé dans les alluvions ou sédiments est-il plus stable ou moins stable qu'en son lieu d'origine ? Nous manquons totalement de données à ce sujet. Pour résumer cette partie, et vu la faiblesse de la documentation disponible sur les modifications de turn-over du C induites par la désagrégation, le transport et la sédimentation, nous préconisons de considérer que l'ensemble du C solide ou soluble transféré ne soit pas pris en compte dans l'établissement des bilans de C séquestré.

D. Comment prendre en compte la séquestration du carbone du système sol-plante pour les bilans d'émission aux échelles nationales ?

L'établissement des bilans d'émission des GES, provenant de l'ensemble de l'industrie et de l'agriculture, à l'échelle nationale, est une étape importante pour la gestion et

la juridiction au niveau mondial des flux de GES. De nombreux pays ont commencé à établir ces bilans, à partir de règles normalisées fournies par l'IPCC (IPCC/UNEP/OECD/IEA, 1997).

Notre définition ci-dessus de la séquestration du C implique de prendre en compte, à l'échelle parcelle, toutes les sources et les puits qui contrôlent les flux de GES. Prenons à titre d'exemple, l'utilisation des engrais chimiques azotés. On estime (IPCC/UNEP/OECD/IEA, 1997) que l'application de 100 kg/ha de N-engrais conduit à l'émission de N₂O (un GES à très fort PRG), avec des valeurs moyennes de 1,25 kg/ha N-N₂O soit un équivalent de 158 kg/ha C-CO₂. Ce facteur d'émission de 1,25 (±1) % appliqué aux fertilisants minéraux et organiques et proposé par IPCC/UNEP/OECD/IEA (1997) découle de l'observation d'une relation de proportionnalité établie sur un ensemble de données restreintes entre l'intensité des émissions de N₂O et les quantités d'azote apportées au sol ou aux écosystèmes (Bouwman, 1996).

Si l'on fait, selon notre définition, un bilan des flux de GES à la parcelle, il faudrait prendre en compte la différence des apports de N-engrais, et donc des émissions potentielles de N₂O entre le système améliorant et le système conventionnel. Toutefois, si les résultats à la parcelle sont ensuite utilisés pour des bilans nationaux, il faut être attentif à ce que ces émissions de N₂O par apport de N-engrais, ne soient pas comptabilisées deux fois, d'une part, à partir de la consommation d'engrais déterminée à l'échelle nationale, d'autre part dans le cas des bilans de flux établis à l'échelle parcelle, puis spatialisée et généralisée à l'échelle de l'agriculture nationale pour ce type d'agrosystème. Les exemples pourraient être ainsi multipliés à d'autres types d'apports (chaux, pesticides, etc.). Par contre, concernant toujours N₂O, au-delà de tout apport d'engrais chimiques azotés comptabilisés par ailleurs, certaines pratiques culturales peuvent conduire à des variations des flux de N₂O par simple modification des propriétés des sols ou modification de la qualité et quantités des intrants azotés organiques. C'est le cas des pratiques potentiellement séquestrantes en terme de C-CO₂ comme l'utilisation du non-labour associé à des plantes de couverture ou encore des pratiques agroforestières mettant en jeu l'intégration de légumineuses au système. Dans ces deux cas, il y a un risque important d'émissions plus fortes de N₂O avec le système améliorant (Six et al., 2002 ; Choudhary et al., 2002 ; Millar et al., soumis) et qui peut complètement annuler l'effet bénéfique de la séquestration du C-CO₂ dans le sol. Ces émissions ne sont comptabilisées nulle part ailleurs qu'au niveau parcelle.

IV. Conclusion

La stricte "séquestration du carbone" dans le sol n'est que la moitié de l'histoire : la seule prise en compte du stockage de C sous l'effet du mode de gestion des terres comme une solution au réchauffement global est insuffisante, et l'on doit considérer très fortement les options qui permettent de diminuer aussi les flux de N₂O et CH₄. Aussi la définition de la « séquestration du carbone » dans le sol ou le système sol-plante, doit prendre en compte ces aspects. En raison de son très fort PRG, N₂O apparaît comme un des points clés du concept de séquestration du C. Toutes les pratiques visant à une limitation de l'effet de serre doivent très clairement prendre en considération les problèmes de bilans et flux d'azote, et, particulièrement, l'émission de N₂O. Dans certains cas, l'utilisation de N-engrais peut-être très positif sur le stockage du C dans le sol par une forte augmentation de la productivité végétale et du niveau des restitutions organiques au sol (cas des prairies fertilisées), mais dans de nombreux cas, il risque d'induire des émissions non négligeables de N₂O. L'utilisation de plantes de couverture, riches en azote est alors une alternative, mais qui n'est pas sans

risques non plus, ceux-ci restant encore souvent à évaluer selon les conditions pédo-bio-climatiques du site étudié. Enfin, rappelons aussi que le stockage de C-CO₂ dans le sol n'est pas seulement intéressant en terme strictement environnemental, mais a souvent des effets induits très positifs en terme de fertilité et de biodiversité (faunique en particulier).

Remerciements

Les travaux des auteurs, qui ont mené à cette réflexion, ont été en partie financés par le Fond Français pour l'Environnement Mondial (FFEM-Agro-Ecologie) et Global Environment Facility (projet GFL/2740-02-4381).

References

- Arrouays D., Balesdent J., Deslais W., Daroussin J., Gaillard J. 1999. Construction d'un modèle d'évolution des stocks de carbone organique des sols et évaluation des données disponibles pour sa validation. Premières estimations des stocks français. Etude pour la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre. Lettre de commande 17/98. INRA Orléans, Rapport Final. Avril 1999. 40 p.
- Balesdent J., Besnard E., Arrouays D., Chenu C. 1998. The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence. *Plant and Soil* 201: 49–57.
- Bernoux M., Eschenbrenner V., Cerri C.C., Melillo J.M., Feller C. 2002. LULUCF-based CDM: too much ado for . . . a small carbon market. *Climate Policy* 2: 379–385.
- Bernoux M., Volkoff B., Carvalho M., Cerri, C.C. 2003. CO₂ emissions from liming of agricultural soils in Brazil. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2): art. no.-1049.
- Bouwman A.F. 1996. Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 46(1): 53-70.
- Chan K.Y. 2001. Soil particulate organic carbon under different land use and management. *Soil Use and Management*, 17: 217-221.
- Choudhary M.A., Akramkhanov A., Saggat S. 2002. Nitrous oxide emissions from a New Zealand cropped soil: tillage effects, spatial and seasonal variability. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 93: 33–43.
- Dewar R.C., Cannell, M.G.R. 1992. Carbon Sequestration in the Trees, Products and Soils of Forest Plantations - an Analysis Using Uk Examples. *Tree Physiology*, 11(1): 49-71.
- Giller K.E., Cadisch G., Palm C. 2002. The North-South divide! Organic wastes, or resources for nutrient management? *Agronomie*, 22, 7-8, 703-709.
- Feller C., Beare M.H. 1997. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics, *Geoderma* 79: 69–116.
- Feller C., François C., Villemin G., Portal J.M., Toutain F., Morel J.L. 1991. Nature des matières organiques associées aux fractions argileuses d'un sol ferrallitique, *C.R. Acad. Sci. Paris, Sér. 2*, 312: 1491–1497.
- Flessa H., Ruser R., Dörsch P., Kamp T., Jimenez M.A., Munch J.C., Beese F. 2002. Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, N₂O) from two farming systems in southern Germany, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 91:175–189.
- Houghton R.A. 2003. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? *Global Change Biology*, 9: 500-509.
- IPCC. 2000. *Land-use, Land-use Change and Forestry*. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell,

- and C.A. Johnson (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- IPCC/UNEP/OECD/IEA. 1997. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reporting Instructions (Volume 1); Workbook (Volume 2); Reference Manual (Volume 3). Paris: Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environment Programme, Organization for Economic Co-Operation and Development, International Energy Agency.
- Jacobs G. 1999. Earth's Vegetation and Soil: Natural Scrubber for Carbon Emissions? An Interview with ORNL's Gary Jacobs. *Oak Ridge National Laboratory Review* Vol. 32, Num. 3, p.21-23. Electronic version at www.ornl.gov/ORNLReview/rev32_3/captur.htm.
- Jenkinson D.S., Rayner J.H. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*, 123:298-305.
- Jenkinson D.S., Harkness D.D., Vance E.D., Adams D.E., Harrison A.F. 1992. Calculating net primary production and annual input of organic matter to soil from the amount and radiocarbon content of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 24: 295-308.
- King A.W., Post W.M., Wullschlegel A. 1997. The potential response of terrestrial carbon storage to changes in climate and atmospheric CO₂. *Climatic Change*, 35: 199-227.
- Lal R. 2003. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 22(2): 151-184.
- Lal R. 2002. Soil carbon dynamic in cropland and rangeland. *Environmental Pollution*, 116: 353-362.
- Millar N., Ndufa J.K., Cadish G., Baggs E.M. Nitrous oxide emissions following incorporation of improved-fallow residues in the humid tropics. *Global Biogeochemical Cycles*, soumis.
- Parton W.J., Schimel D.S., Cole C.V., Ojima D.S. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 51, 1173-1179.
- Paustian K., Parton W.J., Persson J. 1992. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen- fertilized long-term plots. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 476-488.
- Robertson G.P., Paul E.A. Harwood, R.R. 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science*, 289(5486): 1922-1925.
- Schimel D.S. 1995. Terrestrial ecosystem and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1: 77-91.
- Schlesinger W.H. 2000. Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 82(1-3): 121-127.
- Schuman G.E., Janzen H.H. Herrick, J.E. 2002. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environmental Pollution*, 116: 391-396.
- Shang C., Tiessen H. 1997. Organic matter liability in a tropical oxisol: Evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density, and magnetic fractionations. *Soil Science*, 162: 795-807.
- Six J., Feller C., Deneq K., Ogle S.M., Sá J.C.M., Albrecht A. 2002. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22(7-8): 755-775.
- Thornley J.H.M., Fowler D., Cannell M.G.R., 1991. Terrestrial Carbon Storage Resulting from CO₂ and Nitrogen- Fertilization in Temperate Grasslands. *Plant Cell and Environment*, 14(9): 1007-1011.
- Trumbore S.E., Davidson E.A., Camargo P.B., Nepstad D.C., Martinelli L.A. 1995. Below-ground cycling of carbon in forest and pastures of eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, 9: 515-528.
- UNFCCC (United Nations Framework convention on Climate Change). 1998. Kyoto protocol to the United Nations Framework convention on Climate Change, In: Report of the Conference of the Parties on its Third Session, Held at Kyoto from 1 to 11 December 1997 – Addendum: Part two: Action Taken by the Conference of the Parties at its Third Session, pp. 7-27. UNFCCC document FCCC/CP/1997/7/Add. 1. 60 pp.
- US Department of Energy. 1999. In Carbon Sequestration - Research and Development. U.S. Department of Energy. December 1999. Report