Rapport sur les ressources en sols du monde 96
ISSN 1014-8531

LA SÉQUESTRATION DU CARBONE DANS LE SOL POUR UNE MEILLEURE GESTION DES TERRES

LA SÉQUESTRATION DU CARBONE DANS LE SOL POUR UNE MEILLEURE GESTION DES TERRES

rapport basé sur le travail de
Michel Robert
Institut national de recherche agronomique
Paris, France

ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE
Rome, 2002

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l' Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

ISBN 92-5-204690-9

Tous droits réservés. Les informations ci-après peuvent être reproduites ou diffusées à des fins éducatives et non commerciales sans autorisation préalable du détenteur des droits d'auteur à condition que la source des informations soit clairement indiquée. Ces informations ne peuvent toutefois pas être reproduites pour la revente ou d'autres fins commerciales sans l'autorisation écrite du détenteur des droits d'auteur. Les demandes d'autorisation devront être adressées au Chef du Service des publications, Division de l'information, FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italie ou, par courrier électronique, à copyright@fao.org

© **FAO 2002**

Préface

Le Protocole de Kyoto prévoit que l'émission nette de gaz à effet de serre peut être réduite soit en diminuant le taux auquel ils sont émis vers l'atmosphère soit en augmentant le taux auquel les gaz sont retirés de l'atmosphère au travers des puits. Les sols agricoles comptent parmi les réservoirs de carbone les plus importants de la planète et leur potentiel de séquestration peut être étendu. Ils fournissent donc une solution prospective pour mitiger la concentration croissante de CO_2 atmosphérique. Dans le cadre du Protocole de Kyoto et des différentes discussions des COP, un grand nombre d'indications font que la séquestration de carbone des terres agricoles et forestières peut être une stratégie attractive pour mitiger les augmentations atmosphériques de gaz à effet de serre.

L'article 3.4 du Protocole de Kyoto apparaît reconnaître l'augmentation des puits liés à l'activité humaine. Les récents agréments post Kyoto considèrent les puits dans les sols, reconnaissant ainsi le potentiel substantiel des sols agricoles, de forêt ou de prairie à séquestrer le carbone et le besoin de prévision de crédits nationaux pour la mise en place d'un puits de carbone des sols agricoles.

Un certain nombre de pratiques agricoles sont connues pour stimuler l'accumulation de carbone additionnel avec une augmentation de la fertilité des sols, des effets positifs sur la productivité des terres et sur l'environnement. Leur rôle pour la gestion humaine du carbone devrait augmenter au fur et à mesure que nous apprenons plus sur leurs caractéristiques et que des nouvelles approches, par exemple les pratiques de conservation, sont introduites.

Le sujet de cette publication est les sols agricoles comme puits de carbone. Le document a été préparé sur les ressources propres de la FAO comme une contribution au programme FAO/IFAD sur la prévention de la dégradation des terres, l'augmentation de la biodiversité des sols et des plantes et la séquestration du carbone au travers d'une gestion durable des terres et des changements d'utilisation des terres.

L'objectif de ce programme est de mettre en avant le besoin urgent de renverser le processus de dégradation des terres lié à la déforestation et à une utilisation inadéquate des terres dans les tropiques et sub-tropiques. Il est proposé d'atteindre cet objectif en promouvant des systèmes améliorés d'utilisation et de gestion des terres qui procurent des gains économiques et des bénéfices environnementaux, une agro- biodiversité accrue, une gestion de conservation et environnementale améliorée et une séquestration plus importante du carbone. Le programme contribuera au développement régional et national en liant la Convention sur le Changement Climatique (UNFCC)-le Protocole de Kyoto, la Convention pour Combattre la Désertification (CDD) et la Convention sur la Biodiversité (CBD), en se concentrant sur les synergies entre les trois conventions.

Cette publication fournit une revue documentée sur la variété des pratiques de gestion des terres qui peuvent fournir des situations doublement gagnantes pour augmenter la production et en même temps accroître les stocks de carbone des sols agricoles et forestiers qui fournissent des crédits pour remplir les objectifs d'émission. Elle devrait contribuer de manière significative aux débats émergeants sur la gestion durable des terres et la prévention du changement climatique.

On peut espérer que ce document prouvera son utilité pour les CDM et autres bailleurs de fonds, planificateurs et administrateurs en contribuant à une information factuelle sur le potentiel de séquestration du carbone dans le sol, à leurs décisions d'entreprendre des recherches, des programmes de développement et d'investissement dans le secteur agricole/rural d'utilisation des terres, afin d'améliorer la gestion des terres, et de lutter contre la dégradation des terres et la déforestation.

Table des matières

Préface iii

Table des matières v

Liste des figures vii

Liste des tableaux viii

Résumé ix

Acronymes / Abréviations xi

Remerciements xii

1. Tendances générales de la séquestration du carbone dans les sols 1
   - Carbone et matière organique dans le sol 1
     - Rôle des sols dans le cycle du carbone 1
     - Dynamique du carbone organique dans les sols 2
     - Le rôle clé de la matière organique dans les sols 4
   - Gestion du carbone dans les sols arides et les zones tropicales 5
     - Les écosystèmes forestiers: l'émission de CO_2 et la séquestration de C dans les sols 6
     - Les prairies: un grand réservoir potentiel de carbone 7
     - Les terres cultivées: le rôle des pratiques agronomiques 7

2. Evaluation du stockage de carbone dans le sol et principaux changements 9
   - Mesure des stocks de C dans le sol 9
   - Evaluation des changements de stocks 12

3. Gestion des forêts, des pâturages et des sols cultivés en vue d'augmenter la séquestration du carbone dans les sols 17
   - Forêt 17
   - Pâturages et prairies 19
   - Les terres cultivées 20
     - Diminution de la perte en carbone 21
     - Augmentation des intrants en matière organique pour le sol 23

4. Les différents scénarios de la séquestration du carbone 27
   - Options de gestion du sol pour la séquestration du carbone 27
     - Sols cultivés 27
     - Forêts 29
     - Pâturages et prairies 30
   - Superficie concernée et le budget de la séquestration du carbone 30

5. Conséquences et impacts principaux de la séquestration du carbone 33
Qualité et fertilité du sol 33
Impacts sur l'environnement 34
Biodiversité et fonctionnement biologique du sol 35
Bénéfices pour les agriculteurs 37
Le marché du carbone 37
Effets du changement climatique 39

6. Propositions 41
Quels sont les scénarios les plus réalistes concernant la séquestration du carbone? 41
Quelles sont les principales implications pour l'agriculture? 42
Le projet IFAD-FAO et le mécanisme de développement propre (MDP) 43
Proposition d'un système de suivi des sols pour la vérification de la séquestration du carbone 44
Quelles sont les principales lacunes des connaissances ? 44
Nouveaux projets et perspectives 45
Conclusion 46

Références 49

Annexes

1. Carta du carbone total dans les sols de France 57

2. Les articles 3.3 et 3.4 du Protocole de Kyoto 59

Liste des figures

1. Le cycle du carbone terrestre: le carbone du sol et le budget mondial du carbone d'après le Programme International Géosphère Biosphère 1

2. Modèle de la dynamique du carbone dans le sol 3

3. Sites de la matière organique du sol dans la matrice du sol 4

4. Estimation annuelle totale des stocks de carbone (t C/ha) dans les forêts tropicales et tempérées 7

5. Evolution de la teneur en carbone dans les sols entre 1928 et 1991 avec ou sans fumier (site expérimental de l'INRA, Versailles «quarante deux parcelles») 12

6. Evolution du carbone dans l'expérience de Rothamsted-Highfield pour la conversion prairie-terre arable 13

7. Evolution de la teneur en carbone organique après déforestation et mise en culture de maïs 13

8. Changements simulés du carbone du sol (0-20 cm de profondeur) de 1907 à 1990 pour la zone à blé de la plaine centrale des États-Unis 14

9. Gestion de la matière organique du sol par l'agriculture 20

10. Protection physique de la matière organique du sol et «déprotection» par le labour 21

11. Effet du labour conventionnel et du non-labour sur la teneur en matière organique dans le sol 22

12. Relations entre le carbone organique et la capacité d'échange en cations dans un sol expérimental 33

13. Organisation hiérarchique de la biodiversité du sol 36

14. Effets du précédent cultural sur le nombre de vers de terre dans des fermes de nouvelle Zélande 36

15. Principaux bénéfices de la gestion durable du carbone du sol à diverses échelles 38

Liste des tableaux

1. Dégradation des sols à l'échelle mondiale en relation avec les grands processus de dégradation des sols 6

2. Teneur moyenne en carbone organique pour quelques types de sols (Classification FAO-UNESCO et WRB) 10

3. Stocks totaux de carbone organique du sol (SOC) en (Pg C) et capacité moyenne de séquestration par grande zone agro-écologique 11

4. Effets de la déforestation sur le ruissellement et l'érosion 17

5. Superficie mondiale des sols cultivés dans des conditions de non-labour de conservation ou d'agriculture de conservation 22

6. Différents systèmes basés sur des plantes pour augmenter la séquestration du carbone 25

7. Principaux effets des pratiques de gestion du sol ou de l'utilisation des sols sur la séquestration du carbone (t/ha/an). Zones arides et tropicales 27

8. Potentiel net de séquestration du carbone lié aux activités additionnelles selon l'article 3.4 du Protocole de Kyoto 28

Résumé

La préoccupation croissante concernant les effets désastreux du réchauffement global contraste avec l'incapacité de nombreux pays à réduire leurs émissions nettes de gaz à effet de serre au rythme et au montant prévus par le protocole de Kyoto. Les négociations qui se sont poursuivies à Bonn (juillet 2001) ont déjà montré une évolution vers l'élargissement des options reconnues pour la compensation des émissions, en particulier la prise en compte des puits de carbone en forêt et dans l'agriculture dans le budget national de carbone (ce dernier puit étant pour l'instant limité aux pays développés dits de l'annexe 1).

Dans le passé, les opinions ont variées sur la question de savoir si la séquestration de carbone dans les sols serait une option réaliste, pratique, pouvant être utilisée à une grande échelle. Récemment les évidences positives se sont renforcées à ce sujet. La plupart des sols du monde utilisés pour l'agriculture ont été appauvris en matière organique durant les cinquante dernières années en particulier en raison des systèmes conventionels de labour et de hersage avant chaque culture, ceci en comparaison avec leur état sous végétation naturelle. Il est établi que ce processus de dégradation peut être réversible. Dans de nombreux cas sous climats humides ou subhumides aussi bien que sous irrigation, la teneur en matière organique a pu être rapidement augmentée après un changement de gestion de terres comprenant un non labour ou un labour et la retention des résidus de récolte en surface. Même en conditions semi-arides, comme au Texas du Sud, le système fonctionne mais à un taux de séquestration de carbone plus faible. La mesure de la variation des stocks dans les sols agricoles est techniquement réalisable, mais elle a été rarement faite jusqu'à maintenant autrement qu'à une échelle expérimentale. Elle peut être appliquée régionalement ou globalement, seulement si les organisations sur les sols au niveau régional ou national comprennent une surveillance systématique des sols, au travers d'une série de sites de surveillance, avec un échantillonnage bien réparti des sols, combiné avec la description des pratiques culturales et une télédétection de la couverture des terres.

Une fois que le nouveau système de gestion des terres est bien compris et appliqué durant quelques années et que les nouveaux équipements ou outils sont en place, le système d'utilisation des terres est compétitif comme cela est démontré dans les pays où ils ont été introduits. En dehors de la séquestration du carbone, les bénéfices incluent de meilleures récoltes et un accroissement de la sécurité alimentaire en particulier pour les années sèches, des coûts moindres et une meilleure distribution des travaux agricoles avec économie de temps au cours de l'année. Le système a déjà été appliqué sur plus de 50 millions d'hectares de terres agricoles jusqu'à ce jour, dans les pays comme le Brésil, le Paraguay, l'Argentine, les États-Unis, l'Australie et il a été validé à une échelle plus restrainte en Inde, Népal, Pakistan...

La séquestration du carbone dans les sols agricoles est durable tant que les agriculteurs utilisent les mêmes pratiques de l'agriculture de conservation car le système est réversible si on utilise à nouveau le labour conventionnel. La permanence de la séquestration implique donc que les agriculteurs soient convaincus par l'expérience et en tirent des bénéfices. Toutefois, la transition à l'agriculture de conservation n'est ni spontanée ni exempte de coût. Toute une symbolique et certains avantages sont attachés au labour par exemple la stimulation de la libération d'azote à partir de la matière organique. La méconnaissance d'autres solutions tend à favoriser le maintien d'une agriculture basée sur le labour qui peut d'ailleurs se justifier dans certaines circonstances.

Durant les deux ou trois années de transition à l'agriculture de conservation des frais supplémentaires sont possibles afin d'acquérir certains équipements. L'incidence des mauvaises herbes, bien que diminuant rapidement avec le temps, peut justifier des applications d'herbicides supplémentaires durant les deux premières années. Les récoltes et la résilience contre la sécheresse augmenteront graduellement, devenant évidente après la première ou deuxième année. Les fermiers devront bien comprendre le nouveau système, et les raisons des différentes règles, et les adapter à leurs besoins et conditions spécifiques. Les fonds pour la séquestration du carbone qui pourraient devenir disponibles par l'un des mécanismes du protocole de Kyoto seraient essentiels pour diffuser l'application de l'agriculture de conservation dans d'autres zones et d'autres pays. Cela peut-être réalisé par l'information des fermiers sur le système, permettant à des fermiers pilotes de l'expérimenter, de l'adapter et de l'appliquer dans leurs conditions spécifiques, de fournir un appui technique et, où cela est nécessaire, un crédit ou de petits supports incitatifs aux premiers expérimentateurs. Une fois que le système a été adapté, démontré, et validé au plan économique sur les premières expérimentations, des contrats avec les fermiers concernant la séquestration du carbone peuvent être suffisants pour stimuler une adaptation rapide des pratiques par la majorité des fermiers.

Les prairies ont également un potentiel élevé pour la séquestration du carbone. Les terres dégradées ou surpâturées peuvent tout particulièrement être restaurées à une productivité élevée par des mesures telles que l'implantation de bande de légumineuses, l'apport de fertilisation phosphatée dans les bandes, le pâturage par alternance avec des périodes de repos pour la terre. L'accroissement de la productivité primaire peut initier un nouveau cycle de fertilité, une masse racinaire plus importante dans le sol, un accroissement de la porosité biologique, du taux d'infiltration, une réduction ou l'élimination de l'érosion et du ruissellement, et une augmentation de l'humidité disponible pour la végétation. Le processus a pour résultat un accroissement de la matière organique stable y compris dans les couches profondes.

Comme dans le cas de l'agriculture de conservation, la transformation d'une utilisation dégradante des pâturages en un système plus productif et durable, qui séquestre le carbone et participe à l'accroissement de la sécurité alimentaire, n'est pas automatique et exempte de coût. Des changements réussis et stables nécessitent que les utilisateurs des terres travaillent ensemble en association, un processus d'initiation, et des investissements initiaux, quoique relativement faibles à l'hectare.

Dès que la productivité de la terre arable ou des terres de pâtures augmente et devient plus résiliante vis à vis de la sécheresse, la pression sur la forêt est réduite et les chances de leur préservation ou de leur gestion durable sont accrues. C'est le cas par exemple pour la production d'énergie ou de matériaux ligneux de longue durée avec une replantation ou régénération immédiate qui permet le maintien de la matière organique du système forestier. L'agroforesterie avec la plantation de palmiers à huile, caoutchouc, café sur les terres déforestées peut également constituer une solution à la préservation ou à la reconstitution du carbone des sols. Une amélioration de la gestion des terres et l'attention portée à la dégradation et à la déforestation sont des options doublement gagnantes: elles sont propices à la lutte contre la pauvreté et à la durabilité ; en même temps de telles mesures permettent aussi d'accroître la séquestration du carbone dans les sols, rendant ainsi les investissements dans le secteur rural agricole plus bénéficiaires pour les fermiers.

Acronymes/ Abréviations

C: carbone

CBD: Convention des Nations-Unies sur la diversité biologique

CCD: Convention des Nations-Unies de prévention de la désertification

CDM: Mécanisme de développement propre

CIRAD: Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

CO_2: dioxyde de carbone

COP: Conférence des parties

FAO: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

GHG: Gaz à effet de serre

GIS: Système d'information géographique

GLASOD: Evaluation globale de la dégradation des terres

GM: Mécanisme Global

GPS: position géoréférencée par satellite

ICRAF: Centre international de recherche sur l'agroforesterie

IFAD: Fond international pour le développement agricole

IPCC: Panel intergouvernemental sur le changement climatique

LULUCF: Occupation des terres, changement d'occupation et forêts

SOM: Matière organique du sol

UNEP: Programme des Nations Unies sur l'Environnement

UNFC: Convention des Nations Unies sur le changement climatique

Remerciements

Cette étude a été préparée par Michel Robert, Directeur de Recherche de l'INRA (Institut National de la recherche Agronomique), France, en tant que chercheur conseil auprès de l'AGLL, en collaboration avec J. Antoine et F. Nachtergaele.

L'étude a bénéficié des contributions de J. Benites, R. Brinkman, R. Dudal et P. Koohafkan.

Ce document a été passé en revue par le Prof. J. Pretty, University of Essex, UK; Prof. R. Lal, Ohio State University, USA; Prof. A. Young, University of East Anglia, UK; Dr. N. Batjes, ISRIC; Dr. M. Swift, Directeur TSDF; le Groupe de Travail Interdépartemental de la FAO pour le changement climatique. Leurs suggestions ont permis de valoriser cette étude.

L'édition française a été préparée par M. Robert et passée en revue par Prof. R. Dudal. Mme Lynette Chalk a offert son concours à la production de ce document.

Chapitre 1

Tendances générales de la séquestration du carbone dans les sols

Il est devenu évident que l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère et le changement climatique qui en résulte auront des effets majeurs au 21ème siècle. Même si les scénarios exacts sont encore incertains, on prévoit des effets négatifs sérieux et il est essentiel que plusieurs actions soient entreprises afin de réduire les émissions de GES et d'augmenter leur séquestration. A ce propos, des nouvelles stratégies et des politiques appropriées pour la gestion de l'agriculture et de la sylviculture doivent être développées. Une option concerne la séquestration du carbone dans les sols ou la biomasse terrestre, en particulier les sols utilisés pour l'agriculture ou la sylviculture. Depuis le protocole de Kyoto, c'est ce que l'on dénomme l'utilisation des terres, le changement d'utilisation des terres et la foresterie (LULUCF) et cela concerne les articles 3.3 et 3.4 du Protocole (IPCC, 2000).

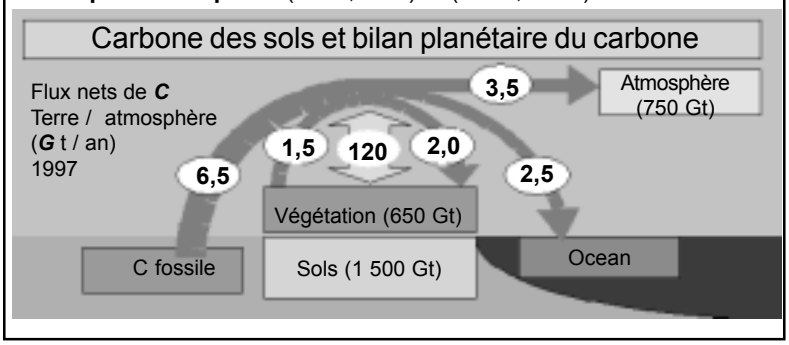
On peut penser que la prise de mesures sur la séquestration du carbone selon le protocole de Kyoto stimulera non seulement des changements importants dans la gestion du sol, mais aura aussi, par l'augmentation de la teneur en matière organique, des effets directs sensibles sur les propriétés du sol et un impact positif sur les qualités environnementales ou agricoles et la biodiversité. Les conséquences incluront une fertilité du sol accrue, et une augmentation de la productivité du sol pour la production des aliments et la sécurité alimentaire. Cet instrument économique rendra aussi plus durables les pratiques agricoles et aidera à prévenir ou à atténuer la dégradation des ressources en sol.

Carbone et matière organique dans le sol

Rôle des sols dans le cycle du carbone

Le cycle du carbone terrestre est illustré par la Figure 1. Dans ce cycle, le carbone organique du sol représente le plus grand réservoir en interaction avec l'atmosphère et est estimé par entre 1 500 et 2 000 Pg C à 1 m de profondeur (2 456 à 2 m de profondeur environ)[1].

Figure 1
Le cycle du carbone terrestre: le carbone du sol et le budget mondial du carbone d'après le Programme International Géosphère Biosphère (IGBP,1998) et (IPCC, 2000)



[1] 1 Pg = 10^{15} g = Gt = 10^{9} tonnes métriques

Le carbone inorganique représente à peu près 750 Pg, mais il est capturé dans des formes plus stables comme les carbonates. La végétation (650 Pg) et l'atmosphère (750 Pg) emmagasinent considérablement moins que les sols. Les flux entre le carbone terrestre ou le carbone organique du sol et l'atmosphère sont importants et peuvent être positifs (séquestration) ou négatifs (émission de CO_2).

Historiquement, de grandes variations ont été notées. Houghton (1995) estime que les émissions correspondant au changement de l'utilisation du sol (déboisement et augmentation des pâturages et des terres cultivées) étaient autour de 120Pg de 1850 à 1990 (de 0,4 Pg/an en 1850 à 1,7 Pg/an en 1990), avec un dégagement net à l'atmosphère de 25 Pg. Selon l'IPCC (2000), la perte historique provenant des sols agricoles était de 50 Pg C pour le dernier demi-siècle, ce qui représente un tiers de la perte totale provenant du sol et de la végétation.

Dans le passé, le développement de l'agriculture a été la cause principale de l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère, mais à l'heure actuelle la combustion du carbone fossile (6,5 Pg) par l'industrie et les transports représentent la contribution principale. Un point important à considérer est qu'à présent, même si la déforestation continue dans les régions tropicales (avec une émission de carbone estimée à environ 1,5 Pg/an), les autres flux sont positifs et autour de 1,8 à 2 Pg C/an sont séquestrés dans l'écosystème terrestre. Ceci représente ce qui est appelé le carbone manquant dans le cycle avec un puits qui peut être situé dans la partie septentrionale de l'hémisphère nord (Amérique du Nord) (Schindler, 1999).

Les principaux facteurs jouant sur l'évolution de la matière organique concernent la végétation (apport de résidus, composition de la plante), puis les facteurs climatiques (température/ conditions d'humidité) et les propriétés des sols (texture, teneur en argile, minéralogie, acidité).

Les autres facteurs, relatifs à la fertilisation du sol (N,P,S), ou l'irrigation, ont un effet sur la production de la plante et donc sur la teneur en matière organique. Le taux de minéralisation de la matière organique dépend principalement de la température et de la disponibilité d'oxygène (drainage), de l'utilisation des terres, du système de culture, et de la gestion des sols et des cultures (Lal *et al*., 1995).Pour un sol déterminé soumis à une pratique constante, un pseudo équilibre est atteint pour le contenu en matière organique du sol après 30 ou 50 ans (Greenland, 1995). Dans le contexte de la lutte contre le réchauffement climatique et du protocole de Kyoto, une question importante est comment créer un puits de carbone important et bien quantifié dans les sols agricoles du monde entier? Une telle séquestration relèverait des articles 3.3 et 3.4 du protocole. Il aurait également des effets additionnels importants pour l'agriculture, l'environnement et la biodiversité.

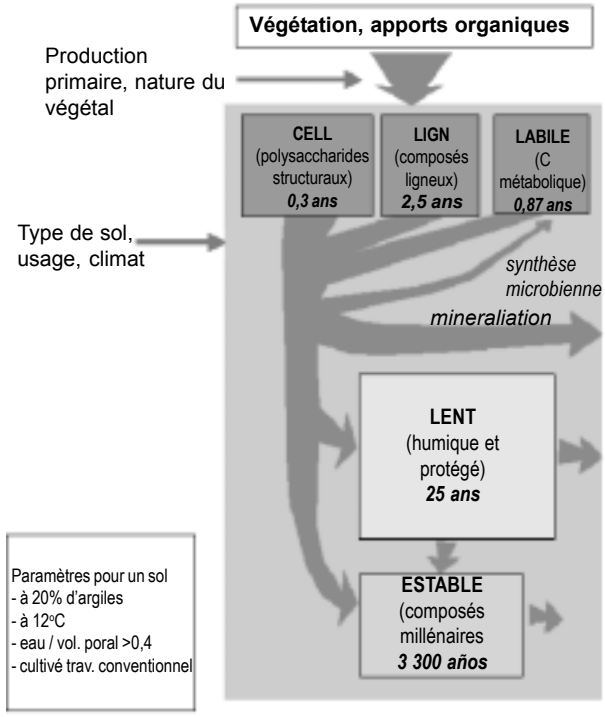
Dynamique du carbone organique dans les sols

Le stock de carbone organique présent dans les sols naturels présente un équilibre dynamique entre les apports de débris végétaux et la perte due à leur décomposition (minéralisation, figure 2). Dans les conditions normales d'aérobie des sols, la majorité du carbone apporté est labile et seulement une petite fraction (1 pour cent) de ce qui entre dans le sol (55 Pg/an) s'accumule dans la fraction stable qu'est la fraction humique (0,4 Pg/an).

La matière organique du sol (MOS) a une composition très complexe et hétérogène et elle est le plus souvent mélangée ou associée aux constituants minéraux du sol. Une grande variété de méthodes ont été développées pour identifier parmi les différents constituants de la matière organique des sols des pools cinétiques, c'est-à-dire des pools ou des compartiments qui peuvent être définis par un temps de résidence déterminé du carbone. La séparation traditionnelle de la

matière organique en fraction humique et fulvique, ne sépare pas des fractions qui ont des cycles différents (Balesdent, 1996). Des méthodes de séparation physique telles que le fractionnement en fonction de la dimension des particules, le fractionnement densimétrique ou le fractionnement selon la dimension des agrégats permet de séparer des fractions qui ont un sens cinétique (Feller *et al.,* 1979 ; Balesdent, 1996). Parmi ces fractions, la matière organique particulaire a été identifiée comme une fraction très sensible à l'usage des terres (Cambardella, 1998; Gregorich *et al.*, 1996). Des méthodes directes existent également pour déterminer la biomasse microbienne qui représente 1 à 5 pour cent de la matière organique totale et est un réservoir d'éléments nutritifs (N,P). C'est une fraction labile qui change avec la saison, mais a aussi une réponse rapide aux changements d' utilisation des terres.

FIGURE 2
Modèle de la dynamique du carbone dans le sol
(d'après Balesdent *et al.*, 2000)

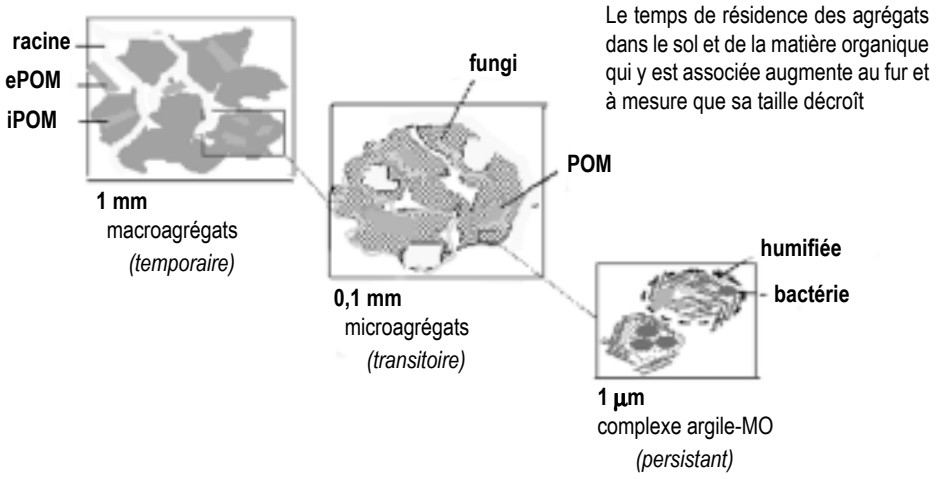


Les méthodes isotopiques telles que la datation par le carbone 14, le carbone 13 ou l'abondance naturelle au carbone 13, sont très puissantes dans la mesure où elles permettent de mesurer le temps de résidence des matières organiques naturelles dans le sol. L'abondance naturelle C13 est utilisable pour des temps de résidence de l'année jusqu'au siècle, et la datation au C14 pour des périodes allant du siècle aux milliers d'années. Les deux méthodes peuvent être appliquées à des échantillons bruts aussi bien qu'à des fractions isolées des sols. Pour être utilisée, l'abondance naturelle C13 exige que le site ait subi un changement de végétation de plantes en C3 à des plantes en C4 ou vice versa.

Le grand avantage des méthodes isotopiques est de mesurer le cycle organique et d'en déduire directement le temps de résidence de différents compartiments. Quand il y a un changement important de la végétation (forêts, cultures ou pâturages), il est possible de suivre l'évolution des différents types de résidus des plantes (Cerri *et al.*, 1995).

Les différents compartiments de C existant dans le sol ont différents temps de résidence qui peuvent aller d'un an à plusieurs années en fonction de la composition biochimique (la lignine est, par exemple plus stable que la cellulose) à des dizaines ou même des milliers d'années pour la fraction stable. Il y a aussi quelques relations avec la composition mais majoritairement avec le type de protection ou le type de liaison. Très souvent, en considérant le carbone stable, une distinction est faite entre la protection ou la séquestration physique ou chimique; physique signifie une encapsulation de fragments de matière organique par les particules d'argile ou les macro- ou micro-agrégats du sol (Figure 3) (Puget *et al.*, 1995; Balesdent *et al.*, 2000); chimique signifie des liaisons spécifiques de la matière organique avec d'autres constituants du sol

FIGURE 3
Sites de la matière organique du sol dans la matrice du sol (Chenu, non publié)**; ePOM= particule de matière organique externe, iPOM= particule de matière organique interne**



(colloïdes ou argiles), mais le plus souvent cela concerne des composés organiques très stables. Toutefois, le terme général de séquestration qui est utilisé dans le Protocole de Kyoto, ne fait aucune différence et est équivalent au terme de stockage, quelle que soit la forme de carbone.

Les différents compartiments sont normalement sensibles à différents facteurs. Les particules de matière organique libre (+ biomasse microbienne) sont contrôlées par les apports de résidus végétaux et le climat. Les facteurs agronomiques (gestion) affectent la taille de ce compartiment (gestion des résidus de récolte ou du mulch). L'agrégation du sol, la texture, et la minéralogie contrôlent le carbone dans les macroagrégats.

Parmi les facteurs agronomiques, le labour a l'effet principal sur la taille de ce compartiment. Les autres compartiments ne sont pas très influencés par les facteurs agronomiques mais principalement par des facteurs pédologiques (microagrégation, composition de l'argile).

Les progrès sur la connaissance de la matière organique et la dynamique du carbone dans les sols sont nécessaires pour mieux gérer la séquestration du carbone.

Le rôle clé de la matière organique dans les sols

La matière organique du sol représente l'indicateur principal de la qualité des sols, à la fois pour des fonctions agricoles (c'est-à-dire la production et l'économie) et pour les fonctions environnementales (parmi elles la séquestration du carbone et la qualité de l'air).

La matière organique, est le principal déterminant de l'activité biologique. La quantité, la diversité et l'activité de la faune et des micro-organismes sont en relation directe avec la présence de la matière organique.

La matière organique et l'activité biologique qui en découle ont une influence majeure sur les propriétés physiques et chimiques des sols (Robert, 1996). L'agrégation et la stabilité de la structure du sol augmentent avec le contenu en carbone des sols. Les conséquences directes sur

la dynamique de l'eau et la résistance à l'érosion par l'eau et le vent. Le carbone des sols affecte aussi la dynamique et la biodisponibilité des principaux éléments nutritifs.

Gestion du carbone dans les sols arides et les zones tropicales

Ce rapport se concentre sur les sols arides et les zones tropicales, qui constituent la préoccupation principale des pays en voie de développement.

Les sols arides sont définis par un index d'aridité qui représente le ratio des précipitations par rapport au potentiel de l'évapotranspiration P/PET avec des valeurs < 0,05 pour les sols hyper-arides, <0,20 pour les sols arides et 0,20–0,50 pour les semi-arides. Ce sont les sols arides les plus caractéristiques, mais souvent la zone sèche humide (0,50-0,65) est aussi incluse (Middleton et Thomas, 1997). Les sols arides représentent à peu près 40 pour cent des terres du monde. La zone naturelle hyper-aride couvre à peu près 1 milliard d'hectares tandis que les zones arides, semi-arides et sub-humide sèches représentent 5,1 milliards d'hectares.

Même si la teneur en carbone et la capacité de fixation de CO_2 par ha des sols arides sont basses, elles peuvent fournir une contribution importante à la séquestration du carbone mondial, tout en prévenant ou diminuant la désertification. Avec une définition aussi large, une grande partie des terres arides est incluse dans la zone tropicale définie comme une partie du monde entre les tropiques, représentant 37,2 pour cent de la surface des terres (4,9 milliards d'hectares). Ces terres peuvent être classées d'après leur type d'occupation.

Les sols cultivés représentent 0,75 milliards d'hectares dans la zone tempérée et 0,65 milliards d'hectares dans la zone tropicale. L'étendue totale potentiellement disponible pour les cultures (avec la production pluviale) serait de 2,6 milliards d'hectares, mais les forêts en couvrent une partie (1,7 milliards d'hectares) et une autre partie ne peut pas être effectivement utilisée à cause de contraintes sévères (Alexandratos, 1995). Les sols irrigués (0, 27 milliards d'hectares) sont inclus.

Les forêts tropicales couvrent des surfaces considérables. Elles représentent plus de deux milliards d'hectares et sont très importantes pour la santé de la planète. La majorité se trouve dans les pays en voie de développement. La meilleure solution serait de les protéger ou au moins d'assurer la meilleure gestion possible en particulier pour celles qui sont déjà dégradées (13 pour cent pour l'Amérique du Sud, 19 pour cent pour l'Afrique et 27 pour cent pour l'Asie); d' autres solutions seront proposées plus tard.

Les prairies permanentes et les pâturages extensifs (terres de parcours ou range-lands) couvrent plus de 3 milliards d'hectares dont la majorité se trouve dans les zones sèches ; l'état de dégradation de ces sols est estimé à 14 à 31 pour cent.

Selon l'évaluation mondiale de la dégradation du sol GLASOD, (Oldeman *et al.*, 1991), les sols dégradés représentent une grande proportion des différents types de sol, quel que soit le genre d'occupation. Le total s'élève à 1965 millions d'hectares dans le monde, dont la plupart sont dans les zones tropicales et arides.

La dégradation physique et chimique, qui sont les principaux et premiers processus, ont très souvent pour résultat la dégradation biologique (Robert et Stengel, 1999). L'érosion par l'eau et par le vent sont de loin, quantitativement, les processus de dégradation les plus importants. Les principales causes sont le déboisement, le surpâturage et la gestion inappropriée du sol (tableau 1). La perte de matière organique n'a pas été identifiée comme un processus de dégradation spécifique, mais en gros, la moitié des sols chimiquement dégradés sont appauvris.

Tableau 1
Dégradation des sols à l'échelle mondiale (en millions d'hectares) en relation avec les grands processus de dégradation des sols (sols modérément ou excessivement affectés d'après Oldeman *et al.*, 1990)

Surface	Erosion hydrique	Erosion éolienne	Dégradation chimique	Dégradation physique	Total (millions ha)
Afrique	170	98	36	17	321
Asie	315	90	41	6	452
Amérique du Sud	77	16	44	1	138
Amérique du Nord et Centrale	90	37	7	5	139
Europe	93	39	18	8	158
Australie	3	15	1	2	6
Total	748	280	147	39	1 214*
Principales causes					
Déforestation (% et millions ha)	43	8	26	2	384
Surpâturage (% et millions ha)	29	60	6	16	398
Mauvaise utilisation (% et millions ha)	24	16	58	80	339
Autres causes (% et millions ha)	4	16	12	2	93
Total (% et millions ha)	100	100	100	100	1 214

* Total de 1 965 millions d'hectares si les sols légèrement affectés sont inclus.

La teneur en matière organique du sol est généralement plus basse là où la dégradation est plus grave. Par conséquent, la quantité de carbone séquestré par le réaménagement des sols dégradés sera considérable. Pour les sols tropicaux, les sols dégradés représentent 45 à 65 pour cent, selon le continent. Cette situation fait espérer de très grandes possibilités de séquestration du carbone dans les sols tropicaux dégradés. Les bénéfices attendus comprendront les améliorations des propriétés chimiques, la biodisponibilité des éléments (une plus grande fertilité), et la réaction contre la dégradation physique, en particulier l'érosion. Par conséquent, la séquestration du carbone aidera à restaurer la qualité des sols dégradés.

Les écosystèmes forestiers: l'émission de CO_2 et la séquestration de C dans les sols

Le stockage et la libération par les écosystèmes forestiers (au travers du reboisement, reforestation et déforestation) sont régis par l'article 3.3 du protocole de Kyoto. Toutefois, l'article 3.4 est concerné lorsque l'on considère la gestion des forêts dans les zones tropicales, à cause de l'interaction forte avec la séquestration du carbone dans les sols.

Les forêts couvrent 29 pour cent des terres et représentent 60 pour cent du carbone de la végétation terrestre. Le carbone emmagasiné dans les sols des forêts représente 35 pour cent du total de carbone présent dans les réservoirs du sol (1 500 Pg). Récemment, un bilan complet du carbone dans les forêts françaises a été entrepris (Dupouey *et al.*, 1999). Cette étude couvrait 540 parcelles du réseau faisant le suivi des forêts européennes. Le total moyen de l'écosystème était de 137 t C/ha ; de ce total, le sol représente 51 pour cent, les débris 6 pour cent, les racines 6 pour cent. Ces statistiques sont très proches de celles données au dernier rapport de l'IPCC 2000 pour la forêt au Tennessee. Des données sont aussi fournies pour la forêt tropicale humide près de Manaus. Le carbone total dans ce système est plus élevé (447 t/ha) et il en est de même pour la réserve organique du sol (162 t, 36 pour cent du total) (figure 4).

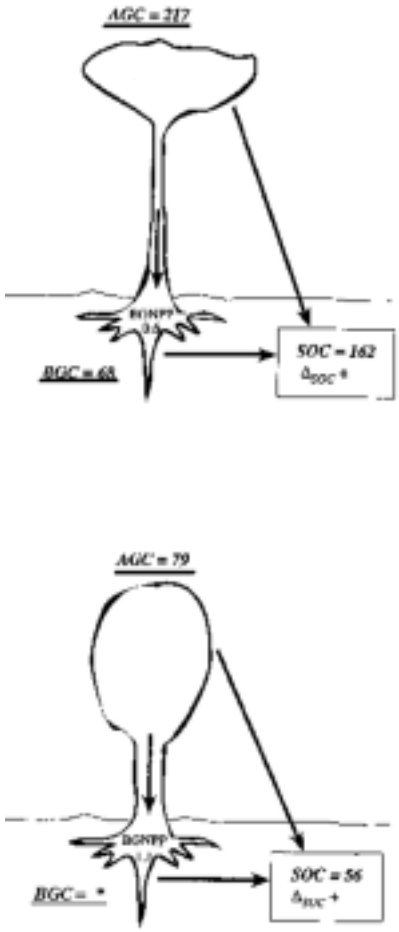
Les écosystèmes forestiers contiennent plus de carbone par unité de surface que tout autre type d'utilisation du sol, et leurs sols, qui contiennent à peu près 40 pour cent du carbone total, sont d'une importance majeure lors de la considération de la gestion des forêts.

Les prairies: un grand réservoir potentiel de carbone

Les prairies sont incluses dans l'article 3,4 du Protocole de Kyoto et, comme la forêt, elles jouent un rôle important dans la séquestration du carbone. Premièrement, les prairies et terres de parcours occupent des milliards d'hectares (3.2, selon la FAO) et elles emmagasinent de 200 à 420 Pg de carbone dans le total de l'écosystème, dont la majorité au-dessous de la surface et, par conséquent, dans un état relativement stable. Les quantités de carbone du sol au-dessous des prairies en zone tempérée sont estimées à 70 t/ha, ce qui est similaire aux quantités emmagasinées dans les sols des forêts (Trumbmore *et al.*, 1995; Balesdent et Arrouays, 1999)

De nombreuses zones de prairies dans les zones tropicales et les sols arides sont mal gérées et sont dégradées. Elles offrent une variété de possibilités pour la séquestration du carbone.

FIGURE 4
Estimation annuelle totale des stocks de carbone (t C/ha) dans les forêts tropicales et tempérées (d'après IPCC, 2000)



AGC et BGC = Carbone au-dessus et au-dessous de la surface du sol
AGD et BGD = Débris au-dessus et au-dessous de la surface du sol
AGNPP et BGNPP =Production primaire au-dessus et au-dessous de la surface du sol
SOC = carbone organique du sol
* non donné dans l'original

Les terres cultivées: le rôle des pratiques agronomiques

Le développement de l'agriculture a impliqué une grande perte de la matière organique du sol. Il existe différentes pratiques de gestion du sol pour augmenter la teneur en matière organique du sol (figure 9), comme l'augmentation de la productivité et de la biomasse (variétés, fertilisation et irrigation). Le changement climatique mondial avec l'augmentation de CO_2 peut avoir un effet similaire. Les sources de OM comprennent aussi les résidus organiques, le compost, les cultures de couverture.

Les principaux moyens en vue de réaliser une augmentation de la matière organique du sol sont réalisés actuellement par l'agriculture de conservation impliquant un labour minimal ou un non-labour et une couverture protectrice continue faite de matériel végétal vivant ou mort sur la surface du sol.

Chapitre 2
Evaluation du stockage de carbone dans le sol et principaux changements

Afin d'estimer le potentiel de séquestration du carbone dans les sols sous divers scénarios pendant les 25 prochaines années (Batjes, 1999), il faut distinguer deux aspects: quels sont les stocks d'origine de carbone dans les sols, et quels sont les changements dans les stocks de carbone?

Mesure des stocks de C dans le sol

Lors de l'évaluation des stocks de carbone dans le sol, on ne tient pas compte de la matière organique au-dessus de la surface du sol. Pour les sols cultivés, cela signifie que les résidus des plantes ou des cultures sont considérés comme une phase transitoire; cependant, les résidus des cultures, les cultures de couverture ou le paillis sont des parties importantes de l'écosystème agricole. De la même façon, les détritus des forêts peuvent atteindre 8 à 9 kg/m^2 pour les forêts tempérées (Dupouey *et al.*, 1999), 5 ou 6 kg pour une forêt tropicale sur un ferrasol (Andreux et Choné, 1993). Les racines sont considérées comme une biomasse de carbone et dans les prairies par exemple, ce compartiment a une importance majeure.

La méthode la plus communément appliquée consiste à déterminer le carbone organique total à différentes profondeurs ou globalement pour un ou plusieurs horizons, et de transformer les données, en tenant compte de la densité apparente du sol. Les statistiques sont calculées sur différents échantillons afin de déterminer les réserves de carbone. Le résultat peut être exprimé en total de kg/m^2, t/ha ou Gt (Pg) dans des zones et à des profondeurs spécifiées.

L'échelle peut être le site ou la parcelle, le bassin hydrographique, la région, un pays ou un continent spécifique ou la zone agro-écologique (FAO/ IIASA, 1999). L'extension spatiale est faite à l'aide de cartes digitalisées pour les différentes unités de sol considérées. Le nombre d'analyses des profils du sol utilisés est très important, et jusqu'à présent il y a eu un manque de bonnes données pour les sites-références.

Il existe trois références importantes concernant l'évaluation des stocks de carbone des sols au niveau mondial. Sombroek *et al.* (1993) ont utilisé la carte FAO/Unesco des sols du monde au 1/5 000 000 et environ 400 profils de sols regroupés selon des unités FAO avec détermination des fourchettes et des moyennes de teneurs en carbone et de densité pour chaque unité de sol. Ils ont été capables d'estimer aussi les stocks de carbone organique par type de sol et le stock au niveau mondial.

Post *et al.* (1982) et Eswaran *et al.* (1993) ont utilisé la classification américaine et un plus grand nombre de profils (près de 16 000), la majorité venant de pedons aux USA (WRC-SCS). La valeur du stock de C organique a été estimée à 1 550 Pg. Des détails sont donnés concernant les stocks pour les différents ordres ou sous-ordres et pour différentes profondeurs des profils. En conclusion, leurs auteurs mettent en avant l'importance dans l'estimation de la prise en compte de l'utilisation du sol et des changements de gestion des sols.

Tableau 2
Teneur moyenne en carbone organique pour quelques types de sols (Classification FAO-UNESCO et WRB) (d'après Batjes 1996)

Unité de sols		Teneur moyenne en C: kg/m^2		
FAO-UNESCO	**WRB**	**0 – 30 cm**	**0 – 100 cm**	**0 – 200 cm**
Podzols	Podzols	13,6	24,2	59,1
Rendzinas	Leptosols	13,3	-	-
Lithosols		3,6	-	-
Chernozems	Chernozems	6,0	12,5	19,6
Nitosols	Nitosols	4,1	8,4	11,3
Xerosols	Calcisols/Cambisols	2,0	4,8	8,7
Yermosols	Calcisols/Gypsisols	1,3	3,0	6,6
Ferralsols	Ferralsols	5,7	10,7	16,9
Vertisols	Vertisols	4,5	11,1	19,1
Andosols	Andosols	11,4	25,4	31,0

L'intervalle de variation est toujours élevé (40 à 100)

Plus récemment Batjes a poursuivi l'estimation avec la banque de données Wise comprenant 4 353 profils (1996) (19 222 analyses de C) avec une distribution géographique plus représentative.

L'étude confirme un stock total de carbone de 1 500 Pg dans les horizons supérieurs (0–100 cm) mais révèle aussi la présence de stocks important de C stable entre 100 et 200 cm tout spécialement dans les sols tropicaux (tableau 2). L'auteur considère que le système d'information sur les sols (FAO/Unesco) n'est pas complètement adapté pour estimer les changements de propriété des sols induis par les changements d'usage des sols ou par d'autres facteurs (par exemple le changement climatique).

Au niveau mondial on doit noter que l' IPCC (2000) prend comme référence un stock total dans les sols de 2000 Pg (pour une profondeur de 1 m) incluant les débris organiques.

Il existe (Batjes, 1996) une grande variation des teneurs en carbone organique relativement aux types de sol. Les valeurs vont de 2 kg/m^2 pour les Xerosols ou les Arenosols à plus de 10 kg pour les Podzols, les Andosols ou les Rendzines (tableau 2). Les quantités totales de carbone dans les sols des zones arides (Xerosol, Yermosol) sont basses, autour de 7 kg/m^2, comparé aux sols des tropiques, de l'ordre de 15 à 30 kg/m^2, mais celles-ci sont variées selon la texture et la minéralogie. Ce qui importe c'est que la teneur en carbone peut doubler entre une profondeur de 30 cm à 1 m et être multipliée par quatre jusqu'à 2 m.

La teneur du sol en carbone dépend des principaux facteurs à long terme de la formation du sol, mais elle peut être fortement modifiée, dégradée ou améliorée par les changements d'utilisation du sol et la gestion du sol.

La plupart des études statistiques citées sur les stocks et la distribution du C sont basées essentiellement sur des cartes des sols. Récemment, des estimations similaires ont été faites en France (Arrouays *et al.*, 1999) qui prennent en acompte à la fois les types de sols et la couverture végétale. Les analyses du C du sol qui étaient disponibles étaient des données pédologiques géoréférencées de la base nationale de données sols et des données provenant d'un réseau systématique de surveillance des sols (16km/16 km)disponible à l'échelle européenne pour les

TABLEAU 3
Stocks totaux de carbone organique du sol (SOC) en (Pg C) et capacité moyenne de séquestration par grande zone agro-écologique (pour une profondeur de 30 cm et 1 m)

Zone agro-écologique	Stocks de carbone (Pg C)		Densité moyenne de C (kg/m^{-2}) ou capacité de stockage en carbone	
	30 cm profondeur	1 m profondeur	30 cm profondeur	1 m profondeur
Tropicale chaud et humide	92 - 95	176 - 182	5,2 - 5,4	10,0 - 10,4
Tropicale chaud saisonnièrement sec	63 - 67	122 - 128	3,6 - 3,8	7,0 - 7,3
Tropicale frais	29 - 31	56 - 59	4,4 - 4,7	8,4 - 8,9
Aride	49 - 55	91 - 100	2,0 - 2,2	3,7 - 4,1
Subtropicale avec pluies estivales	33 - 36	64 - 68	4,5 - 4,7	8,6 - 9,1
Subtropicale avec pluies hivernales	18 - 20	37 - 41	3,6 - 3,9	7,2 - 8,0
Tempérée océanique	20 - 22	40 - 44	5,8 - 6,4	11,7 - 12,9
Tempérée continentale	21 - 126	1 233 - 243	5,6 - 5,9	10,8 - 11,3
Boréale	203 - 210	478 - 435	9,8 - 10,2	23,1 - 24,0
Polaire et alpine (couches de glace exclue)	57 - 63	167 - 188	7,0 - 7,8	20,6 - 23,8

Source: Batjes, 1999

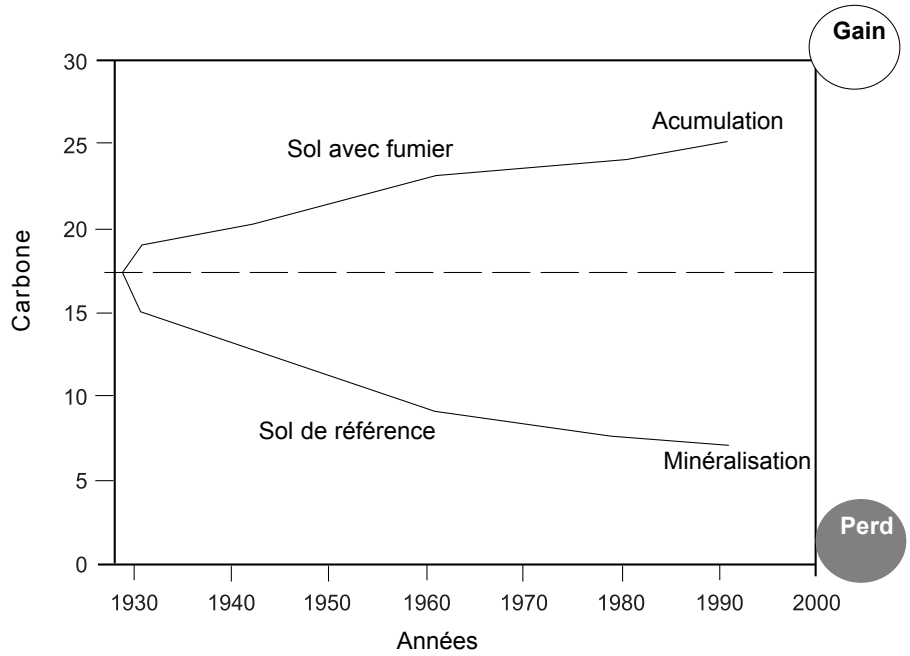
sols forestiers. L'information venant de la carte pédologique et celle venant de l'utilisation du sol ont été utilisées pour produire des statistiques simples sur les stocks de carbone pour différents usages du sol (avec 13 usages selon les définitions de Corine Land Cover) et les types de sols (avec 17 groupes de sols selon la FAO). Le nombre total de combinaisons existantes était de 138. La carte de France résultante pour le carbone du sol permet aussi d'évaluer le stock de carbone total (3,1 Pg pour une épaisseur de 30 cm), et aussi d'identifier les principaux facteurs qui contrôlent la distribution du carbone: utilisation des terres, type de sol, ou autres caractéristiques (climatiques ou pédologiques).

D'autres publications ont tentées des combinaisons similaires entre type de sol et végétation (Howard *et al.*,1995 pour la Grande Bretagne; Moraes *et al.*, 1998 pour Rondonia, Brésil; Van Noordwijk *et al.*,1997 pour les zones de forêt humide).

A la fois les sols et l'utilisation du sol doivent être utilisés pour déterminer les stocks de carbone du sol. Les facteurs liés au sol sont important comme les facteurs liés au climat, pour expliquer le stockage de carbone sur de longues périodes de temps, les changements dans la végétation ou l'utilisation des terres déterminent les variations de carbone à court terme. Souvent, néanmoins, l'histoire de l'utilisation des terres n'a pas été documentée pour la plupart des profils de sol disponibles.

Il y a aussi (Batjes, 1999) de grandes variations dans la distribution du stock total de carbone selon les zones écologiques majeures (tableau 3). Ces zones montrent de grandes différences dans la réserve de carbone organique, surtout relativement à la température et aux précipitations. Le carbone du sol emmagasiné sur 1 m de profondeur, représente à peu près 4 kg/m^2 (dans la zone aride) et 21–24 kg/m^2 (dans des régions polaires ou boréales), avec des valeurs intermédiaires de 8 kg dans les zones tropicales. La contribution totale des régions tropicales au réservoir de carbone du sol serait dans un éventail de 400 Pg (jusqu'à 1 m), comparé à 2 000 Pg pour le monde (2 456 Pg jusqu'à 2 m). La zone aride, qui couvre 40 pour cent de la surface des sols du monde, emmagasine seulement 5 pour cent (100 Pg) du total. Ces zones agro-écologiques, développées par la FAO, peuvent constituer un cadre de référence pour évaluer et suivre la réserve de carbone dans les sols.

Figure 5
Evolution de la teneur en carbone dans les sols entre 1928 et 1991 avec ou sans fumier (site expérimental de l'INRA, Versailles «quarante deux parcelles»)



Evaluation des changements de stocks

Il existe de nombreux exemples historiques bien documentés sur le changement des stocks de carbone dans le sol des zones tempérées. La plupart de ces exemples sont le résultat d'expériences agronomiques à long terme.

L'expérience dite des «42 parcelles» de Versailles (INRA) a été mise en place en 1929 sans culture et en enlevant la végétation naturelle mais avec un retournement manuel.

Une série d'expérimentations ont été menées avec ajout d'amendements (chaux-matière organique) et de fertilisants. Le sol est l'un des sols limoneux de grande culture, le plus courant en France, avec un contenu initial en carbone de 1,7 pour cent. En 50 ans (figure 5), la teneur en carbone organique a décrue de 60 pour cent (teneur en C de 0,7 pour cent), par contre dans le sol recevant des quantités élevées de fumier (100t/ha/an), l'accroissement a été de 50 pour cent (teneur en C de 2,5 pour cent).Dans les deux cas, la pente de la courbe s'amortit avec le temps.

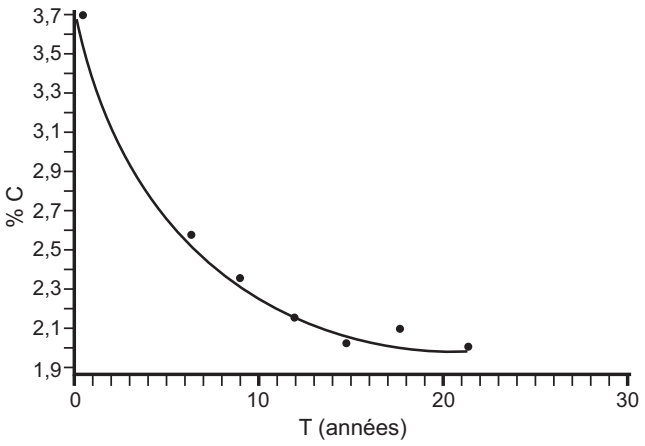
L'expérience de Rothamsted (blé de Broadbalk) est la plus ancienne et la plus connue des expériences agronomiques à long terme. Mise en place en 1843, avec des cultures en continu de blé et avec des rotations, elle a fait l'objet de différents traitements. L'épandage de fumier a eu pour résultat de doubler la teneur en carbone organique, mais rien qu'avec des résidus des cultures, la teneur en carbone du sol est restée stable. Dans la même série d'expériences (Rothamsted Highfield), la conversion de la prairie en sol arable a eu pour résultat 55 pour cent de perte de carbone en 20 ans, les teneurs passant de 3,5 à 2 pour cent C (figure 6). Des pertes en carbone similaires sont retrouvées là où la prairie naturelle a été convertie en terre cultivée au Canada ou aux États-Unis.

Une autre expérience de longue durée (90 ans) est l'expérimentation de Bad Lauchstadt qui démontre l'effet positif de la fertilisation (tout spécialement N) sur la teneur du sol en carbone.

De telles expérimentations de longue durée rendent possible l'évaluation des effets de changement du couvert végétal ou de l'utilisation des sols et sont la base essentielle pour évaluer le modèle.

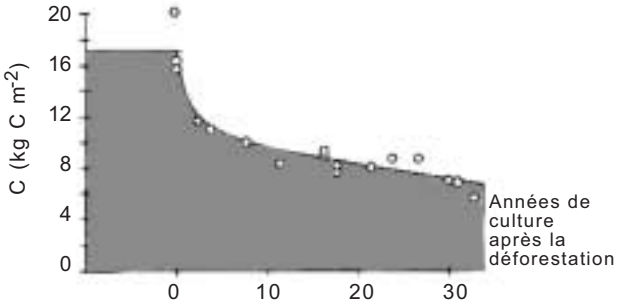
Elles sont actuellement incluses dans un réseau (SOMNET) sur la matière organique du sol (Powlson *et al.*, 1998). Pour une bonne partie de ces expérimentations le labour conventionnel était inclus dans les pratiques standards. Néanmoins, quelque expérimentations de relativement courte durée (autour de 20 ans) aux États-Unis, (Dick *et al.*, 1998), en Allemagne (Tebruegge et Guring, 1999) et Russie (Kolchugina *et al.*, 1995) rendent possible l'évaluation des différents types de pratiques culturales ou du non-labour sur le stockage du C. Le labour peut diminuer la teneur en C organique de 10 à 30 pour cent.Aux Etats Unis, un réseau de suivi spécial régional (grandes plaines centrales) a été mis en place à ce sujet (Lyon, 1998).

FIGURE 6
Evolution du carbone dans l'expérience de Rothamsted-Highfield pour la conversion prairie-terre arable (d'après Johnson, 1973)



Les pertes en matière organique lors de la déforestation sont du même ordre.

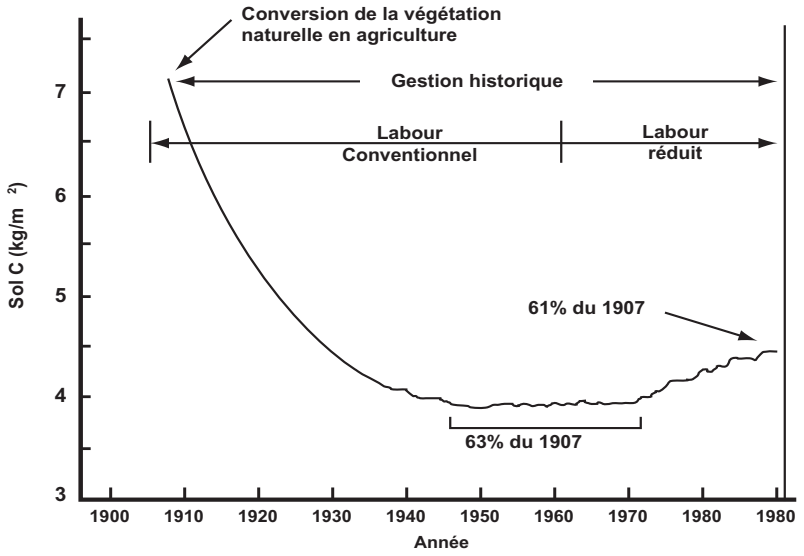
FIGURE 7
Evolution de la teneur en carbone organique après déforestation et mise en culture de maïs (Arrouays *et al.*, 1994)



Des expériences existent pour les forêts tempérées (Arrouays et Pélissier, 1994) et tropicales (Neill *et al.*, 1998), ce qui permet l'évaluation des effets du déboisement et du reboisement sur la réserve en carbone du sol. Le déboisement entraîne généralement la perte presque totale de la biomasse et une perte de carbone du sol de 40 à 50 pour cent dans l'espace de quelques décennies, dont la moitié se produit en moins de 5 ans (figure 7). L'équilibre dépendra alors de la nouvelle utilisation du sol. Dans le cas de déboisement suivi par une prairie, les études isotopiques de carbone montrent le remplacement relativement rapide de la réserve de carbone originelle de la forêt par des composés du carbone dérivés de la prairie. Avec le boisement, le carbone de la surface du sol et le carbone, du sous-sol augmentent, mais lentement, selon le taux de croissance des arbres.

Différentes expérimentations sur les émissions ou la séquestration du carbone ont été conduites dans les régions tempérées. Une grande variété d'études comparatives de longue durée montrent que les systèmes organiques et durables améliorent la qualité des sols en augmentant les teneurs organiques des sols et en carbone avec un accroissement de l'activité microbiologique: aux USA (Lockeretz *et al.*, 1989; Wander *et al.*, 1994, 1995; Peterson *et al.*,

FIGURE 8
Changements simulés du carbone du sol (0-20 cm de profondeur) de 1907 à 1990 pour la zone à blé de la plaine centrale des Etats-Unis (d'après Smith, 1999)



2000), en Allemagne(El Titi,1999; Tebruegge, 2000), UK(Smith *et al.*, 1998; Tilman,1998), Scandinavie (Ketterer et Andren, 1999), Suisse (FiBL, 2000), et Nouvelle Zélande (Reganold *et al.*,1987).

Des expériences à long terme existent aussi dans d'autres parties du monde, une liste annotée partielle est disponible sur le site de la FAO sur l'Internet[1] . Elles sont souvent relatives aux centres de recherche agricole internationaux (Greenland, 1994). Concernant l'utilisation durable du sol, il est nécessaire d'établir une base de données (Swift et al, 1954).

L'évaluation récente du budget de carbone des USA et spécialement la contribution des changements d'usage des terres (Lal *et al.*, 1998a; Young, FAO/IFAD 1999; Houghton *et al.*, 1999) a donné lieu à quelques polémiques à propos de l'importance du puits de carbone dans les sols (Field et Fung, 1999).Pour cela les États-Unis ont été divisés en sept régions géographiques, chacune d'elle comprenant plusieurs écosystèmes naturels, sans inclure les terres cultivées ou les prairies. Dans ces évaluations, la nature du sol n'était pas prise en compte. Les indications sont qu'avant 1945, le développement de l'agriculture a dégagé 27 Pg C vers l'atmosphère, principalement à partir du sol dont la teneur en matière organique a décru de près de 50 pour cent. Après 1945, on a atteint un plateau. À l'aide de la modélisation, une accumulation de 2 Pg a été prévue, grâce à l'implantation du labour réduit. Les changements simulés du carbone total du sol pour une profondeur de 0-20 cm sont présentes dans la figure 8 (Smith, 1999). Selon le développement du labour réduit, le taux d'augmentation du carbone du sol peut être plus élevé.

Dans les pays du Nord (Canada, ex Union Soviétique), on constate des évolutions semblables et le même genre de résultat de simulation dans le cas de gestion sans labour (Gaston *et al.*, 1993).

[1] http://www.fao.org/WAICENT/AGICULT/agll/globdir/index.htn

Des estimations similaires sur les flux annuels de séquestration du carbone ont été conduites en France par Balesdent et Arrouays (1999) et Arrouays *et al.*, (1999). Le calcul était basé sur des relevés historiques d'utilisation des terres avec des attributions de stock moyen de C en équilibre avec chaque type d'utilisation du sol. Les valeurs de stocks vont de 20 à 30 t/ ha pour les jachères ou les vignobles, 40 pour les sols cultivés, 60 à 70 pour les prairies et forêts. Afin d'évaluer l'effet de l'utilisation des terres sur les stocks, un modèle simple de dynamique du C a été couplé avec différents taux de décomposition de la matière organique. En utilisant cette méthode, il a été possible de montrer que les sols de France ont accumulé plus de 4t C /ha durant le dernier siècle, avec de fortes variations historiques. Une carte récente des stocks de carbone en France est jointe en annexe (Arrouays *et al.*, 2000).Ces approches basées sur l'utilisation des terres et les flux sont complémentaires de celles basées sur les stocks de carbone dans les sols.

Il existe plusieurs modèles de changements de l'utilisation du sol et de la dynamique de C, qui permettent la généralisation spatiale ou la simulation de C du sol selon les changements de l'utilisation du sol. Aux Etats-Unis, deux modèles de sol sont communément utilisés: Century et DNDC (qui peuvent associer les processus de dénitrification et de décomposition). Ils sont habituellement liés à un système d'information géographique (SIG). Les deux modèles exigent des données climatiques (températures et précipitations) sur les sites, qui sont groupés selon les caractéristiques générales du site, et les caractéristiques du sol (en particulier la texture) ainsi que l'information sur la gestion du sol (rotation des cultures, rendement, labour, irrigation, fumure). Concernant la matière organique, on fait la distinction entre deux formes de résidus (métaboliques et structuraux), de même qu'entre trois compartiments de SOM (actif, lent, passif), avec différentes durées de résidence. Chacun de ces modèles est conduit pour un scénario avec un seul type de sol, une seule rotation, un certain type de labour et pour un climat donné. Les productions des modèles sont la réserve en C du sol, le rendement cultural et les émissions de différents gaz.

Un modèle français a été mis au point par Arrouays et Pélissier (1994), dans le but de prévoir l'effet de l'utilisation des terres sur la dynamique du carbone. Ce modèle dénommé Morgane prend en compte différents compartiments organiques. Il a été testé dans différentes régions tropicales (Antilles, Brésil).Un numéro spécial de Geoderma (1993, 81) a été consacré à la comparaison de 9 modèles différents utilisant les données des expérimentations de longue durée dans les régions tempérées, et une application a été faite par Smith et al (1997) aux régions tropicales. Ces modèles peuvent être également utilisés pour simuler les effets du changement climatique (Paustian *et al.*,1998b).

Le projet FAO-IFAD sur la séquestration du carbone utilise un modèle appelé «RothC–26–3» (Jenkinson et Rayner 1997), qui a été mis au point à partir des expérimentations de Rothamsted sur le cycle de la matière organique dans les régions tempérées, mais pas encore étendu aux régions tropicales (Ponce–Hernandez ,1999).

Le modèle RothC, lié à un GIS, a déjà été utilisé au niveau national en Hongrie (Falloon *et al.*,1998).Il a déjà été considéré comme un modèle possible pour l'évaluation du potentiel de séquestration du carbone de l'Afrique de l'Ouest en utilisant un système d'information sur les terres (Batjes, 2001)

Chapitre 3
Gestion des forêts, des pâturages et des sols cultivés en vue d'augmenter la séquestration du carbone dans les sols

FORÊT

Même si leurs taux de séquestration du carbone peuvent varier considérablement, les forêts naturelles peuvent être considérées en équilibre dynamique en ce qui concerne le carbone sous certaines conditions climatiques et pour une concentration déterminée en CO_2 atmosphérique. D'après Woomer *et al.* (1998), la forêt primaire originelle, par exemple en Amazonie, est l'écosystème qui contient le plus de carbone (305 t /ha dont 28 pour cent au dessous du sol). Tout changement dans la gestion de tels écosystèmes induit des changements majeurs dans la dynamique du carbone, avec comme résultat des stocks plus faibles que dans la forêt originelle. Les formes de gestion impliquent l'agriculture de brûlis, la déforestation, le reboisement et l'agroforesterie.

La déforestation est régie par l'article 3.4 et le reboisement par l'article 3.3 du protocole Kyoto. Les aspects légaux de la définition de la forêt ne sont pas discutés ici ; seuls les aspects relatifs aux changements d'utilisation des terres (principalement article 3.) sont considérés.

Selon l'évaluation globale des ressources forestières de la FAO, le taux mondial actuel de la déforestation se situe autour de 17 millions d'hectares par an, soit à peu près 0,45 pour cent de l'écosystème restant des forêts (FAO, 1993). La perte en carbone immédiate et importante qui en résulte est en partie représentée par l'émission de 1,6 Gt du cycle du carbone (figure 1).

Même si la biomasse supérieure est enlevée et brûlée, entre 50 et 60 pour cent du carbone total du système se trouve à la surface du sol ou dans le sol (débris, litière, matière organique du sol et racines...) et peut être géré de manière appropriée.

L'expérimentation ECEREX en Guyane française (Sarrailh, 1990) démontre que, eu égard au type de déforestation et l'intensité de la physique (mécanisée ou manuelle), le degré d'érosion peut être accru de 0 à 20 t/ha/an et le ruissellement de 0 à 250 mm par an. Des moyens de conservation spécifiques (Chauvet et al., 1991 ; Lal, 1990) peuvent prévenir une grande partie de cette dégradation et de la perte en carbone qui en résulte (tableau 4).

TABLEAU 4
Effets de la déforestation sur le ruissellement et l'érosion (Sarrailh, 1990; Lal 1990)

Méthode de déforestation	Ruissellemen t(mm)	Erosion du sol (t/ha)
Forêt (contrôle)	0	0
Traditionnelle	6,6	0,02
Manuelle	48	5
Total	104	4,80
Mécanisée	250	20

L'agriculture sur brûlis, ou culture itinérante, représente à peu près 60 pour cent du déboisement tropical. Elle est pratiquée par 300 à 500 millions de petits agriculteurs dans les tropiques aux fins de l'agriculture de subsistance.

Lorsque la forêt est défrichée par mise à feu, cela implique principalement la biomasse au-dessus du sol, et une petite partie du carbone du sol jusqu'à une profondeur de 3 cm (Choné *et al.*, 1991). Le brûlage et la minéralisation résultante de la matière organique fournissent les éléments nutritifs pour la croissance de la culture.

L'étendue des pertes de la réserve en carbone restante dépendra du genre d'utilisation du sol qui remplacera la forêt. Dans les conditions de terre arable la perte de carbone sera considérable, comme indiqué plus tôt (40 à 50 pour cent dans une douzaine d'années) avec un niveau élevé de dégagement durant les cinq premières années. Ces pertes sont grandement dues au labour.

Dans l'agriculture sur brûlis, une période de jachère avec broussailles est incluse dans le cycle, et selon sa durée elle peut restaurer une partie du sol et rendre le système plus ou moins durable (Ponce-Hemandez, 1999). Si le pâturage est établi, la perte est plus réduite et une certaine récupération de carbone est possible en quelques années, grâce à la matière organique des graminées (De Moraes *et al.*,1996).

L'agroforesterie, association des arbres aux cultures ou aux pâturages, peut représenter une alternative durable au déboisement et à la culture itinérante (Winterbottom et Hazlwood, 1987; Sanchez et al., Shroeder, 1994; Sanchez, 1995). Elle a un grand potentiel de séquestration de carbone (Sanchez *et al.*1999).

Shroeder (1994) a présenté une évaluation de la réserve de carbone dans les différentes écorégions. Dans les zones tropicales, un stockage de carbone de 21 t (sub-humide) à 50 t C/ha (humide) peut être obtenu avec des cycles de coupe de 8 ou 5 ans, ce qui représente une durée bien moins longue que pour les forêts. Dans ces calculs, le C situé dans le sol n'est pas inclus, et les racines à elles seules augmenteraient ces valeurs de 10 pour cent. Dans les principaux systèmes agroforestiers, le carbone du sol initial de la forêt serait maintenu. Dans certains cas, pour la culture de cacao ou cacao/Erythrine, des augmentations de 10 et 22 t/ha, respectivement, ont été obtenu pendant une période de 10 ans (Fassbender *et al.*, 1991).

Shroeder (1994) a également effectué une évaluation à l'échelle mondiale des sols potentiellement disponible pour l'agroforesterie. Même si l'étendue potentielle s'élève de 600 à 1 000 millions ha, Shroeder estime que 160 millions ha sont appropriés dans les tropiques. Le carbone total emmagasiné serait entre 1,5 et 8 Gt.

D'autres estimations de l'étendue possible de l'agroforesterie sont plus élevées: 400 millions ha pour les 25 prochaines années, incluant 100 millions d'ha de forêt (destinée à la déforestation) et 300 millions ha de terres agricoles dégradées (IPCC, 2000). Des estimations supplémentaires indiquent 630 millions ha de terres cultivées additionnelles et de prairies pour les tropiques.

Des estimations additionnelles pour les gains potentiels de carbone par l'agroforesterie sont résumées dans Young (1997).

L'IPCC 2000 effectue deux types d'évaluation pour arriver à des taux réalistes pour la conversion annuelle des terres. La première concerne la transformation des forêts après brûlis ou d'autres types de déforestation. L'IPCC estime ceci à 10,5 millions ha/an correspondant à 20 pour cent des 15 millions d'ha déforestés annuellement (3M ha) plus 3 pour cent des 250 M ha de terres dégradées aux marges de la forêt (7,5 M ha). En prenant la valeur modale

différentielle de 57 M ha entre l'utilisation des terres, la contribution globale de l'agroforesterie serait autour de 0,3 Gt C /an.

L'agroforesterie peut aussi être établie sur des terres improductives à faible teneur en MO et éléments nutritifs. De telles zones sont très répandues dans les régions subhumides de l'Afrique tropicale. La conversion à l'agroforesterie permettrait de tripler les stocks de C, de 23 t à 70 t/ha sur une période de 25 ans. En Afrique tropicale subhumide seule, le bénéfice pourrait être autour de 0,04 à 0,19 Gt C /an. Dans une première étape, une plante de couverture de légumineuse peut être utilisée, comme Sesbania sesban, Tephrosia vogelii, Gliricidia sepium, Crotalaria grahamiana, Cajanus cajan, qui peuvent fournir 0,1 à 0,2 t N ha /an. Pueraria est aussi une légumineuse bien connue (à la fois en Amazonie et en Afrique) qui peut régénérer la structure du sol, grâce à son abondant développement racinaire.

En principe, l'agroforesterie serait ainsi l'un des changements intéressants d'occupation des terres, pour des raisons variées. D'abord par la surface considérable impliquée et le taux de gain de C est élevé (0,2 à 3,1 t ha /an (IPCC, 2000), ou même plus, selon le temps de résidence des arbres. Deuxièmement, cela peut compenser l'émission importante de CO_2 venant de la déforestation (Dixon 1995). Troisièmement, cela peut fournir un système durable d'un point de vue technique, écologique et économique. Néanmoins l'agroforesterie, pour des raisons sociales et culturelles, telles que la gestion des terres, paraît difficile à promouvoir. Ce sera donc un contributeur moins important que prévu à la séquestration du carbone.

Des valeurs mondiales existent pour estimer les taux de séquestration du boisement dans différentes zones climatiques. Le taux total (au-dessous du sol) en t/ha par an, augmente des régions boréales (0,4–1,2) et tempérées (1,5–4,5) aux régions tropicales (4–8) (Dixon, 1995). Les données de l'IPCC (2000) sur la distribution du carbone entre la biomasse à la surface du sol, les racines, les débris, et le carbone du sol indiquent que le carbone du sol à lui seul représente plus que le carbone de la biomasse de la forêt. Ces proportions diffèrent selon la zone climatique, le carbone du sol étant maximum dans les pays froids (boréaux et tempérés) et minimum dans les zones tropicales. Récemment, Post et Kwon (2000) ont trouvé des taux potentiels d'accumulation dans le sol plus bas pour la forêt (0,3 à 0,6 t/ha/an) que pour les prairies.

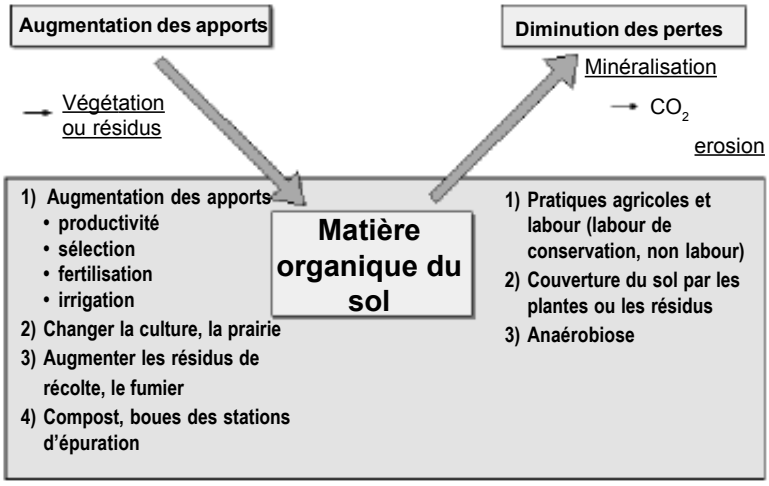
Des amendements (par du carbonate de calcium) ou la fertilisation augmentent la biomasse, à la fois au dessus et au dessous du sol, à condition que d'autres conditions ne soient pas limitantes. Le résultat sera un accroissement du carbone, mais cela concerne surtout les pays développés. La fertilisation par dioxyde de carbone du à l'accroissement des teneurs en CO_2 atmosphérique, aura le même effet.

Pâturages et prairies

Mention a été faite de la grande étendue des prairies et de l'importance représentée par son réservoir de carbone. Alors que le stock de carbone total présent dans l'écosystème des prairies est inférieur à celui de certains systèmes forestiers, la partie souterraine du carbone peut par contre être plus élevée. En général, la teneur en carbone du sol d'une prairie est plus élevée que pour les autres cultures.

Toutefois la majorité (près de 70 pour cent) des prairies est dégradée. Le surpâturage est l'une des principales causes de la dégradation, en particulier dans les zones subhumides, semi-arides ou arides où les prairies prédominent (Pieri, 1989). La gestion par le feu est une autre

FIGURE 9
Gestion de la matière organique du sol par l'agriculture



méthode utilisée pour contrôler les espèces ligneuses entraînant une certaine perte de carbone dans l'atmosphère, mais le principal transfert est vers le charbon stable, qui peut s'élever jusqu'à 30 pour cent du carbone total du sol (Skjemstad *et al.*, 1996).

L'une des principales solutions utilisées dans la gestion des pâturages est le contrôle de la pâture (intensité, fréquence, caractère saisonnier) et une meilleure gestion du brûlis pour le contrôle des croissances ligneuses. D'autres solutions comprennent l'amélioration de la qualité du sol et des graminées.

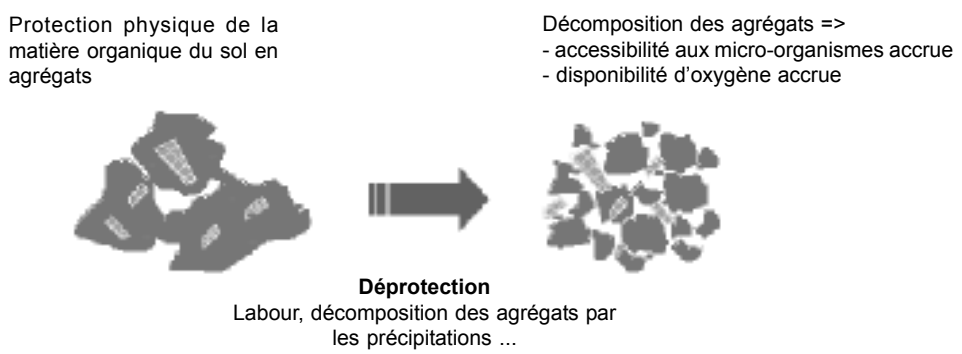
Concernant le sol, l'un des facteurs limitants de la croissance des plantes est la carence en éléments nutritifs. La fumure à faible dose peut être la solution (P plutôt que N). Cependant, une meilleure fumure (pour N), plus écologique et plus durable, est constituée par l'introduction des légumineuses qui fixent l'azote. Une autre solution consiste à modifier la qualité des graminées et d'introduire plus d'espèces productives à système radiculaire plus profond et plus résistant à la dégradation. Toutes ces solutions augmentent considérablement la séquestration du carbone (Fisher *et al.*, 1994), vu que les pâturages peuvent emmagasiner des quantités très élevées de carbone sous une forme très stable. L'augmentation du rendement associé peut aussi être très importante (x 2 ou 3).

LES TERRES CULTIVÉES

Ainsi que nous l'avons déjà dit, la gestion du sol et des cultures peut considérablement améliorer le temps de résidence et un nouveau stockage de carbone dans le sol, ce qui vaut la peine d'être considéré conformément au Protocole de Kyoto (Buyanovshi et Wagner, 1998).

Différentes utilisations du sol et pratiques agronomiques ont été évaluées relativement à leur effet sur la séquestration ou l'émission du carbone (Lal, 1999; Batjes, 1999). Une distinction est faite entre les pratiques causant une diminution de la perte du carbone, une augmentation de l'intrant de carbone dans le sol, ou une combinaison des deux (Figure 9).

FIGURE 10
Protection physique de la matière organique du sol (Chenu, non publiée) **et «déprotection» par le labour** (Balesdent *et al.,* 2000)



Diminution de la perte en carbone

A l'exception des facteurs climatiques (principalement la température), les principaux processus causant des pertes de carbone du sol sont l'érosion et la minéralisation de la matière organique.

L'érosion du sol par l'eau ou le vent représente le processus le plus important de la dégradation du sol qui affecte plus d'un milliard d'hectares dans le monde. En général, la perte du sol varie entre 1 et 10 t/ha/an et atteint 50 tonnes dans certains cas.

La matière organique dans l'horizon supérieur du sol est une partie importante de cette perte de sol. L'évaluation exacte de cette réserve de carbone est difficile à cause de l'hétérogénéité dans le temps et l'espace. La perte mondiale par érosion serait dans l'éventail de 150 à 1 500 millions de tonnes par an ce qui est plutôt moins à ce qu'il était estimé au niveau continental (Lal, 1995; Gregorich *et al.*, 1998).

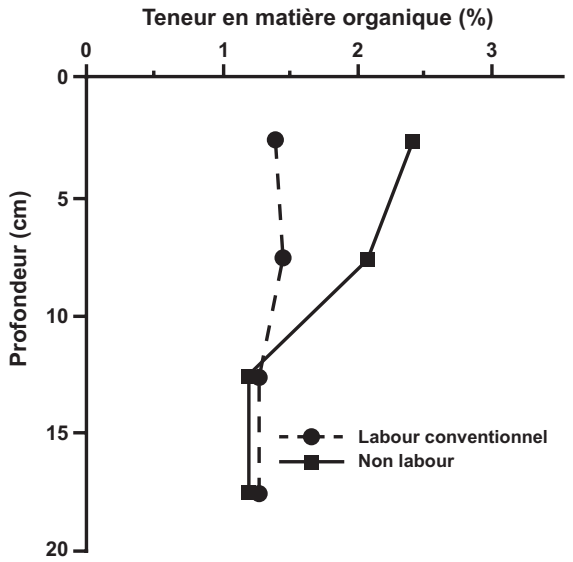
A l'exception de quelques méthodes spécifiques de contrôle de l'érosion développées dans le passé, la plupart des méthodes utilisées pour prévenir l'érosion du sol visent à augmenter la stabilité du sol (dont la matière organique est l'un des principaux facteurs) ou à protéger la surface du sol avec une couverture de végétation. Ces méthodes de prévention seront également bonnes pour la séquestration de carbone (et vice versa). Ainsi donc une diminution de l'érosion augmentera les effets bénéfiques de la conservation du sol et des méthodes de gestion (couverture du sol, labour minimal, augmentation de la matière organique). Par ailleurs, une bonne gestion du carbone aidera à prévenir l'érosion.

Le labour a une histoire millénaire. Il visait à aérer le sol et à lutter contre les adventices. L'augmentation de l'aération dans le sol et la perturbation intense sont les principaux facteurs stimulant la minéralisation de la matière organique par les micro-organismes du sol. Un travail récent (Balesdent *et al.,* 2000) démontre que le labour joue un rôle principal dans la «déprotection» de la matière organique présente dans les macro (et dans une certaine mesure dans les micro) agrégats (figure 10). La mise en culture et les pratiques de labour ont causé un déclin général de matière organique dans les sols intensivement cultivés, en particulier aux Etats-Unis et en Europe, et des émissions importantes de CO_2 liées à l'agriculture dans le passé.

Une grande quantité de littérature a été consacrée aux effets des différents types de labour (Monnier *et al.*, 1994; Paustian *et al.*, 1998a; Lal, 1997; Reicosky et Lindstrom, 1995). Le

numéro spécial de «Soil and Tillage Research» (Recherche sur le sol et le labour), en 1998, donne un aperçu des résultats obtenus dans 50 expériences à long terme sur le terrain. Les principaux résultats concernent le Canada et les États-Unis et différentes cultures. Les augmentations du carbone dans le sol varient, du labour conventionnel au non-labour, de 10 à 30 pour cent (figure 11). Il y a quelques divergences sur la différence de la séquestration du carbone entre le labour conventionnel et le non-labour. Là où la teneur en carbone est très semblable dans les deux conditions, cela pourrait être dû aux conditions climatiques assez froides des sites expérimentaux.

FIGURE 11
Effet du labour conventionnel et du non-labour sur la teneur en matière organique dans le sol



Pour les pratiques culturales dites de conservation (États-Unis), les résidus des cultures doivent couvrir plus de 30 pour cent de la surface du sol (Lal, 1997). Dans les conditions de l'agriculture de conservation qui préconise aussi une limitation du labour, 0,5–1,0 t de C/ha/an peut être séquestré dans des conditions humides tempérées, 0,2–0,5 dans les tropiques humides et 0,1–0,2 dans les zones semi-arides (Lal, 1999). Ces pratiques occupent maintenant plus de 50 millions d'hectares, la majorité étant en Amérique du Nord (19 aux Etats-Unis, 4 au Canada), en Amérique du Sud (Brésil 13 millions, Argentine 9 millions, Paraguay + Mexique + Bolivie 1,7 millions) et l'Australie (8 millions). Les données varient d'une année à l'autre (le chiffre peut atteindre 60 millions d'hectares) à cause du taux de développement de ces pratiques, en particulier au Brésil et en Argentine. Le développement très répandu du labour de conservation aux Etats-Unis explique le fait que l'agriculture séquestre maintenant le carbone dans les sols (figure 8). Le Tableau 5 montre sa petite étendue en Europe. Un bilan des effets pour l'Europe reste à faire, mais ces pratiques pourraient se répandre par des politiques d'incitation avec des financements agro-environnementaux et l'application des décisions de Bonn avec la prise en compte des puits de carbone liés à l'agriculture. On doit noter que de nombreuses données manquent encore sur le nouveau système.

TABLEAU 5
Superficie mondiale des sols cultivés dans des conditions de non-labour de conservation ou d'agriculture de conservation

País	Superficie (millones ha)
Etats-Unis[1]	19,0
Brésil[2]	13,0
Argentine[3]	9,0
Australie[4]	8,0
Canada[5]	4,0
Paraguay[6]	0,8
Mexique[7]	0,7
Bolivie[8]	0,2
Chili[9]	0,1
Colombie[10]	0,07
Uruguay[11]	0,05
Venezuela[12]	0,05
Europe[12]	0,5 ou 1

Sources: (1) No-till Farmer, marzo 1999;
(2) FEBRAPDP, 2000;
(3) AAPRESID, 2000;
(4) Bill Crabtree, WANTFA;
(5) Hebblethwalte, CTIC, 1997;
(6) MAG-GTZ, Soil conservation Project, 1999;
(7) Ramón Claverán, CENAPROS, 1999;
(8) Patrick Wall, CIMMYT, 1999;
(9) Carlos Crovetto, 1999;
(10) Roberto Tisnes, Colombia, 1999;
(11) AUSID, 1999;
(12) estimaciones.

Dans certains cas, le non-labour peut avoir un effet défavorable dû à une augmentation de la teneur en eau et

de l'hydromorphie avec émission conséquente de gaz de serre en particulier N_2O (Dao, 1998). Les différents effets en relation avec les caractéristiques du sol (en particulier les textures) n'ont pas encore été complètement vérifiés (Tavarez-Fiho et Tessier, 1998).

La lutte contre les adventices, où le labour jouait un rôle essentiel, doit être entreprise par d'autres moyens, en général, avec des herbicides durant la transition vers l'agriculture de conservation, et une évaluation écologique est nécessaire (Monnier *et al.*, 1994; Garcia Torres et Fernandez, 1997).

Ces systèmes ont aussi un effet majeur sur la protection contre l'érosion qui était le principal but de leur utilisation dans les Grande Plaines du Centre des Etats-Unis (Programme de réserve et de conservation) dans les années 1930 à 1940.

L'adoption de méthodes moins intensives en énergie telles que le non labour peut réduire le budget des émissions totales. Des systèmes rizicoles à faible intrants ou organiques au Bangladesh, en Chine, ou en Amérique Latine ont un rendement énergétique 15 à 25 fois plus efficient que le riz cultivé en irrigué aux États-Unis. Pour chaque tonne de céréale ou de végétal de systèmes industrialisés à intrants élevés, la production implique 3 000 à 10 000 MJ d'énergie. Par contre, la production de chaque tonne de céréale ou de végétal par une agriculture durable, implique seulement 500 à 1 000 MJ (Pretty et Ball, 2001).

Les systèmes de non labour ont aussi comme bénéfice supplémentaire de requérir moins d'énergie fossile pour les machines agricoles. L'utilisation de fuel dans des systèmes conventionnels (Tebruegge, 2000; Smith *et al.*, 1998) en Grande Bretagne et Allemagne varie de 0,046 à 0,053 t C /ha/an; alors que pour des systèmes de non labour, elle n'est que de 0,007–0,029 t C ha/an (0,007 pour l'énergie directe seulement; 0,029 inclut l'énergie de la production des herbicides). Cela représente une petite partie des gains totaux (approximativement 7 pour cent) en comparaison de l'économie liée à la réduction de perte de C et de l'accroissement de la séquestration.

L'agriculture de conservation (concept FAO) ou l'agriculture agrobiologique (concept CIRAD) favorise aussi le fonctionnement biologique du sol, le changement le plus évident étant l'augmentation de la faune et de l'activité de la microflore du sol. La fonction de l'agriculture de conservation et du non-labour est de protéger le sol physiquement de l'action du soleil, de la pluie et du vent, et de nourrir la faune du sol. Le résultat est une réduction de l'érosion du sol et une amélioration de la teneur en matière organique et en carbone.

Un autre aspect important du non-labour est relatif aux herbicides. Des travaux intéressants menés au Brésil ont trait à des systèmes de non-labour sans herbicides grâce à l'utilisation des plantes de couverture et des engrais verts (Peterson *et al.* 2000).

Augmentation des intrants en matière organique pour le sol

Les augmentations de la biomasse des cultures peuvent augmenter l'intrant en matière organique du sol, tant par de nouvelles variétés que par une gestion agronomique, comme la gestion des éléments nutritifs et la rotation culturale. L'augmentation de la teneur en CO_2 de l'atmosphère due aux changements climatiques peut avoir aussi une influence positive semblable. L'association de tous ces facteurs explique la raison pour laquelle dans plusieurs pays européens (par exemple, en Belgique), sans intrants de fumier et avec des pratiques de labour conventionnelles, la teneur en matière organique des sols cultivés a récemment augmenté en liaison avec l'accroissement de la biomasse végétale et des rendements. La gestion de l'eau (irrigation), avec une augmentation

associée de la productivité, peut produire des effets semblables, en particulier dans les régions semi-arides. Cependant, le développement de l'irrigation est généralement limité par d'autres facteurs, comme la disponibilité des ressources en eau et le risque de salinisation. Dans certains pays, en plus des cultures de couverture, les cultures associées représentent aussi une aide considérable à l'augmentation de la biomasse.

Les augmentations de la biomasse impliquent la biomasse au-dessus du sol et des racines. Un progrès considérable pourrait être réalisé à ce propos, en particulier en ce qui concerne les prairies et les pâturages, par sélection des espèces et variétés à racines profondes, conduisant à un stockage plus profond du carbone.

La gestion des résidus des cultures est une autre mesure importante de séquestration du carbone dans le sol et d'augmentation de la teneur organique du sol. La mise à feu des résidus a des conséquences négatives, même si elles sont parfois atténuées par la grande stabilité du carbone minéral qui est formé.

Les effets positifs de l'usage des résidus des cultures pour induire la séquestration du carbone ont été estimés par Lal (1997), à 0,2 Pg C/an avec transformation de 15 pour cent du C total (1,5 Pg C dans le monde). En général, il y a un rapport linéaire entre la matière organique dans les 15 premiers cm du sol et la quantité de résidus des cultures appliquée.

L'agriculture de paillis et la couverture végétale sont des pratiques de gestion spécifiques du sol permettant la couverture du sol par des plantes spécifiques, protégeant le sol contre l'érosion et fournissant des résidus de biomasse pour augmenter la matière organique du sol. Pour être tout à fait efficace, la gestion de la couverture végétale ou du paillis doit être faite sur le site et en association au labour de conservation (gestion agrobiologique). La quantité de paillis doit être dans l'éventail de plusieurs dizaines de t/ha/an pour fournir une source importante de carbone du sol jusqu'à 0,1 t/ha/an, selon la zone climatique (Lal, 1997). Une grande variété d'espèces de plantes peut être utilisée pour couvrir le sol. La qualité de résidus des plantes est aussi un facteur important (Heal *et al.*, 1997; Drinkwater *et al.*, 1998)

Le sol doit être protégé durant la période initiale de la croissance de la culture; dans cet ordre d'idées, les engrais verts ont un rôle important. Ils ont été utilisés pendant des millénaires, principalement pour augmenter la fertilité après leur incorporation dans le sol. Maintenant ils sont considérés comme une culture dans la rotation, ce qui a un effet direct sur la protection du sol durant la période de croissance et un effet indirect par leurs résidus. Les engrais verts peuvent être semés, durant la pause saisonnière entre les principales cultures, ou en culture mixte avec les cultures, ou de façon pérenne dans les zones en jachère. Dans le passé, les engrais verts étaient incorporés par labour dans le sol. Maintenant, les techniques de conservation exigent un labour minimal ou pas de labour et l'ensemencement direct à travers la couverture végétale (tableau 6).

Plusieurs études ont montré que souvent le contrôle des adventices est plus efficace dans les systèmes culturaux à couverture de surface morte, du à l'existence d'un effet allopathique spécifique. Dans ce cas, le besoin de pesticides est réduit ou éliminé.

Il existe beaucoup de preuves qui démontrent l'efficacité de la couverture du sol, des plantes vivantes ou des résidus de plantes, pour la prévention de l'érosion par le vent ou l'eau. L'impact direct des gouttes de pluie est empêché, avec pour conséquence la protection de la structure et de la porosité du sol.

La couverture du sol fournie par les plantes durant leur cycle de croissance est souvent insuffisante à prévenir l'érosion. Au Panama, au Brésil, l'ordre suivant a été établi pour l'intensité

de l'érosion dans des conditions de différentes cultures: café < blé < soja < coton < sol nu. En général, les résidus des plantes en contact direct avec le sol sont plus efficaces pour la prévention de l'érosion que les cultures, et quelques tonnes (5 à 10) par hectare, avec des différences entre les espèces, peuvent prévenir la perte du sol et réduire le ruissellement.

La couverture du sol augmente le taux d'infiltration de l'eau de plusieurs centaines pour cent, elle prévient l'évaporation de l'eau avec accroissement de l'humidité. En particulier dans les zones sèches, la couverture du sol a un rôle important dans l'économie de l'eau. Cela réduit aussi la température, ralentissant ainsi le taux de minéralisation de la matière organique.

TABLEAU 6
Différents systèmes basés sur des plantes pour augmenter la séquestration du carbone (d'après CIRAD, 1998).

Mulch	Couvert végétal associé	Engrais vert ou culture de couverture
Maïs	Maïs/Mucuna	Avena
Sorgho	Haricots converts[1]	*Crotalaria*
Coton	Maïs et Mulch	*Lathyrus*
Soja	Riz et légumineuse (*Sesbania, Crotalaria, Pueraria phaseoloides*)	*Lolium, Lupinus angustifolius, L. luteus*
Banane		*Melilotus*
Betterave à sucre		*Sesbania cannabina, S. speciosa, Mucuna aterrima, M. pruriens, Trifolium, Vicia bengalensis , V. articulata, V. ervilia, V. faba, V. hirsuta, V. sativa, V. villosa, V. sinensis*

[1]Haricots couverts: *Phaseolus vulgaris* cultivé par système défrichage-mulch de courte jachère sans brûlis.

Le compost ou le fumier sont traditionnellement utilisés dans l'agriculture avec des effets bénéfiques avérés sur le sol. Un problème dans de nombreux pays est la diminution de cette source d'amendements liés à la production animale. Il y a concurrence pour les résidus des plantes ou la couverture végétale – entre une utilisation pour l'alimentation des animaux ou pour le retour au sol. La gestion prudente associant la culture à la production de bétail peut permettre la réintroduction de nouvelles sources de fumier ou de fumier en compost.

L'utilisation des boues de station d'épuration ou d'autres résidus urbains est moins efficace, à cause du faible taux de transformation en humus, à moins qu'ils soient compostés au préalable. Cette pratique a l'avantage de recycler les déchets mais présente un risque environnemental de pollution du sol, et nécessite donc des précautions spécifiques.

Chapitre 4

Les différents scénarios de la séquestration du carbone

Une attention extrême est accordée ici aux sols arides et aux zones tropicales qui intéressent les pays en voie de développement. Comme nous l'avons déjà noté, les estimations doivent tenir compte du type de sol et de la zone agroécologique, mais les principaux facteurs sont le mode d'utilisation des terres, et les méthodes de gestion des sols et de la culture. Il est également important de tenir compte des critères de dégradation des sols (Oldeman *et al*., 19911) même s'ils ne peuvent pas être liés à des teneurs en matière organique spécifiques.

Options de gestion du sol pour la séquestration du carbone

Une comparaison est faite entre la dernière évaluation de Lal (1999) pour le projet FAO-IFAD (tableau 7) et les dernières données d'lPCC (2000), avec un accent sur les pratiques les plus bénéfiques afin d'établir les priorités. Toutes les estimations sont en t/ha/an. Dans ce but, les activités ou les pratiques sont supposées avoir une durée limitée (20 à 50 ans), correspondant à la capacité limitée des sols à emmagasiner le carbone (relativement au type de sol). On constate de grands écarts entre les valeurs qui devraient être resserrés si l'on veut qu'un marché du carbone se développe.

Sols cultivés

Sur les sols cultivés en permanence, le labour est la pratique la plus importante qui peut avoir un effet majeur sur la réserve de carbone, soit négatif avec le labour conventionnel soit positif quand le labour de conservation est appliqué. Pour cette dernière pratique, le Tableau 8 montre

Tableau 7
Principaux effets des pratiques de gestion du sol ou de l'utilisation des sols sur la séquestration du carbone (t/ha/an). Zones arides et tropicales (d'après Lal, 1999)

	Régions Arides (3 milliards ha)	Régions Tropicales (2 milliards ha)	Surface concernée
1. **Sols cultivés**			700 milliards ha
Labour de conservation	0,1–0,2	0,2–0,5	
Mulch et couverture du sol	0,05–0,1	0,1–0,3	
Agriculture de Conservation	0,15–0,3	0,3–0,8	
Compost	0,1–0,3	0,2–0,5	
Gestion des fertilisants	0,1–0,3	0,2–0,5	
Gestion de l'eau	0,05–0,1		
2. **Prairies et pâtures**	0,05–0,10	0,1–0,2	3 milliards ha
3. **Reforestation**		4 – 8	
4. **Agroforesterie**		0,2-3,1	1 milliard ha

TABLEAU 8
Potentiel net de séquestration du carbone lié aux activités additionnelles selon l'article 3.4 du Protocole de Kyoto (d'après IPCC, 2000)

Activités (Pratiques)	Groupe*	Superficie (10^6 ha)	Adoption/conversion (%de la superficie)		Taux du gain de carbone (t C ha^{-1} an^{-1})	Potentiel (Mt C an^{-1})	
			2010	2040		2010	2040
a) Gestion améliorée dans le cadre de l'utilisation d'un sol							
Sol cultivé en permanence (labour réduit, rotation et cultures de couverture, gestion de la fertilité, contrôle de l'érosion et gestion de l'irrigation)	AI	589	40	70	0,32	75	132
	NAI	700	20	50	0,36	50	126
Rizières (irrigation, engrais minéral et organique, gestion des résidus des plantes)	AI	4	80	100	0,10	>1	>1
	NAI	149	50	80	0,10	7	12
Agroforesterie (meilleure gestion des arbres sur les sols cultivés en permanence)	AI	83	30	40	0,0	12	17
	NAI	317	20	40	0,22	14	28
Sol de pâturage (troupeaux, plantes ligneuses et gestion du brûlis)	AI	1 297	10	20	0,53	69	137
	NAI	2 104	10	20	0,80	168	337
Sol forestier (régénération de la forêt, fumure, choix des espèces, dégradation réduite de la forêt)	AI	1 898	10	50	0,53	101	503
	NAI	2 153	10	30	0,31	69	200
Sol urbain (plantation d'arbres, gestion des déchets, gestion de produits du bois)	AI	50	5	15	0,30	1	2
	NAI	50	5	15	0,30	1	2
b) Changement de l'utilisation du sol							
Agroforesterie (conversion de sols cultivés et de prairies improductifs)	AI	~0	~0	~0	~0	0	0
	NAI	630	20	30	3,10	391	586
Restauration des terres sévèrement dégradées (en culture, prairies ou forêts)	AI	12	5	15	0,25	>1	1
	NAI	265	5	10	0,25	3	7
Prairies (conversion de sols cultivés en prairies)	AI	602	5	10	0,80	24	48
	NAI	855	2	5	0,80	14	34
Restauration des zones humides (conversion de sols drainés en terres humides)	AI	210	5	15	0,40	4	13
	NAI	20	1	10	0,40	0	1
c) Séquestration du carbone hors site							
Produits forestiers	AI	n/d	n/d	n/d	n/d	210	210
	NAI	n/d	n/d	n/d	n/d	90	90
Total	AI					497	1 063
	NAI					805	1 422
	Global					1 302	2 485

* AI : Protocole de Kyoto, Pays Annexe I (approx. pays industrialisés)
NAI : Pays non Annexe I (approx. pays en voie de développement)

l'éventail de variation de la séquestration du carbone, exprimée en t/ha/an de 0,1 à 0,3 dans les régions semi-arides, à 0,2–0,5 dans les régions tropicales humides. Les effets favorables des pratiques de conservation sont très élevés durant les premières années, ensuite ils atteignent un plateau; ils peuvent aussi être rapidement inversés si le labour est réintroduit.

Ces pratiques exigent un minimum de 30 pour cent de résidus des plantes ce qui n'est souvent pas suffisant pour couvrir le sol et prévenir l'érosion. S'il y a une pente, 70 pour cent sont très souvent nécessaires (Benites, communication orale). La concurrence pour les résidus existe pour l'alimentation des animaux et il faut trouver un équilibre.

Très souvent aux Etats-Unis, le labour de conservation n'est pas une vraie pratique de non-labour comme c'est généralement le cas au Brésil et en Argentine. Le non-labour ou l'agriculture de conservation incluent la gestion des résidus des plantes sur le site, ce qui assure l'intrant de matière organique, et le semis direct à travers la couverture de résidus.

La deuxième pratique importante – qui doit être associée à la première (non-labour) pour être efficace – est l'agriculture de paillis. Lal donne des valeurs de 0,1–0,3 t/C/ha/an. La valeur dépend de la quantité de paillis (1 à 6 t) et du type de paillage. Les cultures de couverture ont un effet très semblable, ou sont même encore plus efficaces que les paillis si on les maintient sur le champ. Dans ce cas, il y a de la matière organique au-dessus et au-dessous du sol grâce aux racines. La production de biomasse par la culture de couverture ou de paillis exige de l'eau, donc la pratique dépendra des précipitations. Produite en rotation après la moisson, la biomasse obtenue peut être ajoutée au budget de séquestration du carbone qui pourrait atteindre alors une t C/ha/an. En jouant sur les espèces végétales, on peut aussi influencer la répartition de C entre au-dessus et au-dessous du sol et la profondeur de l'incorporation du carbone (profondeur de l'enracinement). Une liste des espèces de culture de couverture utilisées dans les différentes conditions climatiques par le CIRAD est donnée au Tableau 6, mais il n'y a pas de données sur leur effet spécifique sur la séquestration du carbone. Les déchets organiques (boues de station d'épuration) ont un rendement très bas en carbone du sol stable. Chaque fois que cela est possible, cette matière organique devrait être mûrie par compostage. C'est une méthode de grande valeur et la séquestration du carbone peut être relativement élevée (0,2 à 0,5 t C pour 20 t/compost/ha). Cependant, il est difficile de trouver de bonnes sources de compost.

Pour les zones arides ou semi-arides l'utilisation de plantes de couverture ou de paillis est très importante afin de supprimer la jachère nue ou de l'améliorer. Dans ces zones, l'utilisation du fumier ou du compost peut aussi avoir une importance fondamentale pour déclencher la rétention d'eau et la production culturale dans les zones désertifiées. L'un des meilleurs exemples dans les zones sèches est le développement de «tassas» (petites fosses de plantation) au Niger afin de déclencher le développement de la végétation.

La fumure, avec l'augmentation de la vie biologique obtenue, augmentera le carbone disponible pour la séquestration dans le sol. Mais pour être efficace, cette séquestration implique l'utilisation des pratiques déjà décrites, y compris le non-labour. Ce qu'on appelle «l'intensification agricole» ou l'utilisation de l'irrigation (associée à un bon drainage) permet une augmentation de la production de biomasse, mais les conditions ne sont pas nécessairement compatibles avec celles exigées pour le stockage du carbone.

Toutes les pratiques visant l'accumulation du carbone dans les sols cultivés de façon permanente restaureront aussi les sols dégradés ou préviendront l'érosion. Ce sont les situations doublement gagnantes. La perte de matière organique par érosion est prévenue et l'accumulation de la matière organique augmentera.

Forêts

Outre le boisement – qui dépend largement des décisions politiques – l'agroforesterie représente une bonne option de gestion technique et écologique. Mais il faut se rappeler que l'agroforesterie est un système complexe, comprenant au moins 18 types différents de pratiques et avec un nombre virtuellement infini de variations (Cairns et Meganck, 1994). Les arbres sont associés aux cultures ou au bétail ou aux deux. Toutes ces pratiques impliquent la séquestration du carbone. Ainsi les cultures doivent être cultivées dans des conditions des pratiques déjà présentées

(non-labour, paillage, couverture végétale). Le taux de stockage de carbone peut être très élevé, à cause de la séquestration par les arbres et par les cultures: de 2 à 9 t C/an, dépendant de la durée (15 à 40 ans). L'agroforesterie peut offrir de nombreux avantages en particulier pour l'agriculture des petits exploitants, que ce soit en Afrique ou en Amérique du Sud (Sanchez *et al.*, 1999). Mais elle aura besoin d'une gestion collective de l'espace (par exemple, pour un bassin hydrographique). Les statistiques existantes indiquent qu'à peu près 185 millions de ruraux utilisent les produits de l'agroforesterie, et cela pourrait être développé davantage. L'application du protocole de Kyoto ou des conventions d'applications sera une bonne opportunité pour promouvoir ces initiatives, y compris la plantation d'arbres isolés d'ombrage, en s'assurant que des incitations économiques puissent intervenir dans le cadre des CDM.

On doit noter que l'agroforesterie en Europe peut correspondre à des systèmes très variés, souvent très anciens qui présentent beaucoup d'intérêt y compris économiques, en particulier les associations cultures ou prairies, arbres fruitiers ou bois de qualités

Pâturages et prairies

Quelle que soit la zone écologique, le surpâturage est la principale cause de dégradation, mais les mécanismes et leurs effets varient considérablement. Dans les zones tropicales, le surpâturage induit la compaction et l'hydromorphie du sol; dans les sols arides il provoque principalement la réduction de la couverture du sol, l'érosion ultérieure (par le vent ou l'eau) et la désertification. Si une priorité doit être établie, elle serait pour les pâturages et les prairies des sols arides qui constituent des barrières contre la désertification et l'érosion.

Le moyen technique pour réaliser cela est d'augmenter la couverture du sol et la protection par une biomasse de surface et d'ancrer cette biomasse par un système radiculaire bien développé. D'autres facteurs de gestion, impliquant le pâturage et le contrôle par le feu, peuvent être plus difficiles à appliquer à cause des aspects sociaux. L'intrant économique et l'amélioration de la politique peuvent être des facteurs déterminants.

Superficie concernée et le budget de la séquestration du carbone

De nombreux calculs ou estimations théoriques de surfaces, sont présentées dans l'IPCC (2000) (Lal. 2000 et 1997; Batjes, 1999) dont certaines données ont été extraites (tableau 8). Une distinction est faite entre les changements dans la gestion du sol et les changements dans l'utilisation du sol.

Pour les sols cultivés de façon permanente, l'évaluation de l'IPCC (2000) pour les pays en voie de développement (qui correspondent approximativement aux pays non encore inclus dans l'Annexe 1 du Protocole de Kyoto) est que les pratiques améliorées de gestion pourraient impliquer 20 pour cent du sol (50 pour cent en 2040) avec référence à une zone de 700 millions d'hectares et une moyenne de gains en carbone de 0,32 t/ha/an.

Pour les sols de pâturage, 10 pour cent (et ensuite 20 pour cent, en 2040) des 2104 millions d'hectares seraient impliqués dans l'amélioration de la gestion, aux taux de 0,80 tC/ha/an.Pour l'agroforesterie, 30 pour cent (et ensuite 40 pour cent en 2040) des 317 millions d'hectares pourraient être mieux gérés à un taux de 0,22 t C/ha/an (ce qui est un taux bas comparé aux estimations de Post et Kwon, 2000).

Il ne semble pas réaliste d'espérer d'améliorer les cultures de riz (irriguées/bas fond) pour la séquestration du carbone. La priorité doit être mise sur la réduction des émissions de méthane. Les principales propositions pour le changement d'usage des terres concernent la conversion de terres cultivées en agroforesterie ou prairies, ce qui représente des superficies considérables. Comme pour les rizières, la séquestration de carbone ne peut pas être la motivation principale pour la restauration des zones humides.

Restaurer et prévenir la dégradation des sols doit être la principale priorité, aussi bien pour les pratiques de gestion que pour les changements dans l'utilisation des terres.

Au total le stockage possible de carbone dans les sols au niveau mondial pourrait être de 0,5 à 2Gt de C/an s'il y a une volonté politique pour encourager les nouvelles pratiques.

Chapitre 5

Conséquences et impacts principaux de la séquestration du carbone

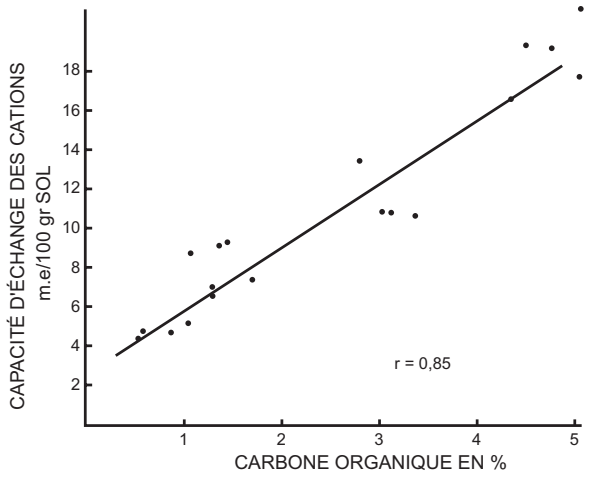
La séquestration du carbone et une augmentation de la matière organique du sol auront un impact direct sur la qualité et la fertilité du sol. Il y aura aussi des effets positifs majeurs sur l'environnement et sur la résilience et la durabilité de l'agriculture.

Qualité et fertilité du sol

Comme nous l'avons déjà mentionné, la matière organique a des fonctions biologiques, physiques et chimiques essentielles dans les sols. La teneur en matière organique est généralement considérée comme l'un des principaux indicateurs de la qualité du sol, tant pour l'agriculture que pour les fonctions environnementales.

La matière organique est d'un intérêt particulier pour les sols tropicaux (excepté pour les vertisols)qui contiennent de l'argile à très faible capacité d'échange des cations. La capacité d'échange des cations augmente en général en fonction de l'augmentation de la matière organique (figure 12). La biodisponibilité d'autres éléments importants, comme le phosphore, sera améliorée, et la toxicité d'autres éléments peut être inhibée par la formation de chélate ou autres liaisons, par exemple, l'aluminium complexé par la matière organique (Robert, 1996a).

Figure 12
Relations entre le carbone organique et la capacité d'échange en cations dans un sol expérimental



En agriculture à faibles intrants en éléments nutritifs des plantes, le recyclage d'éléments nutritifs (N, P, K et Ca) par la décomposition graduelle des résidus des plantes et des cultures est d'une importance cruciale pour la durabilité (Sanchez et Salinas, 1982; Poss, 1991).

Concernant les propriétés physiques, la matière organique et les organismes vivants associés jouent un rôle dans l'agrégation du sol à différentes échelles de l'organisation du sol (Tisdall et Oades, 1982; Robert et Chenu, 1991), aux échelles micro et macro. Les processus d'agrégation et de la séquestration du carbone sont fortement associés (Golchin *et al.*, 1994; Angers et Chenu, 1998).

De nombreuses propriétés dépendent de la structure du sol et de sa stabilité, la rétention de l'eau et sa disponibilité pour les plantes, le taux d'infiltration, enfin la résistance à l'érosion et aux autres processus physiques de dégradation.

Dans le cas de l'érosion, une corrélation a été établie entre la diminution de la matière organique du sol et le développement de l'érosion mais évidemment la texture du sol intervient également. Toute la gestion des cultures pour la séquestration du carbone favorise également la couverture du sol et limite le labour prévenant ainsi l'érosion par le vent et l'eau. Ce sera la principale conséquence des nouvelles pratiques.

Impacts sur l'environnement

La séquestration du carbone dans les sols agricoles contrebalance le processus de la désertification par le rôle de la matière organique accrue dans la stabilité structurale (résistance à l'érosion du vent et de l'eau) et la rétention de l'eau, et le rôle essentiel de la couverture de surface du sol par les plantes, les débris de plantes ou le paillis pour prévenir l'érosion et augmenter la conservation de l'eau.

La matière organique, augmente la qualité du sol, protège aussi l'environnement par la fixation des polluants (tant organiques comme les pesticides, que minéraux, comme les métaux lourds ou l'aluminium) avec, en général, une diminution de leur toxicité.

La qualité de l'air est principalement concernée par la diminution de concentration de CO_2, mais il faut accorder de l'attention aux autres gaz à effet de serre, en particulier le méthane et l'oxyde nitreux (CH_4 et N_2O). Le principal facteur du sol contrôlant leur genèse est l'anaérobiose (réduction du sol), qui est généralement liée à l'hydromorphie. Quand les pâturages ou les parcours sont augmentés, l'émission de méthane par le bétail doit être également prise en considération.

Dans certaines conditions et selon les conditions climatiques (zone humide), ou les propriétés du sol (teneur élevée en argile), N_20 peut être formé. Par conséquent, il faut faire un bilan des émissions de gaz.

La culture du riz inondée représente le système le plus complexe relatif à la séquestration du carbone. Si la matière organique est accumulée dans le sol de rizières, CH_4 se forme aussi. L'effet de serre du méthane est bien plus grand que celui de CO_2. La stratégie habituelle pour prévenir la formation de CH_4 est de réduire la durée de saturation en eau de sorte que la matière organique soit moins protégée de la minéralisation en CO_2. Etant donné ces effets variés, il semble très difficile pour le moment de gérer conjointement la production du riz de bas fond et la séquestration du carbone.

Les développements récents en agriculture de conservation dans les systèmes de rotation riz-blé sont très positifs, et les rendements en riz peuvent être maintenus ou améliorés en diminuant la durée de saturation d'eau, et ceci avec des économies d'eau majeures durant la période de croissance du riz. Cette nouvelle méthode a été validée par les agriculteurs sur plusieurs milliers d'hectares dans certains pays, dont l'Inde et le Brésil.

Les zones humides et marécages naturels ont des conditions anaérobies semblables avec une plus petite émission de CH_4 que les rizières et un plus grand potentiel pour la séquestration du carbone, qui peut produire la formation de tourbe. Ils ont aussi d'autres avantages

environnementaux, donc ils devraient être protégés. Mais ce ne serait pas réaliste d'espérer une augmentation rapide de leur surface.

La qualité de l'eau est aussi améliorée par la réduction de l'érosion, du ruissellement de l'eau et des polluants. Dans le cas spécifique du labour de conservation, une forte minéralisation de la matière organique avec formation de nitrate est évitée ou minimisée.

Les changements dans l'utilisation du sol et la gestion du sol ont aussi un effet important sur la répartition des précipitations entre le ruissellement et le stockage et l'infiltration, avec augmentation de cette dernière dans les conditions de prairie, forêt, et labour de conservation avec couverture du sol. La couverture du sol préviendra l'érosion. Par conséquent, même si un peu de ruissellement se produit encore, l'eau sera dénuée de particules associées à des polluants (oligo-éléments minéraux, $P0_4$). La pollution par des produits solubles diminuera aussi suite à la diminution du ruissellement. C'est l'une des bases des conditions écologiques de la loi agricole aux Etats-Unis depuis 1996. Avec ces changements de pratiques, le défi pour la qualité de l'eau peut être satisfait. Une fois que les changements auront eu lieu dans de grandes zones, la fréquence et la sévérité des crues peuvent aussi décliner.

Les effets d'un changement des pratiques agricoles pourraient ainsi se faire sentir à différentes échelles. L'effet global de l'augmentation de la matière organique dans le sol est également une amélioration de la capacité et la résistance du sol aux différents genres de dégradation ou stress.

Biodiversité et fonctionnement biologique du sol

Les changements de la biodiversité sont évidents quand il y a déboisement ou lorsque l'on passe de la prairie à la culture. Lors des reboisements, ils vont dépendre du type de forêt établi. Des systèmes d'agroforesterie bien gérés impliquent aussi une biodiversité importante. Généralement la biodiversité des mammifères est préservée en référence à la forêt, mais le nombre d'espèces d'oiseaux et de végétaux diminuent respectivement de moitié et d'un tiers (420 à 300), (IPCC, 2000). L'ICRAF parle d'une mosaïque de zones, chacune composée de nombreuses niches qui constituent un système favorable pour la biodiversité.

La plupart des systèmes de cultures intensives ont conduits dans le passé à une diminution importante de la biodiversité, ceci parallèlement à la décroissance de la matière organique par la culture et l'utilisation des pesticides (Rovira, 1994).

Pour les sols cultivés en permanence, l'augmentation de la biodiversité relative à l'augmentation de la matière organique concerne principalement la biodiversité du sol (Copley, 2000). La figure 13 présente une organisation hiérarchique de la biodiversité du sol qui dépend directement de l'apport de matière organique fraîche et des pratiques agronomiques.

Cette biodiversité se répartit depuis le gène, les micro-organismes, la faune, jusqu'aux organismes situés au-dessus du sol. La quantité de bactéries présentes peut augmenter de plusieurs ordres de grandeur (10^3 à 10^{12}) aussitôt qu'une source de matière organique est présente en abondance. En ce qui concerne l'effet sur la biodiversité microbienne, on manque encore de données, car seulement 5 à 10 pour cent des espèces de la microflore du sol sont connus. En utilisant les nouvelles techniques issues de la biologie moléculaire, il est maintenant possible d'évaluer beaucoup mieux la biodiversité spécifique ou interspécifique des micro-organismes.

Le non-labour semble favoriser le développement des champignons qui sont très actifs dans l'agrégation du sol.

Quand la matière organique fraîche (paillis ou résidus des plantes) est présente à la surface du sol, il y a une augmentation dans les différentes catégories de la faune, principalement des décomposeurs. Les chaînes utilisant les détritus alimentaires seront stimulées (Hendricks et al., 1986) (bactéries champignons, micro-arthrodes nématodes, enchytraeides, macro arthrodes). Les vers de terre, les termites et les fourmis, qui sont les principaux groupes composant la macrofaune (> 1 cm), sont souvent appelés les ingénieurs du sol à cause de leur rôle majeur dans la porosité et la structure du sol (biopores). Leur nombre augmente généralement avec une augmentation de la matière organique (figure 14) et une réduction des perturbations du sol (pas de labour); ils sont de bons indicateurs de la qualité biologique du sol (Lavelle, 2000; Lobry de Bruyn, 1997) et ils ont un rôle fondamental à jouer dans l'agriculture de conservation. Par exemple, ils sont indispensables pour assurer la distribution à travers le sol jusqu'à plus d'un mètre) de la matière organique accumulée en surface.

Dans l'état actuel des connaissances, on peut dire qu'une augmentation de la séquestration du carbone entraîne une augmentation de la biodiversité opérationnelle et un fonctionnement biologique du sol plus efficace, alors qu'ils sont habituellement très bas dans la plupart des sols agricoles cultivés. La biodiversité au-dessus du sol dans les systèmes de culture (végétation, oiseaux...) dépend aussi du type de gestion, mais on manque encore de données à ce sujet.

FIGURE 13
Organisation hiérarchique de la biodiversité du sol

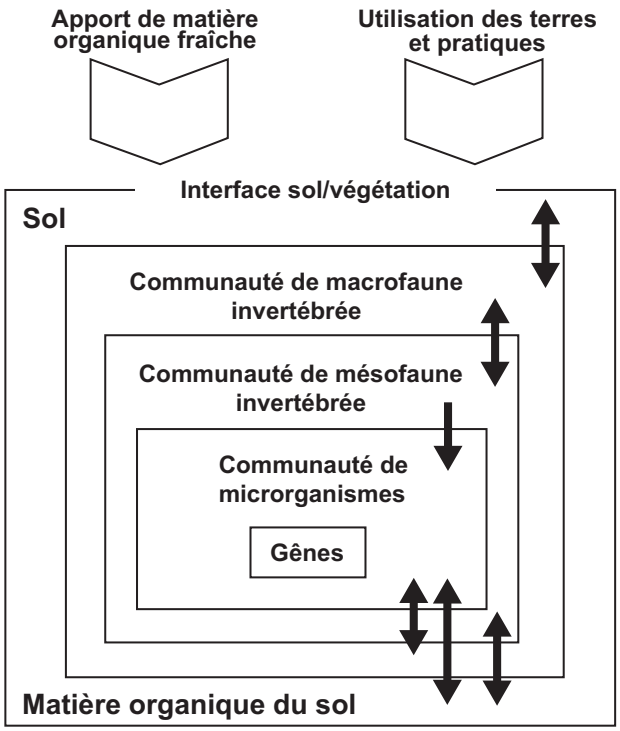
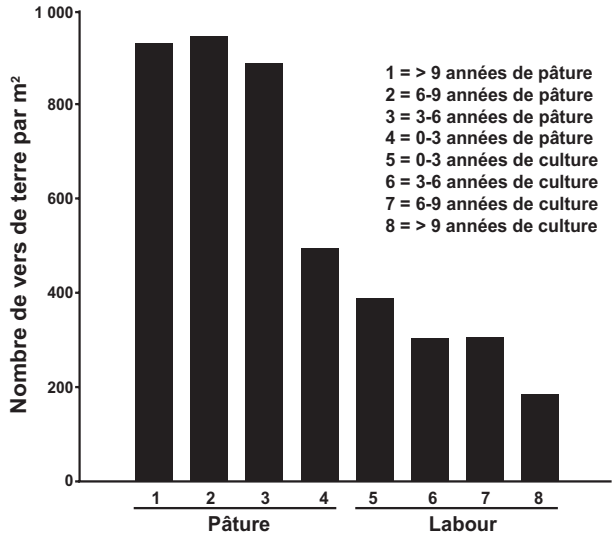


FIGURE14
Effets du précédent cultural sur le nombre de vers de terre dans des fermes de nouvelle Zélande (D'après Fraser in *soil biota*, 1994)



D'une manière générale des études sont à poursuivre pour distinguer le rôle des 3 facteurs importants sur la biodiversité: l'apport de matière organique ou de résidus de culture, le labour et l'influence des traitements pesticides qui peut être parfois prépondérante.

Toutes les conséquences et bénéfices de cette méthode doivent être appréciés relativement à la durabilité de l'agriculture, même relativement aux réservoirs de gènes et à la lutte biologique contre les ravageurs.

Bénéfices pour les agriculteurs

Les agriculteurs ne sont pas toujours sensibles à la seule qualité du sol, à moins qu'il y ait d'autres avantages tangibles.

Par contre la conservation du sol et la prévention de la dégradation du sol sont de plus en plus perçus comme des bénéfices concrets. La matière organique du sol est aussi équivalente à une certaine quantité d'éléments nutritifs et retiendra de l'eau supplémentaire. Tous ces bénéfices ont été évalués pour les agriculteurs des Etats-Unis (Lal *et al.*, 1998a).

Relativement au labour et non-labour, les agriculteurs peuvent gagner sur le plan du temps de travail, de l'énergie et des coûts des équipements : ce sont des avantages directs qui peuvent être évalués. En France et en Europe ce sera un élément essentiel.

Les agriculteurs devront lutter dans tous les cas contre les ravageurs, mais avec une qualité de sol plus élevée, on peut attendre que les cultures soient en général, en bonne santé et plus résistantes.

Les systèmes agroforestiers bien gérés peuvent être viables d'un point de vue économique. Quelques exemples sont bien connus, comme le café, le cacao, le poivre, les arbres fruitiers ou les palmiers. Pour les sols cultivés agricoles l'agriculture de conservation au sens large constitue un nouveau système à mettre au point au niveau de chaque région.

Pour les pays du Sud, on peut normalement attendre des accroissements de rendement ne serait-ce que par un meilleur recyclage et utilisation des éléments nutritifs. Pour les pays développés et par rapport à une agriculture intensive telle qu'elle est pratiquée en Europe, on cherche surtout un maintien de la production.

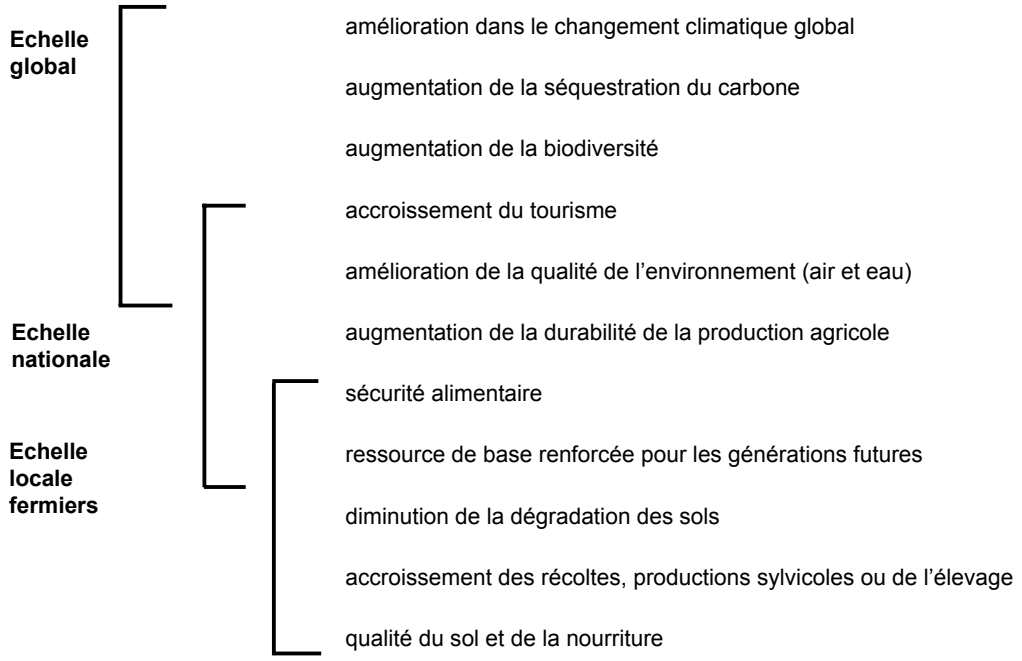
Par conséquent, afin de réaliser une situation doublement gagnante, d'autres bénéfices devront être ajoutés. Ils peuvent provenir de sources variées comme les conventions ou l'intervention politique (Izac, 1997), sur la base de bénéfices comme ceux dont la liste est dressée dans la figure15.

Le marché du carbone

Il est important de développer le système afin qu'une valeur économique soit donnée (comme pour les produits négociables) à la quantité de carbone séquestré (la valeur actuelle est de 25 dollars par tonne de carbone) à travers l'application du Protocole de Kyoto et du mécanisme du développement propre (CDM)

Les activités accessoires à l'article 3.4 du Protocole de Kyoto ont été approuvées par la conférence de Bonn et pourront être appliquées aux pays en voie de développement.

FIGURE15
Principaux bénéfices de la gestion durable du carbone du sol à diverses échelles (d'après Izac, 1997)



Le marché du carbone ou les systèmes d'échange ont débutés durant l'année 2000. Il y trois moyens de calculer la valeur du carbone dans de tels systèmes d'échange et de vente:

1. La première est d'attribuer une valeur au travers du calcul de coûts externes de chaque tonne de carbone émise dans l'atmosphère, en déterminant des dommages au travers les coûts d'adaptation ou de lutte.

2. La deuxième option est de calculer le coût d'implémentation des projets qui pourraient aboutir à une certaine réglementation spécifique par exemple pour le protocole de Kyoto.

3. La troisième est de déterminer quelles industries sont prêtes à payer en contrepartie de leurs émissions de carbone. Les compagnies sont en effet prêtes à anticiper le risque de futures contributions pour appliquer les réglementations sur les émissions de carbone.

Les externalités du carbone ont été évaluées en Europe à 95 dollars EU par tonne, en utilisant le modèle *externe and Open Found* (Pearce *et al.*, 1996; Eyre *et al.*, 1997; Holland *et al.*, 1999). Cette estimation est plus élevée que la valeur de 20–28 $ par tonne estimée au début des années 1990. (Frankhauser, 1994; Sala et Paruelo, 1997).

De nombreux systèmes d'échanges ou de marchés du carbone ont été récemment établis pour lesquels les valeurs du crédit de carbone sont fixées à des taux très inférieurs aux coûts réels externes. La gamme est large puisqu'elle va de 1 à 38 dollars EU par tonne de C quoique les valeurs les plus courantes sont de 2,5 à 5 dollars EU. Ces valeurs sont considérablement inférieures aux voeux exprimés par des agriculteurs américains de 100 dollars EU par tonne.

Afin de produire des effets réels sur le changement climatique, les puits devraient devenir permanents. Si la terre soumise à l'agriculture de conservation est labourée, les gains en C du

sol et la matière organique peuvent être perdus. Ceci représente un defi pour les systèmes de marchés, puisque la réduction des émissions et des tonnes de carbone séquestrées ne sont pas permanentes. Les systèmes peuvent être réversibles à n'importe quel moment. Les systèmes de marché et d'échange doivent donc tenir compte de ce risque et adapter des valeurs plus faibles à la fois pour le potentiel de séquestration du carbone et les valeurs monétaires affectées. Le risque de réversibilité sera moindre durant la période liée au contrat entre un acheteur et un vendeur de crédits de réduction de carbone, mais la permanence ne sera garantie que s'il y a des changements à long terme des comportements et des attitudes. Avec le temps, les procédures scientifiques et de mesure peuvent évoluer aussi en apportant une plus grande clarté dans les terme du marché.

Les systèmes de vente et d'échange offrent des options nouvelles significatives, mais il est aussi clair que le marché des émissions ne peut pas à lui seul résoudre les problèmes du changement climatique et bien sur la solution exige la réduction des émissions.

Des données perverses sont aussi possibles dans les premières étapes du système de marché, tels que la conversion de forêts natives en monocultures d'arbres à croissance rapide afin d'obtenir en récompense des crédits d'émission; de même le labour de prairies pour les reconvertir en systèmes qualifiés de non-labour.

Quelques systèmes de marché sont résumés dans une publication récente (Pretty *et al.*, 2001). La plupart sont du secteur privé et ne seront pas forcément affectés par les progrès du protocole de Kyoto.

Ce qui est appelé activités additionnelles dans l'article 3.4 du protocole de Kyoto a été approuvé pour les pays de l'annexe 1 mais doivent encore être étendues aux pays en voie de développement. Il s'agit d'un défi réel. Le système nécessitera aussi des développements de réglementations inter-gouvernementales ou gouvernementales avec une approche participative (Benites *et al*., 1999) et des actions techniques. Pour les pays européens les pratiques qui séquestrent le carbone dans les sols sont déjà prises en charge par les accords de Kyoto (réunion de Bonn) et elles pourront sans doute être considérées pour des financements agro-environnementaux.

Effets du changement climatique

L'accroissement de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre détermine un changement climatique, mais également à une série d'effets complexes et contrastés (Brinkman et Sombroek 1996; I*mpacts potentiels 2000*).

Tous les résultats expérimentaux démontrent qu'une augmentation de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère induit une augmentation de la biomasse ou de la production primaire nette (NPP) par un effet fertilisant du CO_2 qui joue un rôle important dans la photosynthèse et la croissance de la plante. Le gain dans la fixation de CO_2 peut-être important dans le cas d'un doublement de la concentration de CO_2 (prédite pour l'année 2010). L' augmentation de la production de CO_2 entraine également une diminution de la transpiration des stomates ce qui produit une meilleure efficience de l'eau particulièrement pour les plantes en C4. Donc, en ce qui concerne l'eau, l'effet net de CO_2 sur la réduction de la transpiration de la plante est favorable (Grégory *et al.*, 1998). Evidemment, pour obtenir un gain de récolte d'autres besoins de la plante nécessitent d'être satisfaits en particulier l'eau disponible et les éléments nutritifs.

En ce qui concerne le carbone, il y aura une augmentation de la séquestration de carbone par la biomasse au dessus du sol et une augmentation corrélative dans les apports du sol provenant des résidus de végétaux et de la croissance et le dépérissement des jeunes racines. Les composés organiques des racines ont un rapport C/N plus élevé et sont plus stables.

Toujours en ce qui concerne la séquestration du carbone, un autre facteur, la température, qui peut augmenter sur une grande partie du globe, va jouer un rôle important. Ainsi ce réchauffement peut provoquer un taux plus élevé de minéralisation par les microbes et un taux plus élevé de la respiration des racines. Cet effet de minéralisation sera importante dans les régions froides où la température est actuellement un facteur limitant facilitant l'accumulation de matière organique. Une émission accrue de CO_2 y est prévisible. Mais dans la plupart des autres régions du globe, la séquestration du carbone va augmenter (Ginkel *et al.*, 1999).

La modélisation peut-être utilisée pour évaluer l'effet du changement climatique sur la séquestration du carbone. Plusieurs résultats récents confirment l'augmentation du taux de croissance des forêts dans les régions tempérées et nordiques, ceci à condition que les conditions du sol ne soient pas limitantes (eau, éléments nutritifs, acidité...).

Pour les régions tropicales, des mesures effectuées en Amazonie montrent un accroissement de biomasse (Phillips *et al.*, 1998) de 0, 62 t/C/ha/an, ce qui pour une surface de 7 milliards d'hectares impliquerait une séquestration de carbone de 0,44 Gt C/an. Les causes explicatives ne sont pas simples car l'influence d'El Niño peut impliquer un accroissement de l'humidité dans la région.

Chapitre 6
Propositions

Quels sont les scénarios les plus réalistes concernant la séquestration du carbone?

En référence à l'article 3.3 du Protocole de Kyoto concernant le boisement, le reboisement et le déboisement, et à la période de 2008 à 2012 pour les pays mentionnés à l'annexe 1 du Protocole, le bilan entre les deux premières activités (46 millions de t/C/an) et la troisième (déboisement – 90 millions t/C/an), est négatif. Par ailleurs, les prévisions de la FAO pour le déboisement dans les pays en développement (Chine non comprise) sont de 90 millions d'hectares dans les prochaines 10 années. Par conséquent, la préservation de la forêt doit être une priorité dans tous les pays. Il est dommage qu'elle soit encore ignorée dans les accords de Bonn.

Si l'application de l'article 3.4 (tableau 4) est considérée en référence à la gestion améliorée et au changement d'utilisation du sol, les pays en développement ont le plus grand potentiel pour la séquestration du carbone, excepté dans la gestion des forêts (100 M C/an pour les pays développés, 70 pour les pays en développement). La gestion des sols cultivés en permanence (125 M t C/an) ou des sols de pâturage (240) et le changement de l'utilisation du sol avec conversion à l'agroforesterie (390) sont d'un intérêt majeur pour la séquestration du carbone. Le total représente 0,53 Pg ou Gt C séquestré par an, ce qui est significatif, indépendamment des autres avantages, représentant 10 pour cent de l'émission totale par la combustion des carburants. Il faudrait en tenir compte lors de la discussion des activités accessoires et de l'extension du Protocole de Kyoto aux pays en voie de développement. Si la superficie est augmentée, la séquestration du carbone dans les sols arides et les régions tropicales pourrait s'élever à 1,5 Pg C/an.

Batjes (1996), discute du potentiel de la séquestration du carbone avec une référence particulière à l'état de dégradation du sol. La méthode distingue entre la dégradation légère et la dégradation modérée, qui peuvent être restaurées par une gestion améliorée du sol, et les dégradations fortes et extrêmes qui nécessitent des travaux spécifiques de restauration, impliquant la conversion à une nouvelle utilisation du sol.

La forte dégradation est principalement liée au déboisement (113 millions d'hectares, tableau 7). La conversion à l'agroforesterie (tableau 8) dans les zones plus humides et aux prairies dans les sols arides peuvent être des solutions durables.

Pour d'autres types de sols dégradés, des projets peuvent être développés à l'aide de la réhabilitation par les plantes. Pour les décharges et les sols extrêmement pollués, il est possible d'utiliser des espèces adaptées à une concentration élevée des métaux toxiques. Les espèces adaptées aux sols salins comme *Prosopis juliflora,* ou d'autres espèces halophytes ont différents usages et peuvent séquestrer des quantités considérables de carbone (12 t/ha).

Les sols modérément dégradés (910 millions ha) où le principal processus de dégradation est l'érosion, doivent être mieux gérés en priorité. L'érosion éolienne, qui se produit principalement dans les sols arides de l'Afrique et de l'Argentine, peut être prévenue par

l'agriculture de conservation ou une meilleure gestion du pâturage. Pour prévenir l'érosion par l'eau, qui se produit plus dans la partie centrale de l'Amérique du Sud ou en Afrique (zones tropicales), l'agriculture de conservation et l'agroforesterie peuvent être utilisées. Considérant les prévisions d'IPCC (tableau 7), 50 millions d'hectares semblent un minimum pour la gestion améliorée. Si les incitations sont fortes, le chiffre pourrait être plus élevé. Le taux annuel de séquestration du carbone peut être plus élevé que 0,36 t (Stewart, 1995). Pour les pâturages, la gestion améliorée de 168 millions ha peut être un projet plus ambitieux. Il faut toujours se rappeler que le système est réversible et que, si le non-labour est suivi de labour, le carbone accumulé peut être perdu en quelques années.

Quelles sont les principales implications pour l'agriculture?

Ces propositions ont des conséquences considérables pour l'agriculture mais il est évident qu'il y a de bonnes options pour la gestion des cultures. Celles-ci concernent surtout les sols cultivés en permanence et la composante culture de l'agroforesterie.

La première expérience majeure a été le labour de conservation développé dans les grandes Plaines des Etats-Unis, avec un climat tempéré continental. Cela a été très réussi pour la prévention de l'érosion, mais sans doute un peu moins pour la séquestration du carbone, bien que les pertes en C aient été stoppées (figure 8).

Les variantes de l'agriculture de conservation sont devenues très répandues : elles sont appliquées par des agriculteurs sur 60 millions d'hectares environ dans plusieurs pays, y compris le Brésil, l'Argentine, les Etats-Unis, l'Australie, l'Inde, et sont en cours de validation dans plusieurs pays africains. Elles impliquent la gestion agrobiologique des sols et des systèmes de rotation (CIRAD, 1996, 1998, 1999).

Les principes essentiels sont:

- le non-labour (ou labour minimal).
- le maintien permanent d'une végétation en couverture du sol (culture normale et des plantes supplémentaires) ou de résidus de plantes.
- le semis-direct à travers une couverture de végétation permanente ou de résidus de plantes couvrant le sol.
- la production de biomasse et la couverture du sol avec un paillis végétale à l'aide de plantes adaptées.

Ces systèmes entraînent un taux élevé de séquestration du carbone parce qu'ils combinent les effets du non-labour avec l'intrant maximum de matière organique, sous forme de résidus des cultures ou de cultures de couverture. La couverture de plantes *in situ* est préférée au paillis amené d'un autre sol à cause de l'importance de la matière organique souterraine dérivée des racines.

En agroforesterie, les mêmes pratiques peuvent être utilisées pour les cultures. Etant donné qu'une partie de la séquestration du carbone relative aux arbres peut être ajoutée, la combinaison constitue un système très efficace (plusieurs t de C par an).

Si la méthode de l'agriculture de conservation venait à être utilisée plus généralement, il sera nécessaire de trouver des solutions à quelques nouveaux problèmes qui peuvent être soulevés. L'un de ceux-ci concerne la lutte contre les ravageurs dans les 1–2 ans de non-labour,

où une certaine lutte chimique (utilisation des herbicides) pourrait être nécessaire. Le Glyfosate est communément utilisé à cause de son efficacité sur les graminées et les espèces pérennes. Cependant, une étude attentive sera nécessaire sur l'accumulation, le temps de résidence et l'écotoxicité de ces produits dans le sol (Garcia Torres, 1997).

Le projet IFAD-FAO et le mécanisme de développement propre (MDP)

En continuation d'une première collaboration sur la mise en œuvre de la Convention pour Combattre la Désertification (CDD) et dans le cadre du Mémorandum de la compréhension (MOU) la FAO et l'IFAD ont démarré en 1999 un second projet sur *«la prévention de la dégradation, l'augmentation de la biodiversité du sol et de la végétation et de la séquestration du carbone au travers d'une gestion durable des terres et des changements d'usage des terres»*.

Le premier objectif du projet IFAD-FAO est d'intégrer la sécurité alimentaire, la séquestration du carbone et la lutte contre la désertification, et de montrer que l'application du protocole de Kyoto et des traités post-Kyoto ont des relations avec les conventions de la biodiversité et de la désertification. Une consultation d'experts s'est tenue à Rome en 1999 et des présentations de Kookafkan, Mansuri et Young établissent clairement ces relations (FAO-IFAD, 1999).

Le second objectif du projet est d'encourager le suivi et les mesures au champ. Une large gamme de séquestration de carbone a été rapportée pour les différents systèmes d'utilisation des terres. Le projet analyse les différents scénarios quantifiés pour les différentes zones agroécologiques de l'Amérique latine et de la Zone des Caraïbes (2 sites au Mexique, 1 site à Cuba) en incluant les bénéfices pour les fermiers (récolte, réduction de coût ou du temps de travail et autres bénéfices) pour différentes conversions des usages des terres. L'une des conversions les plus importantes concerne l'alternative à l'agriculture itinérante. L'utilisation de différents modèles principalement Century (Parton, WJ *et al*. 1988, 1994), et Roth-C26 (Colemans et Jenkinson, 1995) permet l'estimation de la dynamique du carbone et de la quantité de matière organique nécessaire pour assurer une production durable avec l'optimisation d'autres objectifs (minimiser la dégradation de terres, maximiser la conservation de la biodiversité).

Comme une suite à ce projet, une lettre d'accord a été signé entre la FAO et le GM en août 2001 sur un programme normatif sur les mécanismes incitatifs de séquestration du carbone pour combattre la dégradation des terres et la désertification. L'objectif central de ce programme est le rassemblement, la vérification et la synthèse des informations produites par les différents projets et études de cas mis en place dans les différentes zones sèches du monde.

Le protocole de Kyoto procure aussi des opportunités de financer des projets concrets, par exemple au travers du Mécanisme de Développement Propre (MDP) ou des projets basés sur des activités (LULUCF). Ces derniers projets sont majoritairement dévolus à la forêt pour l'instant. D'autres sujets traités sont les bénéfices économiques du labour réduit (Canada) ou de l'agroforesterie (Mexique, Guatemala).

Quelques projets concernent le suivi de la biomasse forestière et deux méthodes ont été développées: la première basée sur des sites permanents donne des résultats satisfaisants au plan statistique (voir la proposition faite). La seconde utilise différentes variantes de la télédétection, depuis l'image satellitaire jusqu'à la photographie aérienne obtenue avec des avions volant à basse altitude avec des GPS.

Des possibilités existent pour développer des projets avec un financement du fond de l'environnement global (FEG ou GEF) ou de la Banque Mondiale.

Proposition d'un système de suivi des sols pour la vérification de la séquestration du carbone

Si une extension du Protocole de Kyoto est décidée, ou si le marché du carbone se développe, des instruments pour le suivi, la vérification ou la certification seront nécessaires afin de vérifier les changements dans les réserves de carbone relativement au type de sol, aux conditions climatiques, à l'occupation du sol et aux différentes pratiques de gestion du sol.

La proposition est d'établir au niveau régional ou national un réseau de suivi du sol qui représente la composante la plus permanente de l'écosystème, avec un choix d'une grille géographique systématique; l'échelle peut être discutée, en tenant compte des aspects financiers et de l'hétérogénéité des sols. En Europe, la préférence était pour les grilles de 16 x 16 km (France) ou 8 x 8 km (Grande Bretagne) qui prennent en considération la diversité des sols et l'occupation du sol.

Les parcelles permanentes, géo-référencées sont la base pour la description du profil, l'échantillonnage, l'analyse et la conservation des échantillons. La description de l'occupation du sol présente et passée et des pratiques agricoles doit être faite. Il faut réaliser qu'une période de cinq ans est la durée appropriée pour suivre les changements dans les réserves de carbone. Le réseau devrait être lié à une donnée de base digitalisée relationnelle et des données d'occupation du sol mais aussi à d'autres conditions biophysiques ou socio-économiques qui permettent la détermination de la distribution spatiale à différentes échelles (nationales, régionales) et les différentes implications (système d'information géographique). Les problèmes spécifiques de la détermination de la ligne de base ou des parcelles de référence, qui sont des questions spécifiques soulevées par IPCC, peuvent aisément être résolus.

Ce système de suivi peut être utilisé à différentes fins: séquestration du carbone du sol, qualité et dégradation du sol, pollution du sol et de l'eau, santé de la forêt, changements de la biodiversité, etc. Par conséquent, parallèlement aux mesures des changements dans la séquestration du carbone, certains bénéfices autres que les variations de rendement peuvent être évalués relatives au déclin de la dégradation du sol (érosion, désertification) ou à l'augmentation de la biodiversité.

Quelques sites peuvent être choisis par région écologique et occupation du sol avec différentes pratiques, afin d'être suivis avec un équipement supplémentaire pour une évaluation plus détaillée des stocks (par exemple, utiliser des isotopes du carbone qui permettent l'identification des sources des matières organiques) ou pour mesurer les flux de carbone. Ainsi donc il faut établir des liens avec des réseaux comme Euro flux (dans les forêts) ou Terrestrial Observation Initiative (observation du carbone terrestre TOC).

La télédétection sera un instrument très important pour extrapoler les résultats et cataloguer la couverture par la végétation et l'utilisation du sol, mais elle ne peut pas remplacer le besoin de données réelles sur les changements dans les stocks de carbone du sol.

Quelles sont les principales lacunes des connaissances ?

Des questions importantes doivent être résolues et il manque des données sur le terrain concernant l'effet des différents facteurs qui influencent la teneur en carbone sur une période de 20 à 50 ans: type du sol, conditions climatiques, utilisations du sol et pratiques agricoles.

- les conditions de la durabilité des stocks et de la réversibilité de la minéralisation du carbone si l'on change les pratiques.

- quelle est la séquestration maximale de carbone obtenue dans ces différentes conditions?
- quels genres de composés du carbone sont séquestrés, quelle est leur durée de résidence et leur fonction dans le sol?
- comment peut-on évaluer l'intrant SOM dû aux racines (qualitativement et quantitativement)?
- comment peut-on obtenir de bonnes données pour les modèles?
- comment généraliser les résultats du suivi?
- le besoin de données économiques, en particulier pour les petits agriculteurs?
- la matière organique, la biodiversité et le fonctionnement biologique du sol.
- comment gérer l'intrant et la dynamique de la matière organique? (Femandez *et al*., 1997; Heal etal., 1997)
- quels problèmes peuvent se poser après une certaine période : changements de propriétés physiques?
- autres émissions de GHG qui ont un pouvoir calorifique global bien supérieur au CO_2 (× 21 pour CH_4 et × 310 pour CO).
- l'utilisation supplémentaire de pesticides ; le contrôle des mauvaises herbes et des pathogènes.
- la méthode écologique et l'agriculture durable.
- enfin nécessité d'avoir des données socio-économiques sur les différents types d'agriculture en incluant les externalités.

Nouveaux projets et perspectives

Il existe de nombreuses expérimentations au niveau mondial. L'IFAD et la FAO ont développé des projets en Amérique Latine et aux Caraïbes (2 sites au Mexique, 1 à Cuba).

A la suite de la dernière réunion de la FAO et du GTZ sur la vérification des stocks de carbone et des changements au niveau national (Rome, septembre 2000), il apparaît nécessaire d'établir dans les pays en développement des ateliers pilotes pour le suivi et l'évaluation. Ces sites seront proposés au Brésil, ou il y a de nombreuses expériences historiques (chronoséquences) concernant le déboisement et le développement de prairies ou de pâturages. Ces sites pourraient être utilisés pour mettre en place les méthodologies et les modèles proposés par IPCC et les adapter aux pays tropicaux.

À l'aide de certaines techniques spécifiques (isotopes de C, fractionnement de OM), il sera possible d'obtenir de meilleures connaissances sur l'effet de différentes pratiques de gestion concernant la séquestration du carbone. Certaines recommandations générales et pratiques seront formulées et publiées dans le «Guide for Carbon Stock Evaluation in Soils» (Guide de l'évaluation du stock de carbone dans le sol).

Sur les mêmes sites, les effets de la séquestration du carbone sur les propriétés du sol et la biodiversité du sol devraient être mesurés afin d'évaluer tous les bénéfices du système.

En 2000, un nouveau réseau international a été créé, le DMC (Systèmes basés sur le semis direct et le paillis, et le labour de conservation) qui inclut maintenant 60 institutions internationales et nationales.

La CIRAD s'est joint à ce réseau et avec différents financements français de coopération a mis en place un plan d'action dans plusieurs pays en développement (Brésil, Madagascar,

Mali, Laos, Tunisie), où différentes pratiques agricoles sont testées avec la mesure des stocks et les flux de CO_2 et les émissions de N_2O des sites repérés.

Le gouvernement allemand, à travers GTZ (Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammennarbeit), a établi un partenariat avec le réseau de labour africain.

La Banque Mondiale est fortement impliquée dans de nombreux programmes de diffusion et de vulgarisation sur le semis direct et les pratiques associées, en particulier au Brésil. Une réunion a été tenue au Pakistan en février 2001, sur le thème de l'agriculture de conservation dans le système riz-blé. Une autre réunion a été tenue en Espagne sur l'agriculture de conservation en octobre 2001.

Des réunions ont été tenues au Caire et à Rabat en 2001 pour établir des projets de développement des zones arides non irriguées dans les pays du WANA (Asie de l'Ouest et Afrique du Nord). La séquestration du carbone peut représenter une solution de développement et de lutte contre la désertification.

Enfin, un congrès mondial de l'agriculture de conservation s'est tenu en octobre 2001 sous l'égide de l'ECAF et de la FAO. Il devrait permettre une mise au point sur les possibilités de l'agriculture de conservation.

Conclusion

Le développement de l'agriculture au cours des siècles et des décennies passés a entraîné la consommation des stocks de carbone dans le sol créés pendant une évolution à long terme. Dans la plupart des sols cultivés, en particulier dans les régions arides et semi-arides, cela a conduit à une réduction de la productivité des terres en relation avec la dégradation et la désertification des terres. Il est maintenant temps d'inverser cette tendance. On a démontré que c'était faisable, mais seulement si le type d'agriculture est changé. Le Protocole de Kyoto et les facilités en faveur de la séquestration du carbone dans les sols sont de bonnes opportunités pour le faire. Les sols pourraient séquestrer à peu près 20 Pg de C en 25 ans soit plus de 10 pour cent de l'émission globale. En même temps, cela offre d'autres bénéfices importants pour la qualité du sol, des cultures et de l'environnement, pour la prévention de l'érosion et de la désertification et pour la mise en valeur de la biodiversité.

Les terres cultivées, les prairies et les savanes ont un potentiel pour séquestrer du carbone dans les sols et il existe un grand besoin de pratiques culturales capables d'accroître le stockage du carbone du sol et la productivité.

La séquestration du carbone comporte aussi la promesse d'offrir des options doublement gagnantes et de nouveaux bénéfices pour les communautés des zones sèches. L'attention des gouvernements doit être attirée sur ces bénéfices potentiels et le besoin d'initier un processus de collection de données et d'analyse de stocks et de flux de carbone sur différents sites sélectionnés à une échelle déterminée.

Ces bénéfices résultent du fait que la matière organique est un facteur essentiel dans les sols, où elle détermine une cascade de propriétés ou de fonctions relatives aux propriétés du sol à l'effet de tampon, à la résilience et à la durabilité. La biodiversité dépend de la teneur en matière organique, et son augmentation dans le sol permettra de nouvelles fonctions. Les «ingénieurs du sol» (la macrofaune) assureront, par exemple, des fonctions de labour.

Ce concept implique le développement d'une utilisation du sol et de pratiques de gestion du sol spécifiques. Certaines priorités peuvent être définies pour les sols dégradés avec des mesures adaptées pour les sols cultivés en permanence, les pâturages et l'agroforesterie. Le développement de l'agriculture de conservation sera plus facile dans les pays en développement à cause de l'importance de la dégradation du sol. C'est le cas du Brésil et de l'Argentine où le développement de nouvelles pratiques, en particulier le non-labour et le semis direct sont très rapides. En Asie, la rotation riz-blé sans labour commence à se répandre et cette pratique pourrait très rapidement se généraliser. L'amélioration des pâturages dégradés et l'expansion de l'agroforesterie auront besoin de plus d'efforts et de temps.

L'Europe semble être la plus difficile à convaincre, bien que les conséquences de l'agriculture de conservation pour l'environnement, et plus spécialement la qualité de l'eau semblent maintenant devenir essentielles.

Il est évident, en particulier dans les pays à faibles ressources, que les communautés paysannes rencontrent beaucoup d'obstacles pour adopter des pratiques améliorées, même quand ils en connaissent les bénéfices potentiels. Il y a aussi des lacunes de connaissances et un manque de données associées avec pratiquement toutes les extrapolations régionales ou globales concernant les analyses quantitatives aussi bien que les problèmes de mesure ou d'interprétation des données de terrain sur les flux de carbone. Des données manquent sur les différents écosystèmes et agrosystèmes. Des critiques ont été faites sur les calculs de séquestration qui ne prennent pas tous les flux en compte, en particulier ceux associés à la production de fertilisant, à l'irrigation ou à l'application de fumier organique.

Une première étape indispensable pour traiter ces problèmes sera le développement d'un manuel de mesure et de surveillance. Ce manuel pourrait s'inspirer du travail de l'IPCC et être rédigé par un petit groupe d'experts, et largement circulé pour révision parmi les experts et les gestionnaires. Il est impératif, à ce stade, que des projets pilotes soient développés au travers du Fond Global pour l'Environnement (GEF), du Mécanisme Global (GM) et de la Banque Mondiale pour expérimenter différentes approches pour séquestrer le carbone dans les zones sèches, au travers de l'adoption de techniques qui puissent promouvoir la fertilité du sol et la productivité. De tels projets pilotes pourraient fournir les mécanismes pour produire des données plus appropriées sur les stocks et les flux de carbone avec différents systèmes agricoles; en même temps ces projets pilotes peuvent préparer le terrain pour des applications à une échelle plus large, permettant la certification de réduction d'émissions avec des pays industriels lorsque le protocole de Kyoto sera complété.

Un projet pilote de démonstration peut également aider à créer des protocoles de terrain pour la mesure et le suivi de la séquestration du carbone, à démontrer les bénéfices agronomiques et économiques pour les propriétaires des terres et les bénéfices en séquestration de carbone de ces projets pour les investisseurs potentiels.

Les preneurs de décision doivent être conscients des opportunités qui existent en particulier dans l'agriculture des zones sèches de réduire les émissions et d'accroître le stockage du carbone à la fois dans les sols et la végétation. On doit donc inclure dans les objectifs pilotes, la nécessité d'attirer l'attention à tous les niveaux sur les bénéfices potentiels de la séquestration du carbone aux niveaux local, national, régional, et global.

Dans la nouvelle stratégie, la FAO aura des rôles importants à jouer. D'abord pour la validation et la promotion des concepts, deuxièmement pour aider à mesurer, suivre, modéliser et ensuite organiser des réseaux en vue d'aider les petits agriculteurs à développer et adopter des solutions pratiques.

Les Etats-Unis consacrent des ressources considérables à cette thématique. Des sites ateliers devraient être mis en place dans les régions tropicales en utilisant en particulier les chronoséquences existantes (déforestation, mises en culture), afin d'améliorer les méthodologies et les modèles pour la dynamique du carbone, et mesurer tous les effets.

Tandis que la majorité des projets d'utilisation des terres concernent jusqu'à maintenant le secteur forestier, les projets sur le carbone du sol dans les régions semi-arides et subhumides procurent les opportunités uniques suivantes : la terre a un coût relativement faible par rapport aux zones humides où dans de nombreux cas la mitigation du climat ne sera pas capable d'être compétitive avec la pression qui s'exerce sur les sols. De grandes surfaces de terres dégradées ou désertifiées, sont en quête d'assistance technique ou financière pour restaurer les terres de culture, les prairies et les savanes.

Bien que les chiffres exacts de la désertification soient difficiles à obtenir, les estimations sont entre 3,47 et 3,97 milliard d'hectares de terres désertifiées (Lal *et al*., 1998 a).

Donc, bien que les tonnes de carbone concernées par hectares (0,2–0,5 t) soient relativement petites en comparaison des forêts (2 à 5 t.), le potentiel total pour la lutte contre le changement climatique est considérable. Les régions arides des tropiques ont de faibles taux d'émissions énergétiques, aussi elles ne présentent pas de grandes opportunités pour des réductions dans le secteur énergétique, ni d'ailleurs dans le secteur forestier. Des projets sur le carbone du sol constituent donc une opportunité pour les zones arides et semi-arides de participer à la lutte contre le changement climatique en améliorant les conditions de vie. Afin de réussir, les projets sur la séquestration du carbone nécessitent une forte composante de développement durable tels que l'amélioration des conditions de vie par l'accroissement de la productivité agricole, la réduction des risques de mauvaises récoltes et l'accès à de meilleures intrants agricoles. Les effets sur la séquestration du carbone sont plus susceptibles de réussir s'ils s'appuient sur des institutions, initiatives ou organisations existantes.

Des opportunités existent pour construire des partenariats avec les institutions des pays industriels pour initier des activités de séquestration du carbone au travers de projets pilotes impliquant les communautés locales, et par l'installation de réseaux venant appuyer les réseaux globaux sur la séquestration du carbone.

Le développement des ressources humaines et la formation des fermiers représentera une composante importante de ces projets.

Le besoin existe d'initier des études pour évaluer l'impact potentiel de quelques projets en cours, tels que les ceintures vertes, les programmes de reforestation ou de revitalisation; de même pour la réhabilitation des terres de parcours afin d'évaluer leur contribution potentielle à la séquestration du carbone. De la même manière, des activités planifiées pour produire des amendements organiques au lieu de les brûler doivent être évaluées en ce qui concerne le carbone. Le développement de sources d'énergie renouvelables telles que les biogaz, l'énergie éolienne et solaire doivent être considérées.

Le changement majeur attendu en agriculture est une vraie révolution verte, certainement plus largement applicable et durable que la précédente. La séquestration du carbone et les changements qui en résultent en agriculture sont un moyen pour concilier les trois grandes conventions sur le changement climatique, la biodiversité et la désertification et éventuellement de réconcilier agriculture et environnement.

Références

Alexandratos, N. (ed.). 1995. World Agriculture towards 2010. FAO and John Wiley and Sons. 488 pp.

Andreux, F., Choné, T. 1993. Dynamics of soil organic matter in the Amazon ecosystem and after deforestation: basis for efficient agricultural management. Centre National de la Recherche Scientifique, Nancy. 51 pp.

Angers, D.A., Carter, M.R., Gregorich, E.G., Bolinder, M.A., Donald, R.G., Voroney, R.P., Drury, C.F., Liang, B.C., Simard, R.R, Beyaert, R.P. 1995. Agriculture management effects on soil carbon sequestration in Eastern Canada. pp. 253–264. In: *Carbon Sequestration in the Biosphere, NATO ASI Series. Vol 1 33* (Ed.) By M.A. Beran. Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg.

Angers, D.A., Chenu, C. 1998. Dynamics of soil aggregation and C sequestration. Chapter 14, pp.199–206 in: Lal, R., J.M. Kimble, R.A. Follett, and B.A. Stewart (eds.). *Soil processes and the carbon cycle*. CRC Press, Boca Raton, FL.

Arrouays, D. , Pélissier, 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., Deslais, W., Daroussin, J., Balesdent, J., Gailland, J., Dupoucy, J.L., Nys, C., Badeau V., Belkacem, S. 1999. Stocks de carbone dans les sols de France: quelles estimations? C.R. *Acad Agric. Fr* 85. 278–292.

Arrouays, D., Deslais W., Badeau V. 2001. The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France. Soil use and Management 17, 7–11

Baldy, C. 2000. Conservation du milieu naturel tropical avec des plantes de couverture et des arbres d'ombrage. *Cahiers Agricultures* 9 (4): 267–278.

Balesdent, J. 1996. Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols de France. *Etude et Gestion des sols* 3 (4): 245–260.

Balesdent, J., Arrouays, D. 1999. Usage des terres et stockage du carbone dans les sols du territoire francais (1900–1999. *C.R. Acad. Agric. Fr* 85 (6): 265–277.

Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research* 53: 215–220.

Balesdent, J., Arrouays, D., Gaillard J. 2000. MORGANE: un modèle de simulation des réserves organiques des sols et de la dynamique du carbone des sols. *Submitted to Agronomie.*

Batjes, N.H. 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47: 151–163.

Batjes, N.H. 1999. Management options for reducing CO_2- concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. ISRIC. Wageningen, The Netherlands. 114 pp.

Bazzaz, F., Sombroek, W.G. (eds.) 1996. Global Climate Change and Agricultural Production. FAO and Wiley, Chichester.

Benites,J., Dudal,R., Koohafkan, P. 1999. Land, the platform for local food security and global environmental protection. *World Soil Resources Reports* 86, FAO, Rome. 37–42.

Bilan et gestion des gaz à effet de serre dans l'espace rural. 1999. Comptes Rendus Académie d'Agriculture de France Vol 85 n. 6, 392 pp.

Brinkman, R., Sombroek, W.G. 1996. The effects of global change on soil conditions in relation to plant growth and food production. p 49–63. in Bazzaz F., W.G. Sombroek (eds.). *Global Climate Change and Agricultural Production.* FAO and Wiley, Chichester.

Buyanovski, G.A., Wagner, G.H. 1998. Changing role of cultivated land in the global carbon cycle. *Biology and Fertility of Soils* 27: 242–245.

Cairns, M.A., Meganck, R.A. 1994. Carbon sequestration, biological diversity and sustainable development: integrated forest management. *Environmental Management* 18 (1): 13–22.

Cambardella, C. 1998. Experimental verification of simulated soil organic matter pools. p 519–526 in: Lal L., Kimble J.M., Follett R.A., Stewart B.A.(eds.). Soil processes and the carbon cycle. CRC Press, Boca Raton FL.

Cerri, C., Feller, C., Balesdent, J., Victoria, R., Plenecassagne, A. 1985. Application du traçage isotopique naturel ^{13}C à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. *C.R. Acad. Sc. Paris*, Ser 2, 300: 423–428.

Chauvel A., Grimaldi, M., Tessier, D. 1991. Changes in soil-pore-space distribution following deforestation and revegetation: An example from the Central Amazon Basin, Brazil. *Forestry Ecology and Management* 38: 259–271.

Choné, T., Andreux, F., Correa, J.C., Volkoff, B., Cerri, C.C. 1991. Changes in organic matter in an Oxisol from the Central Amazonian forest during eight years as pasture determined by ^{13}C isotopic composition. in: Berthelin, J. (ed.). *Diversity of environmental biogeochemistry* p. 397–405. Elsevier, Amsterdam.

CIRAD. 1996. Agriculture au Brésil. Agriculture et Développement, 12 décembre 1996, Cirad, France. 76 pp.

CIRAD. 1998. Gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture. Actes de l'Atelier International 23–28 mars 1998. Antsinabe, Madagascar, ed F. Rasolo M. Raunet. 658 pp.

CIRAD. 1999. Ecosystèmes cultivés: l'approche agro-écologique. Agriculture et Développement, 21 mars 1999, Cirad, France. 109 pp.

Copley, J. 2000. Ecology goes underground. *Nature* 406: 402–454.

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

Davidson, E.A., Ackerman, I.L. 1993. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry* 20: 161–193.

De Moraes, J.F.L., Volkoff, B., Cerri, C.C., Bernoux, M. 1996. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondonia, Brazil. *Geoderma* 70: 63–81.

Diaz, S., J.P. Grime, J.P., Harris, J., McPherson, E. 1993. Evidence of a feedback mechanism limiting plant response to elevated carbon dioxide. *Nature* 364: 616–617.

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

Dixon, R.K. 1995. Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gas? *Agroforestry systems* 31: 99–116.

Dregne, H.E. (ed.). 1992. Degradation and restoration of Arid Lands. Texas Tech. Univ. Lubbock.

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

Dupouey, J.L., Siguand, G., Bateau, V., Thimonier, A., Dhole, J.F., Nepveu, G., Bergé, L. Augusto, L., Belkacem, S., Nys, C. 1999. Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises. *C.R. Acad. Agric. Fr* 85 (6.: 293–310).

El Titi A. et Landes H. 1990. Integrated farming system of Lautenbach: a practical contribution toward sustainable agriculture in Europe. In Edwards C et al (eds.). *Sustainable Agricultural Systems*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa.

Eyre N., Downing T., Hoekstra R., Rennings K., Tol R .S. J. 1997. *Global Warming Damages.* ExternE Global warming Sub-Task, Final Report, European Commission JOS3-CT95-0002, Brussels.

Eswaran, H., Van Den Berg, E., Reich, P. 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci Soc Am* J 57: 192–194

FAO. 2000. Sistemas de uso de la tierra en los tropics Humedos y emision y secuestro de CO_2 .World *Soil Resources Report* 88, FAO, Rome. 98 pp.

FAO/IFAD. 1999. Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean.

FAO/IIASA. 1999. World Agro-Ecological Zoning. Food and Agriculture Organization, Rome.

FAO. 2000. Manual on integrated soil management and conservation practices. *Land and water bulletin* 8, FAO, Rome. 204 pp.

FAO/GTZ. 2001. Meeting on verification of country-level carbon stocks and exchanges in non-annex I countries. FAO, Rome.

Fassbender, H.W., Beer, J., Henveldop, J., Imbach, A., Enriquez, G. Bonnemann, A. 1991. Ten year balance of organic matter and nutrients in agroforestry systems at CATIE Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 45: 173–183.

Feller, C. 1979. Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols: application aux sols tropicaux à texture grossière, très pauvres en humus. *Cahiers ORSTOM*, série Pédologie 17: 339–346.

FiBL. 2000. Organic Farming Enhances Soil Fertility and Biodiversity. Results from a 21 year field trial. FiBL Dossier 1 (August.). Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), Zurich.

Field, C.B., Fung, I.V. 1999. The not-so-big U.S. carbon sink. *Science* 285: 544–545.

Fisher, M.J., Rao, I.M., Ayarza, M.A., Lascano, C.E., Sanz, J.I., Thomas, R.J., Vera, R.R. 1994. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 371: 236–237.

Fisher, M.J., Rao, I.M., Ayarza, M.A., Lascano, C.E., Sanz, J.I., Thomas, R.J. & Vera, R.R. 1995. Pasture soils as carbon sink. *Nature* 376: 472–473.

Frankhausen S. 1994. *Valuing Climate Change*. Earthscan, London.

Garcia Torres, L., Gonzalez Fernandez (eds.). 1997. Agricultura de Conservación: Fundamentos agronómicos, medioambientales y economicas. Asociación Española Laboreo de conservación/suelos vivos, Córdoba, Spain 372 pp.

Gaston, C.G., Kolchugina, T., Vinson, T.S. 1993. Potential effect of no-till management on carbon in the agricultural soils of the former Soviet Union. *Agriculture*, *Ecosystems and Environment* 45: 295–309.

Golchin, A., Oades, J.M., Skjemstad, J.O., Clarke, P. 1994. Soil structure and carbon cycling. *Aust. J. Sci. Res*. 32: 1043–68.

Greenland, D.J. 1994. Long term cropping experiments in developing countries: The neeed, the history and the future. p 187–209. In: Leigh, R.A., Johnston, A.E. (eds.). *Long-term experiments in Agricultural and Ecological Sciences.* CAB International, Wallingford 428pp.

Greenland, D.J. 1995. Land use and soil carbon in different agroecological zones. pp 1–24 in*:* Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (eds.). CRC & Lewis Publishers, Boca Raton.

Greenland, D.J., Gregory, P.J., Nye, P.H. (eds.). 1998. Land resources: on the edge of the Malthusian precipice. CAB. International and Royal Society, London. 173 pp.

Gregorich, E.G., Greer, K.J., Anderson, D.W. , Liang, B.C. 1998. Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects. *Soil & Tillage Research* 47: 291–302.

Gregorich, E.G., Drury, C.F., Ellert, B.H., Liang, B.C. 1996. Fertilization effects on physically protected light fraction organic matter. *Soil Sci Sc Am J* 60:472–476.

Gregory, P.J., Simmonds, L.P., Warren, G.P. 1998. Interactions between plant nutrients, water and carbon dioxide as factors limiting crop yields. *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Series B*, 352: 987–996.

Gregory, P.J., Simmonds, L.P., Lal, R. 1990. Soil erosion and land degradation: the global risks. *Adv. In Soil Sci.* 11: 129–172.

Heal, O.W., Anderson, J.M., Swift, M.J. 1997. Plant litter quality and decomposition: an historical overview. p 3–30 in: Cadisch, G., Giller, K.E. (eds.). *Driven by nature: plant litter quality and decomposition.* CAB International, Wallingford.

Hendricks, P., Parmelee R., Cressley, D., Coleman, D., Odum, E., Groffman, P. 1986. Detritus food webs in conventional and no-tillage. *Agrosystems Biosciences* 36 (6): 374–380.

Holland M., Forster D., Young K., Haworth A., Watkiss P. 1999. *Economic Evaluation of Proposals for Emission Ceilings for Atmospheric Pollutants*. Interim report for DG X1 of the European Commission. AEA Technology, Culham, Oxon.

Houghton, R.A. 1995. Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850. p. 45–65 in: Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (eds.). *Soils and Global Change*. CRC & Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

Houghton, R.A., Hackler, J.L., Lawrence, K.T. 1999. The U.S. carbon budget: contributions from land-use change. *Science* 285: 574–577.

Houghton, R.A., Skole, D.L., Lefkowitz, D.S. 1991. Changes in the landscape of Latin America between 1850 and 1985. *Forest Ecology and Management.* 38: 173–199.

Howard, P.J.A., Loveland, P.J., Bradley, R.I., Dry, F.T., Howard, D.M., Howard, DC. 1995. The carbon content of soil and its geographical distribution in Great Britain. *Soil Use Manag*. 11: 9–15.

Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIe siècle. 2000. Ministère de de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Paris. 128pp.

International Geosphere Biosphere Program. 1998. The terrestrian cycle: implications for the Kyoto protocol. *Science* 280: 1393–1394

IPCC. 2000. Land use, land-use change, and forestry special report. Cambridge University Press 377 pp.

Izac, A.M.N. 1997. Developing policies for soil carbon management in tropical regions. *Geoderma* (special issue. 79 (1–40): 261–276.

Jenkinson, D.S., Rayner,J.H. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci* 123: 298–305.

Johnston, A.E. 1973. The effects of ley and arable cropping systems on the amounts of soil organic matter in the Rothamsted and Woburn Ley arable experiments. *Rothamsted Experimental Station Annual Report for 1972 Part 2* 131–159.

Kaetterer T., and Andrén O. 1999. Long-term agricultural field experiments in N Europe: analysis of the influence of management on soil stocks using the ICBM model. Agric. Ecosys.and Environ. 72, 165–179.

Kolchugina, T.P., Vinson, T.S., Gaston, G.G., Rozkov, V.A. , Shwidendo, A.Z. 1995. Carbon pools, fluxes, and sequestration potential in soils of the Former Soviet Union. p. 25–40 in: Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (eds.). *Soil Management and the Greenhouse Effect.* CRC& Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

Lal, R. 1990. Soil erosion and land degradation: the global risks. *Adv. In Soil Sci.* 11: 129–172.

Lal., R. , Kimble, J.M. 1994. Soil management and the greenhouse effect. p. 1–5 in: Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (eds.). *Soil Processes and the Greenhouse Effect.* USDA-SCS, Lincoln, NE.

Lal, R. 1997. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO_2 enrichment. *Soil & Tillage Research* 43: 81–107.

Lal, R., Kimble, J.M., Follet, R.F., Cole, C.V. 1998a. The Potential of U.S. Cropland to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect. *Ann Arbor Press*, Chelsea, MI. 128 pp.

Lal, R., Kimble J.M., Follett R.F., Stewart B.A. (eds.). 1998b. Soil processes and the carbon cycle. Adv in Soil Science, CRC Press 609 pp.

Lal, R., Kimble J.M., Follett R.F. (eds.). 1998c. Management of carbon sequestration in soil. CRC Press 480 pp.

Lal, R. 1999. Global carbon pools and fluxes and the impact of agricultural intensification and judicious land use. pp 45–52 in: Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean. *World Soil Resources Report* 86. FAO, Rome.

Lal, L., Kimble, J.M., Stewart, B.A. (eds.) 2000. Global climate change and tropical ecosystems. CRC press & Lewis publishers, Boca Raton, FL.

Lal, R. 2000. Soil quality and soil erosion. CRC press 352 pp.

Lal, R., Kimble, I., Levine, E, Stewart, B.A. 1995. (eds.). Soils and global change. CRC &Lewis publishers, Boca Raton FL

Lavelle, P. 2000. Ecological challenges for soil science. Soil science 165 (1):73–86

Lobe, I., Amelung, W., Du Preez, C.C. 2001. Losses of carbon and nitrogen with prolonged arable cropping from sandy soils of the South African Highveld. European journal of Soil Science, 52:93–101.

Loby de Bruyn, L.A. 1997. The status of soil macrofauna as indicators of soil health to monitor the sustainability of Australian agricultural soils. *Ecological economics* 23: 167–178.

Lockeretz W., Shearer G., Kohl, D.H. 1981. Organic farming in the Corn Belt. Science 211: 540–547.

Lyon, D.J. 1998. Long-term tillage comparisons for winter wheat-fallow in the US Central Great plains. *Soils & Tillage Research* 49: 1.

Management of carbon in tropical soils under global change: science, practices and policy. *Geoderma* (Special Issue). 1997. 79 (1–4): 279 pp.

Middleton, N., Thomas, D. 1997. World atlas of desertification (second edition.). UNEP 182 pp

Monnier, G., Thevenet, G., Lesaffre, B. 1994. Simplification du travail du sol. *Colloques INRA* N° 65, 172 pp.

Moraes, J.L., Cerri, C.C., Melillo, J.M. 1995. Soil carbon stocks of the Brazilian Amazon basin. *Soil Sci Soc Am J* 59: 244–247.

Moraes, J.L., Seyler, F., Cerri, C.C., Volkoff, B. 1998. Land cover mapping and carbon pools estimates in Rondonia, Brazil. *Int J. Remote Sensing* 19: 921–934

Neill, C. Cerri, C.C., Melillo, J.M., Feigl, B.J., Stendler, P.A., Moraes, J.F.L., Piccolo, M.C. 1998. Stocks and dynamics of soil carbon following deforestation for pasture in Rondônia pp 9–28 in: Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (eds.). Soil processes and the carbon cycle. *Adv. In Soil Science* 1. CRC Press.

Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A., Sombroek, W.G. 1991. (2d ed.). World map of the status of human-induced soil degradation: an explanatory note. United Nations Environment Programme, Nairobi.

Oldeman, L.R. 1994. The global extent of soil degradation. pp 99–117 in: Greenland, D.J. and Szabolcs, I. (eds.). *Soil Resilience and Sustainable Land Use.* CAB International, Wallingford.

Pankhurst, C.E., Doube, B.M., Gupta, V.VSR., Grace, P.R. (eds.). 1994. Soil Biota Management in Sustainable Farming Systems. ÇSIRO, Australia 262 pp.

Parton, W.J., Stewart, W.B. and Cole, C.V. 1988. Dynamics of C,N,P, and S in grassland soils: A model. Biogeochemistry 5:109–131.

Parton, W.J., Woomer, P.L. and Martin, A. 1994. Modelling soil organic matter dynamics and plant productivity in tropical ecosystems. pp. 171–188 in: P.Woomer & M. Swift (eds.). *The Biological Management of Tropical Soil Fertility.* TSBF/John Wiley & Sons.

Paustian, K., Elliot, E.T., Carter, M.R. 1998a. Tillage and crop management impacts on soil C storage: use of long-term experimental data. *Soil & Tillage Research* 47: vii-xii.

Paustian, K., Elliot, E.T., Killian K. 1998b. Modeling soil carbon in relation to management and climate change in some agroecosystems in Central North America. pp. 459–471 in: Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (eds.). *Soil Processes and the Carbon Cycle.* CRC Press. Boca Raton, FL.

Paustian, K., Levine, E. Post, W.M., Ryzhova, I.M. 1997. The use of models to integrate information and understanding of soil C at the regional scale. *Geoderma* 79: 227–260.

Pearce D W., Cline W R., Achanta A N., Fankhauser S., Pachauri R K., Tol R S J., and Vellinga P. 1996.). The social costs of climate change: greenhouse damage and benefits of controls. In: Bruce et al (eds.). *Climate Change (1995.: Economic and Social Dimensions of Climate Change. Cambridge University Press*, Cambridge.

Petersen C., Drinkwater L A. & Wagoner P. 2000. *The Rodale Institute's Farming Systems Trial. The First 15 Years*. Rodale Institute, Penn.

Phillips, O.I., Malhi, V., Higuchi, N., Laurance, W.F., Nunez, P.V., Vasquez, R.M., Laurence, S.G., Ferreirer, L.V., Stern, M., Brown, S., Grace, J. 1998. Changes in the carbon balance of tropical forests: Evidence from long-term plots. *Science* 282: 439–442.

Pieri, C. 1989. Fertilité des terres de savanes. Ministère de la Coopération. CIRAD. 444 pp.

Ponce-Hernandez, R. 1999. Assessing the carbon stock and carbon sequestration potential of current and potential land use systems and the economic rationality of land use conversions. pp 77–92 in: Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean. *World Soil Resources Report* 86. FAO, Rome.

Poss, R. 1991. Transferts de l'eau et des éléments chimiques dans les terres de barre du Togo. Thèse Univ. Paris VI. Editions ORSTOM. 355pp.

Post, W.H., Kwon, K.C. 2000 Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential. *Global change Biology* 6: 327–327.

Post, W.M., Emmanuel, W.R., Zinke, P.J., Stangenberger, A.F. 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 258: 165–159.

Potter, P.K., Jones, O.R., Torbett, H.A., Unger, P.W. 1997. Crop rotation and tillage effects on organic carbon sequestration in the semi-arid southern Great plains. *Soil Science* 162 (2): 140–147.

Powlson, D.S., Smith, P., Coleman, K., Smith, J.U., Glendining, M.J., Korschens, M. Franko, U. 1998. A European network of long-term sites for studies on soil organic matter. *Soil & Tillage Research* 47: 263–274.

Pretty J. & Ball A. 2001. Agricultural Influences on Carbon Emissions and Sequestration: A Review of Evidence and the Emerging Trade Options. Centre for Environment and Society. *Occasional Paper 2001–03.* University of Essex [in pdf at URLwww2.essex.ac.uk/ces].

Puget, P., Chenu, C., Balesdent, J. 1995. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *European Journal of Soil Science* 46: 449–459.

Reganold J P., Elliott L F., Unger Y. L. 1987. Long-term effects of organic and conventional farming on soil erosion. Nature 330:370–372.

Reicosky, D.C., Lindstrom, M.J. 1995. Impact of fall tillage on short-term carbon dioxide flux. In: Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (eds.). *Soils and global change*. CRC Press.

Robert, M. 1996a. Aluminum toxicity a major stress for microbes in the environment. p 227–242 in: Huang, P.M. *et al*., (eds.). *Environmental Impacts*. Vol. 2, Soil component interactions. CRC press.

Robert, M. 1996b. Le sol: interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Dunod/ Masson, Paris. 240 pp.

Robert, M., Chenu, C. 1991. Interactions between soil minerals and microorganisms. p 307–393 in: *Soil Biochemistry 7.* Bollag, J.M., Stotzky, G. (eds.). Marcel Dekker, New York..

Robert, M., Stengel, P. 1999. Sols et agriculture: ressource en sol, qualité et processus de degradation. *Cahiers Agriculture* 8 (4: 301–308).

Rosenzweig, C., Hillel, D. 2000. Soils and global climate change: challenges and opportunities. *Soil Science* 165 (1): 45–56.

Rovira, A.D. 1994. The effect of farming practices on the soil biota. in Soil Biota Management in Sustainable Farming Systems, Vol.1. in: Pankhurst, C.E., Doube, B.M. Gupta, V.VSR, Grace P.R. (eds.). C SIRO, Australia.

Sala O.E. et Paruelo J.M., 1997. Ecosystem services in grasslands. In Daily G (ed.). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington DC.

Sanchez, P.A., Salinas, I.G. 1982. Low-input technology for managing oxisols and ultisols in tropical America. Adv. Agron. 34: 279–406.

Sanchez, P.A. 1995. Science in agroforestry. *Agroforestry Systems* 30: 5–55.

Sanchez, P.A., Buresh, R.J., Leakey, R.R.B. 1999. Trees, soils and food security. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series* B 353: 949–961.

Sarrailh, J.M. 1990. Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais (opération Ecerex.). INRA Centre Technique Forestier Tropical. 273 pp.

Schindler, D.W. 1999. The mysterious missing sink. *Nature* 398: 105–107.

Schroeder, P. 1994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 27: 89–97.

Skjemstad, J.O., Clarke, P., Taylor, J.A., Oades, J.M., McClure, S.G. 1996. The chemistry and nature of protected carbon in soil. *Australian Journal of Soil Research* 34: 251–271

Smith, P., Powlson D S., Glendenning A J., Smith, J U. 1998. Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. Global Change Biology 4: 679–685.

Smith, K.A. 1999. After the Kyoto Protocol: can soil scientists make a useful contribution. *Soil use and Management* 15: 71–75.

Smith, P., Fallon, P., Coleman, K., Smith, J., Piccolo, M.C., Cerri, C., Bernoux, M., Jenkinson, D., Ingram, J., Szabo, J., Pasztor, L. 1999. Modeling soil carbon dynamics in tropical ecosystems. pp341–364 in: Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (eds.). Global climate change and tropical ecosystems. Adv. in *Soil Science.* CRC Press.

Smith, P., Powlson, D.S., Smith, J.U. Elliot, E.T. 1997. Evaluation and comparison of soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma* 81 (Special Issue): 225pp.

Sombroek, W.G., Nachtergaele, F.O. Hebel, A. 1993. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio* 22: 417–426.

Stewart, B.A. 1995. Soil management in semi-arid regions. pp 251–258 in: Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (eds.). Soils and global change, CRC & Lewis publishers, Boca Raton, FL.

Swift M.J., Seward P.D., Frost P.G.H., Ouresbi J.N., Muchena, F. N. 1994. Long term experiments in Africa: Developing a database for sustainable land use under Global Change. pp 229–251 in: Leigh,

R.A., Johnston, A.E. (eds.). *Long-term experiments in Agricultural and Ecological Sciences.* CAB International, Wallingford. 428pp.

Tavarez-Filho, J., Tessier, D. 1998. Influence des pratiques culturales sur le comportement et les propriétés de sols du Parana (Brésil.). Etudes et Gestion des sols 5(1):61–71.

Tebruegge, F., Guring, R-A. 1999. Reducing tillage intensity – a review of results from a long-term study in Germany. Soil and tillage research 53:15–28.

Tebruegge, F. 2000. No-tillage visions – protection of soil, water and climate. Institute for Agricultural Engineering, Justus-Liebig University, Giessen, Germany.

Tian, H., Mellilo, J.M., Kicklighter, D.W., McGuire, A.D., Helfrich III, J.V.K., Moore III, B. Vörösmarty, C.J. 1998. Effect of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems. *Nature* 396: 664–667.

Tilman, D. 1998. The greening of the green revolution. Nature 396, 211–212.

Tisdall, J.M., Oades, J.M. 1982. Organic matter and water stable aggregates. *J. Soil Sci*. 33: 141–163.

Trumbmore, S.E., Davidson, E.A., Barbosa de Camargo, P., Nepstad, D.D., Martinelli, L.A. 1995. Belowground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles* 9: 515–528.

Van Noordwijk M., Cerri C., Woomer P.L., Nugroho K. Bernoux M. 1997. Soil carbon dynamics in the humid tropical forest zone. *Geoderma* 79: 187–225.

Wander M., Bidart M., Aref S. 1998. Tillage experiments on depth distribution of total and particulate organic matter in 3 Illinois soils. *Soil Sci.Soc.Am*. 62. 1704–11.

Winterbottom, R., Hazlwood, P.T. 1987. Agroforestry and sustainable development: making the connection. Ambio 16 (2–3.: 100–110.

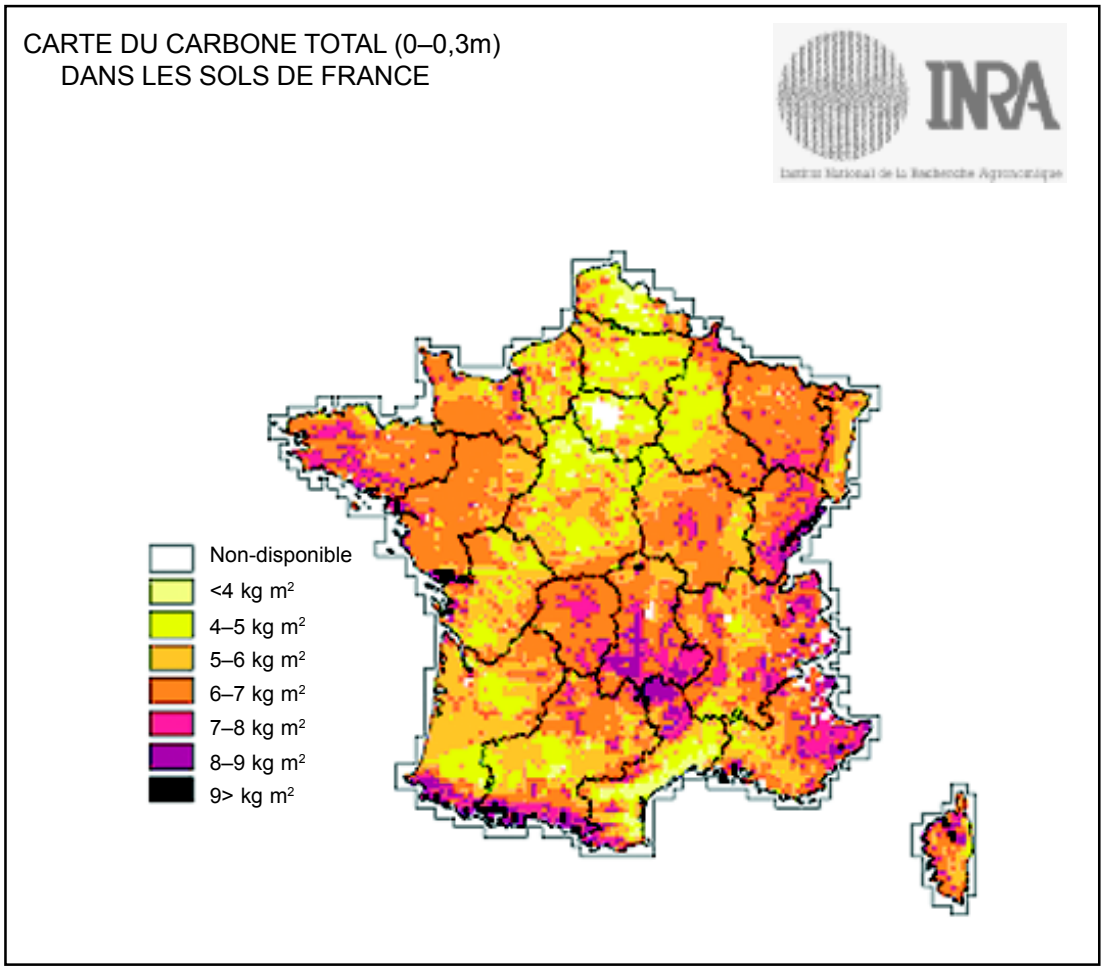
Woomer, P.L., Palm, C.A., Qureshi, J.N., Kotto-Same, J. 1998. Carbon sequestration and organic resource management in African smallholder agriculture. pp. 153–173. in: Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (eds.). *Soil Processes and the Carbon Cycle.* CRC Press, Boca Raton, FL.

Young, A. 1991. Soil monitoring: a new basic task for soil surveys, *Soil Use and Management 7: 126–130.*

Young, A. 1997. Agroforestry for soil management, ICRAF, Nairobi.

Annexe 1

Carta du carbone total dans les sols de France



Source: *Soil Use & Management*. Arrouays *et al.*, 2001.

Annexe 2

Les articles 3.3 et 3.4 du Protocole de Kyoto

ARTICLE 3.3.

Les variations nettes des émissions de gaz à effet de serre par les sources et de l'absorption par les puits résultant d'activités humaines directement liées au changement d'affectation des terres et à la foresterie et limitées au boisement, au reboisement et au déboisement depuis 1990, mesurées en tant que variations vérifiables des stocks de carbone au cours de chaque période d'engagement, seront utilisées par les Parties visées à l'annexe I pour remplir leurs engagements prévus au présent Article. Les émissions des gaz à effet de serre par les sources et l'absorption par les puits associés à ces activités doivent être notifiées de manière transparente et vérifiable et examinées conformément aux articles 7 et 8.

ARTICLE 3.4

Avant la première session de la Conférence des Parties agissant comme réunion des Parties au présent Protocole, chacune des Parties visées à l'annexe I fournit à l'Organe subsidiaire de conseil scientifique et technologique, pour examen, des données permettant de déterminer le niveau de ses stocks de carbone en 1990 et de procéder à une estimation des variations de ses stocks de carbone au cours des années suivantes. A sa première session, ou dès que possible par la suite, la Conférence des Parties agissant comme réunion des Parties au présent Protocole arrête les modalités, règles et lignes directrices à appliquer pour décider quelles activités anthropiques supplémentaires, ayant un rapport avec les variations des émissions par les sources et de l'absorption par les puits des gaz à effet de serre dans les catégories constituées par les terres agricoles et le changement d'affectation des terres et la foresterie, doivent être ajoutées aux, ou retranchées des quantités attribuées aux Parties visées à l'annexe I en tenant compte d' incertitudes, de la nécessité de communiquer des données transparentes et vérifiables, du travail méthodologique du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, et des conseils fournis par l'Organe subsidiaire de décisions de la Conférence des Parties en accord avec l'article 5 et les décisions de la Conférence des Parties. Cette décision vaut pour la deuxième période d'engagement et pour les périodes suivantes. Une Partie peut l'appliquer à ces activités anthropiques supplémentaires lors de la première période d'engagement pour autant que ces activités aient eu lieu depuis 1990.

RAPPORTS SUR LES RESSOURCES EN SOLS DU MONDE

1. Report of the First Meeting of the Advisory Panel on the Soil Map of the World, Rome, 19-23 June 1961 (A)**
2. Report of the First Meeting on Soil Survey, Correlation and Interpretation for Latin America, Rio de Janeiro, Brazil, 28-31 May 1962 (A)**
3. Report of the First Soil Correlation Seminar for Europe, Moscow, USSR, 16-28 July 1962 (A)**
4. Report of the First Soil Correlation Seminar for South and Central Asia, Tashkent, Uzbekistan, USSR, 14 September-2 October 1962 (A)**
5. Report of the Fourth Session of the Working Party on Soil Classification and Survey (Subcommission on Land and Water Use of the European Commission on Agriculture), Lisbon, Portugal, 6-10 March 1963 (A)**
6. Report of the Second Meeting of the Advisory Panel on the Soil Map of the World, Rome, 9-11 July 1963 (A)**
7. Report of the Second Soil Correlation Seminar for Europe, Bucharest, Romania, 29 July-6 August 1963 (A)**
8. Report of the Third Meeting of the Advisory Panel on the Soil Map of the World, Paris, 3 January 1964 (A)**
9. Adequacy of Soil Studies in Paraguay, Bolivia and Peru, November-December 1963 (A)**
10. Report on the Soils of Bolivia, January 1964 (A)**
11. Report on the Soils of Paraguay, January 1964 (A)**
12. Preliminary Definition, Legend and Correlation Table for the Soil Map of the World, Rome, August 1964 (A)**
13. Report of the Fourth Meeting of the Advisory Panel on the Soil Map of the World, Rome, 16-21 May 1964 (A)**
14. Report of the Meeting on the Classification and Correlation of Soils from Volcanic Ash, Tokyo, Japan, 11-27 June 1964 (A)**
15. Report of the First Session of the Working Party on Soil Classification, Survey and Soil Resources of the European Commission on Agriculture, Florence, Italy, 1-3 October 1964 (A)**
16. Detailed Legend for the Third Draft on the Soil Map of South America, June 1965 (A)**
17. Report of the First Meeting on Soil Correlation for North America, Mexico, 1-8 February 1965 (A)**
18. The Soil Resources of Latin America, October 1965 (A)**
19. Report of the Third Correlation Seminar for Europe: Bulgaria, Greece, Romania, Turkey, Yugoslavia, 29 August-22 September 1965 (A)**
20. Report of the Meeting of Rapporteurs, Soil Map of Europe (Scale 1:1 000 000) (Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture), Bonn, Federal Republic of Germany, 29 November-3 December 1965 (A)**
21. Report of the Second Meeting on Soil Survey, Correlation and Interpretation for Latin America, Rio de Janeiro, Brazil, 13-16 July 1965 (A)**
22. Report of the Soil Resources Expedition in Western and Central Brazil, 24 June-9 July 1965 (A)**
23. Bibliography on Soils and Related Sciences for Latin America (1st edition), December 1965 (A)**
24. Report on the Soils of Paraguay (2nd edition), August 1964 (A)**
25. Report of the Soil Correlation Study Tour in Uruguay, Brazil and Argentina, June-August 1964 (A)**
26. Report of the Meeting on Soil Correlation and Soil Resources Appraisal in India, New Delhi, India, 5-15 April 1965 (A)**
27. Report of the Sixth Session of the Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture, Montpellier, France, 7-11 March 1967 (A)**
28. Report of the Second Meeting on Soil Correlation for North America, Winnipeg-Vancouver, Canada, 25 July-5 August 1966 (A)**
29. Report of the Fifth Meeting of the Advisory Panel on the Soil Map of the World, Moscow, USSR, 20-28 August 1966 (A)**
30. Report of the Meeting of the Soil Correlation Committee for South America, Buenos Aires, Argentina, 12-19 December 1966 (A)**
31. Trace Element Problems in Relation to Soil Units in Europe (Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture), Rome, 1967 (A)**
32. Approaches to Soil Classification, 1968 (A)**
33. Definitions of Soil Units for the Soil Map of the World, April 1968 (A)**
34. Soil Map of South America 1:5 000 000, Draft Explanatory Text, November 1968 (A)**
35. Report of a Soil Correlation Study Tour in Sweden and Poland, 27 September-14 October 1968 (A)**

36. Meeting of Rapporteurs, Soil Map of Europe (Scale 1:1 000 000) (Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture), Poitiers, France 21-23 June 1967 (A)**
37. Supplement to Definition of Soil Units for the Soil Map of the World, July 1969 (A)**
38. Seventh Session of the Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture, Varna, Bulgaria, 11-13 September 1969 (A)**
39. A Correlation Study of Red and Yellow Soils in Areas with a Mediterranean Climate (A)**
40. Report of the Regional Seminar of the Evaluation of Soil Resources in West Africa, Kumasi, Ghana, 14-19 December 1970 (A)**
41. Soil Survey and Soil Fertility Research in Asia and the Far East, New Delhi, 15-20 February 1971 (A)**
42. Report of the Eighth Session of the Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture, Helsinki, Finland, 5-7 July 1971 (A)**
43. Report of the Ninth Session of the Working Party on Soil Classification and Survey of the European Commission on Agriculture, Ghent, Belgium 28-31 August 1973 (A)**
44. First Meeting of the West African Sub-Committee on Soil Correlation for Soil Evaluation and Management, Accra, Ghana, 12-19 June 1972 (A)**
45. Report of the Ad Hoc Expert Consultation on Land Evaluation, Rome, Italy, 6-8 January 1975 (A)**
46. First Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Nairobi, Kenya, 11-16 March 1974 (A)**
47. Second Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Addis Ababa, Ethiopia, 25-30 October 1976 (A)
48. Report on the Agro-Ecological Zones Project, Vol. 1 - Methodology and Results for Africa, 1978. Vol. 2 - Results for Southwest Asia, 1978 (A)
49. Report of an Expert Consultation on Land Evaluation Standards for Rainfed Agriculture, Rome, Italy, 25-28 October 1977 (A)
50. Report of an Expert Consultation on Land Evaluation Criteria for Irrigation, Rome, Italy, 27 February-2 March 1979 (A)
51. Third Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Lusaka, Zambia, 18-30 April 1978 (A)
52. Land Evaluation Guidelines for Rainfed Agriculture, Report of an Expert Consultation, 12-14 December 1979 (A)
53. Fourth Meeting of the West African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Banjul, The Gambia, 20-27 October 1979 (A)
54. Fourth Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Arusha, Tanzania, 27 October-4 November 1980 (A)
55. Cinquième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Lomé, Togo, 7-12 décembre 1981 (F)
56. Fifth Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Wad Medani, Sudan, 5-10 December 1983 (A)
57. Sixième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre Africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Niamey, Niger, 6-12 février 1984 (F)
58. Sixth Meeting of the Eastern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Maseru, Lesotho, 9-18 October 1985 (A)
59. Septième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Ouagadougou, Burkina Faso, 10-17 novembre 1985 (F)
60. Revised Legend, Soil Map of the World, FAO-Unesco-ISRIC, 1988. Reprinted 1990 (A)
61. Huitième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Yaoundé, Cameroun, 19-28 janvier 1987 (F)
62. Seventh Meeting of the East and Southern African Sub-Committee for Soil Correlation and Evaluation, Gaborone, Botswana, 30 March-8 April 1987 (A)
63. Neuvième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Cotonou, Bénin, 14-23 novembre 1988 (F)
64. FAO-ISRIC Soil Database (SDB), 1989 (A)
65. Eighth Meeting of the East and Southern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Harare, Zimbabwe, 9-13 October 1989 (A)
66. World soil resources. An explanatory note on the FAO World Soil Resources Map at 1:25 000 000 scale, 1991. Rev. 1, 1993 (A)
67. Digitized Soil Map of the World, Volume 1: Africa. Volume 2: North and Central America. Volume 3: Central and South America. Volume 4: Europe and West of the Urals. Volume 5: North East Asia.

Volume 6: Near East and Far East. Volume 7: South East Asia and Oceania. Release 1.0, November 1991 (A)

68. Land Use Planning Applications. Proceedings of the FAO Expert Consultation 1990, Rome, 10-14 December 1990 (A)
69. Dixième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Bouaké, Odienné, Côte d'Ivoire, 5-12 novembre 1990 (F)
70. Ninth Meeting of the East and Southern African Sub-Committee for Soil Correlation and Land Evaluation, Lilongwe, Malawi, 25 November - 2 December 1991 (A)
71. Agro-ecological land resources assessment for agricultural development planning. A case study of Kenya. Resources data base and land productivity. Main Report. Technical Annex 1: Land resources. Technical Annex 2: Soil erosion and productivity. Technical Annex 3: Agro-climatic and agro-edaphic suitabilities for barley, oat, cowpea, green gram and pigeonpea. Technical Annex 4: Crop productivity. Technical Annex 5: Livestock productivity. Technical Annex 6: Fuelwood productivity. Technical Annex 7: Systems documentation guide to computer programs for land productivity assessments. Technical Annex 8: Crop productivity assessment: results at district level. 1991. Main Report 71/9: Making land use choices for district planning, 1994 (A)
72. Computerized systems of land resources appraisal for agricultural development, 1993 (A)
73. FESLM: an international framework for evaluating sustainable land management, 1993 (A)
74. Global and national soils and terrain digital databases (SOTER), 1993. Rev. 1, 1995 (A)
75. AEZ in Asia. Proceedings of the Regional Workshop on Agro-ecological Zones Methodology and Applications, Bangkok, Thailand, 17-23 November 1991 (A)
76. Green manuring for soil productivity improvement, 1994 (A)
77. Onzième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Ségou, Mali, 18-26 janvier 1993 (F)
78. Land degradation in South Asia: its severity, causes and effects upon the people, 1994 (A)
79. Status of sulphur in soils and plants of thirty countries, 1995 (A)
80. Soil survey: perspectives and strategies for the 21st century, 1995 (A)
81. Multilingual soil database, 1995 (Multil)
82. Potential for forage legumes of land in West Africa, 1995 (A)
83. Douzième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Bangui, République Centrafricain, 5-10 décembre 1994 (F)
84. World reference base for soil resources, 1998 (A F)
85. Soil Fertility Initiative for sub-Saharan Africa, 1999 (A)
86. Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean, 1999 (A)
87. AEZWIN: An interactive multiple-criteria analysis tool for land resources appraisal, 1999 (A)
88. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedios y la emisión y secuestro de CO_2, 2000 (E)
89. Land resources information systems for food security in SADC countries, 2000 (A)
90. Land resource potential and constraints at regional and country levels, 2000 (A)
91. The European soil information system, 2000 (A)
92. Carbon sequestration projects under the clean development mechanism to address land degradation, 2000 (A)
93. Land resources information systems in Asia, 2000 (A)
94. Lecture notes on the major soils of the world, 2001 (A)
95. Land resources information systems in the Caribbean, 2001 (A)
96. La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres, 2001 (A E F).
97. Land degradation assessment in drylands – LADA project, 2002 (A)
98. Quatorzième réunion du Sous-Comité Ouest et Centre africain de corrélation des sols pour la mise en valeur des terres, Abomey, Bénin, 9–13 octobre 2000, 2002 (F)

Disponibilité: juillet 2002

A - Anglais
E - Espagnol
F - Français

Multil - Multilingue
** Epuisé

Dans le cadre du Protocole de Kyoto, la séquestration du carbone (ou puits de carbone) pour atténuer l'effet de serre dans l'écosystème terrestre est un sujet de discussion important. La présente synthèse se concentre sur le rôle spécifique que les sols des régions tropicales et sèches peuvent jouer dans la séquestration du carbone et sur les stratégies de gestion impliquées. Sont passés en revue la dynamique du carbone et le rôle fondamental de la matière organique dans le sol. En vue d'augmenter la séquestration du carbone dans les sols des zones sèches et tropicales, en contribution à l'atténuation du CO_2 atmosphérique dans le monde, il est essentiel d'élaborer de nouvelles stratégies et de nouvelles pratiques dans le domaine de l'agriculture, de l'utilisation des pâturages et forêts, y compris l'agriculture de conservation et de l'agroforesterie. Ces pratiques devraient être facilitées par l'application de l'Article 3.4 du Protocole de Kyoto, ou d'autres initiatives internationales ou nationales pour assurer une agriculture plus durable, et elles doivent être largement promues. Des propositions sont faites concernant de bonnes pratiques de gestion des terres cultivées, les prairies et pâturages et l'agroforesterie avec l'objectif de promouvoir la séquestration du carbone – une priorité étant leur application aux terres dégradées. Une méthode visant à suivre et vérifier des changements, à la fois dans la séquestration du carbone et le degré de dégradation, est proposée sur la base d'un réseau de suivi des sols.

ISBN 92-5-204690-9 ISSN 1014-8531

9 789252 046905

TC/M/Y2779F/1/11.02/900