

**STOCKAGE DU CARBONE
DANS LA BIOSPHERE CONTINENTALE**
CARBON SEQUESTRATION IN THE CONTINENTAL BIOSPHERE

**II. STOCKAGE DU CARBONE DANS LES SOLS AGRICOLES :
QUELS BÉNÉFICES ? DES EXEMPLES DE NOUVELLES PRATIQUES**

***II. CARBON SEQUESTRATION IN ARABLE SOILS :
WHICH BENEFITS ? EXAMPLES OF NEW PRACTICES***

CONCLUSION

par Christian **Feller** (*)

Cette séance sur le “stockage du carbone dans les sols agricoles” animée par Michel **Robert** (17) est complémentaire de la première séance thématique portant sur le “stockage du carbone en forêt tempérée” du 22 mai 2002, animée par François **Le Tacon** (12), et ce, à double titre : d'une part, par la prise en compte de l'agriculture dans les bilans et flux de carbone ; d'autre part, par l'accent mis sur le compartiment sol.

Il nous faut rappeler brièvement, comme ce fut détaillé par M. **Robert** dans son exposé introductif, dans quel contexte de négociations internationales se situent les problèmes de stockage de carbone. Signalons que, suite au protocole de Kyoto, puis aux “Conférences des Parties” (COP) de Bonn et de Marrakech, de longues discussions ont fini par aboutir sur le fait que le stockage du carbone dans les écosystèmes continentaux peut être envisagé dans le cadre de mécanismes financiers qui seront mis en jeu pour un marché international du carbone. Les points actés sont les suivants :

– dans le cadre des négociations entre “pays de l'annexe B” (*grosso modo*, les pays industrialisés et les pays de l'Est), toutes les formes de stockage peuvent être envisagées, tant celles découlant de pratiques forestières telles que boisements, reboisements (article 3.3, protocole Kyoto) que de pratiques agricoles au sens large, telles que agriculture, élevage et agroforesterie (article 3.4, protocole de Kyoto),

– dans le cadre du “Mécanisme de Développement propre (MDP)” qui concerne les négociations entre “pays de l'Annexe B” et “pays de non-Annexe B” (*grosso modo*, les pays en développement et les pays émergents), seule est actée à ce jour, jusqu'à la première période d'engage-

(*) Correspondant de l'Académie d'Agriculture de France, directeur de recherche à l'IRD, Laboratoire “Matière organique des Sols tropicaux”, Montpellier, France.
C.R. Acad. Agric. Fr., 2002, 88, n° 5, pp. 85-90. Séance du 19 juin 2002.

ment (2008-2012), le stockage de carbone à travers les pratiques de boisement et reboisement. Sont donc exclues toutes les pratiques liées à l'agriculture *sensu stricto*, à l'élevage et à l'agroforesterie. Or, pour les pays du Sud, ces pratiques représentent un potentiel plus important que les seuls aspects boisements et reboisements, et le compartiment SOL joue là un rôle essentiel.

Les recherches qui sont donc développées actuellement au Sud visent, entre autres, à accumuler des données scientifiques qui vont être autant d'arguments pour les futures négociations internationales sur la nécessité d'établir, pour le stockage du carbone par les écosystèmes continentaux, un cadre mondial équivalent pour les pays du Nord et du Sud.

Ce contexte étant rappelé, notre conclusion s'organisera autour de quelques points qui nous paraissent importants présentés au cours de la séance "Forêts tempérées", quelques réflexions sur les enjeux du "semis direct", enfin des potentialités offertes par l'agriculture des régions inter-tropicales concernant le stockage du C dans les sols.

1. LE STOCKAGE DE CARBONE EN FORÊT TEMPÉRÉE

Selon **Loustau et al.** (13), les forêts en milieu tempéré semblent augmenter de 0,9 % par an leur stock de C dans la biomasse et constituent donc actuellement un puits de carbone. Il ne semble pas que ce soit le cas pour les régions tropicales. Ce stockage serait dû à de nombreux facteurs tels que les pollutions atmosphériques azotées et soufrées qui jouent le rôle de fertilisants pour la plante et une nutrition carbonée améliorée suite aux changements climatiques et à l'augmentation des concentrations en CO₂ de l'atmosphère. Toutefois, la durabilité de cet effet est incertaine. Par contre, il n'y a pas d'évidence d'une augmentation simultanée des stocks de carbone du sol. Certaines pratiques comme le chaulage auraient même tendance, pour les sols acides à caractère podzolique, à conduire à une diminution des stocks organiques par modification des formes d'humus. Par ailleurs, pour tout système ligneux (forêts gérées, plantations sylvicoles, agroforesterie), le stockage de carbone dans la biomasse, sur le long terme, dépend fortement du devenir hors parcelle des produits ligneux récoltés (18). Ce stockage est réel et fortement positif si le bois est utilisé comme bois d'œuvre ; il est nul si le bois sert à des usages énergétiques conduisant à une émission de CO₂ par combustion. Enfin, comme pour tous les modes de gestion des terres, il faut tenir compte dans les bilans de carbone (ou équivalents carbone en termes de potentiel de réchauffement global), de flux possibles (émission ou fixation) d'autres gaz à effet de serre comme CH₄ (par combustion de la biomasse) et de divers composés organiques volatiles. En conséquence, à moins de très forts reboisements en région tempérée, le stockage du carbone par les systèmes forestiers sera probablement d'ampleur limitée, même s'il reste non négligeable à une échelle nationale selon les pratiques mises en jeu.

2. LES SYSTÈMES DE SEMIS DIRECT AVEC COUVERTURE VÉGÉTALE MORTE OU VIVANTE

Si, dans les systèmes forestiers, les deux compartiments plante et sol doivent être considérés pour une évaluation du carbone séquestré suite à un changement d'usage ou à un changement climatique, autant, dans de nombreux systèmes agricoles, seul le sol est susceptible de stocker à long terme du carbone suite à un changement d'usage des terres ou d'itinéraires techniques. En effet, le carbone photosynthétisé dans la plante cultivée retourne généralement, par une voie ou une autre, sous forme de CO₂ (voire parfois de CH₄) dans l'atmosphère à des échelles de temps souvent de l'ordre de l'année, alors que le carbone stocké dans le sol présente, selon les formes de stockage, des temps de résidence variant de quelques années à quelques dizaines d'années. Le sol est donc un compartiment de l'écosystème intéressant quant au stockage du carbone. Cette séance a été principalement consacrée à l'intérêt de systèmes de semis direct (non-travail ou travail simplifié du sol), avec ou sans couverture végétale vivante ou morte (SCV), en comparaison de pratiques dites "conventionnelles" impliquant des labours avec ou sans enfouissement des résidus de récolte (3, 20).

Les résultats rapportés pour un essai de longue durée en France par **Thevenet** indiquent que le stockage du carbone, calculé sur 30 ans, serait de 0,19 tC/ha/an sous semis direct avec paillis contre 0,04 tC/ha/an pour le traitement labour avec enfouissement des pailles. Ces valeurs quantifiées dépendent, entre autres, de la durée choisie pour l'expérimentation, en particulier, celle de l'état d'équilibre considéré comme atteint. Une synthèse de l'effet de ces pratiques SCV a été faite pour les États-Unis (76 expérimentations de longue durée) où se pratiquent ces techniques depuis de nombreuses années, et une valeur moyenne de 0,4 tC/ha/an est donnée (22). Toutefois, une étude en cours (19) montre que sur 24 situations où l'on dispose aussi de mesures de flux de N₂O, au moins 50 % présentent des émissions de ce gaz (à fort effet de serre), supérieures en SCV par rapport au système conventionnel. Pour certaines situations, le bénéfice du stockage de carbone par le sol en SCV serait annulé par les émissions de N₂O concomitantes.

Divers résultats ont été rapportés ici par **Capillon et Ségué** (3) pour le milieu tropical, illustrant la large gamme de systèmes SCV et d'itinéraires techniques à mettre en œuvre, ou à imaginer, pour s'adapter aux conditions bio-pédo-climatiques locales. Quelques exemples ont montré, mais sur des temps courts, que le stockage du carbone dans le sol pourrait dépasser 2 tC/ha/an. Ces valeurs sont à vérifier pour des échelles de temps longues, mais la mise en place relativement récente des ces pratiques en milieu tropical ne permet pas actuellement cette évaluation. L'inventaire bibliographique de données disponibles en milieu tropical et subtropical fait par **Six et al.** (19) indiquerait un taux de stockage annuel (durées généralement inférieures à 10 ans) du même ordre de grandeur qu'en milieu tempéré, d'environ 0,33 tC/ha/an. Par contre, on ne dispose pratiquement d'aucune donnée sur les flux de N₂O en SCV pour les régions intertropicales.

3. LE STOCKAGE DU CARBONE DANS LES SOLS AGRICOLES DES RÉGIONS INTERTROPICALES

Pour l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre, on estime que 66 % du total (dont 49 % pour les pays de l'Annexe B) sont dus aux énergies fossiles et 34 % (répartis à égalité entre pays de l'Annexe B et les autres) aux usages et changements d'usages des terres (11). Par ailleurs, les gains de stockage de carbone espérés pour 2010 par un changement des pratiques d'usage et gestion des terres sont estimés à 995 MtC/an, dont 71 % seraient dus aux pays de la zone intertropicale (9). En schématisant un peu fortement, on pourrait dire que la gestion mondiale des diminutions des concentrations en gaz à effet de serre de l'atmosphère passe essentiellement par une diminution des émissions au Nord et une augmentation du stockage au Sud.

Il est donc intéressant d'analyser très rapidement les potentialités du stockage de carbone offertes par les sols des agro-écosystèmes de la zone intertropicale. Pour illustration, nous rapporterons essentiellement ici les données globales fournies par **GIEC** (9) qui représentent des moyennes par grands modes d'usage des terres, calculées (ou simulées) sur des échelles pluridécennales. Ainsi, les ordres de grandeur, sont de :

- 0,2 tC/ha/an pour les cultures annuelles en SCV, sous climat tropical sec (moyenne sur 20 ans) et de 0,5 tC/ha/an sous climat tropical humide (15 ans),
- 0,5 tC/ha/an pour les jachères améliorées, agroforesterie, etc. (15 ans). Mais, dans une bibliographie récente, **Albrecht et Kandji** (1) donnent des valeurs moyennes de 1,7 tC/ha/an sur cinq ans,
- 0,9 tC/ha/an en prairie sous climat tropical sec (moyenne sur 40 ans) et 1,8 tC/ha/an sous climat tropical humide (40 ans), avec des variations, sous prairie plantée, allant de 0,6 à 7 tC/ha/an (4),
- d'autres exemples sont en cours d'étude, comme, par exemple, le non-brûlis de la canne à sucre au Brésil (6, 16).

Il ne faut toutefois pas oublier que l'efficacité en terme de stockage de C dépendra très fortement aussi de l'histoire de la parcelle, un aspect insuffisamment étudié (8, 10). C'est ainsi que l'effet d'une mise en pâturage, système *a priori* stockant en termes de carbone du sol, n'aura quasi aucun effet positif derrière défrichement d'une forêt tropicale, alors que des augmentations importantes du carbone du sol (0,5 à 1,5tC/ha/an) pourront être observées pour une prairie bien gérée, installée après des systèmes de cultures continues (canne à sucre ou cultures maraîchères) (4, 8). Cette importance de la situation initiale a été aussi évoquée par **Nys et al.** (15), au cours de la première séance thématique (mai 2002) sur le stockage de C par les écosystèmes forestiers.

Les potentialités de stockage de carbone dans les sols des régions intertropicales sont donc très importantes, mais les alternatives proposées par la recherche doivent être toujours adaptées aux conditions agro-socio-économiques locales pour pouvoir être appropriées par le monde agricole.

La France participe fortement, tant sur le plan national que dans ses activités de recherche en coopération avec les pays du Sud, à l'effort international mené actuellement pour identifier des "systèmes séquestrants", quantifier de façon précise le stockage de carbone, tant dans la biomasse que dans les sols, en hiérarchiser les déterminants, et ce à toutes les échelles spatiales et temporelles. On peut signaler à ce sujet: (i) l'expertise en cours, commandée par le ministère de l'Environnement et menée par l'INRA, sur la "Séquestration du carbone dans les sols agricoles français" (2002), (ii) l'activité déployée par le CIRAD et l'IRD concernant de nombreux agroécosystèmes de pays tropicaux, les programmes soutenus par le ministère de l'Environnement comme "Gestion et Impacts sur le Changement Climatique" (GiCC) et "Gestion du patrimoine Sol" (GES-SOL).

Je ne voudrais pas terminer cette séance sans un clin d'œil à nos pères qui furent nos pairs :

– dès 1804, **de Saussure** (7) montrait que l'augmentation de la concentration de CO₂ de l'atmosphère a un effet positif (si faibles augmentations) ou négatif (si très fortes augmentations) sur la croissance des plantes (chap. 2, pp. 25-59), ce qui est confirmé par **Lundegårdh** (14), pour les gammes de variation qui nous intéressent aujourd'hui. Cet auteur donne aussi une description détaillée d'une chambre de mesure des flux de CO₂ entre le sol et l'atmosphère (pp. 146-148 et 222) ;

– les premières mesures de CO₂ de l'atmosphère du sol sont probablement celles de **Boussingault** et **Lévy** (2), dès 1852, et des estimations, relativement acceptables, des stocks de carbone des principaux compartiments terrestres (végétations, sols, eaux, sédiments) sont données par **Waksman** (21) dès 1936, dans l'Introduction (p. xii) de son ouvrage sur l'Humus. La première publication à laquelle il se réfère est celle de **Clarke** en 1916 (5). Par exemple, les valeurs proposées (en milliards de tonnes de carbone, GtC) pour les stocks de C de l'atmosphère et des sols (0-30 cm) sont respectivement de 600 et 400 GtC, à comparer aux valeurs admises aujourd'hui, respectivement de 730 et 700 GtC.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) ALBRECHT A. et KANDJI S.T., 2002. – Carbon sequestration in agroforestry systems. Agriculture Ecosystems and Environment. *Sous presse*.
- (2) BOUSSINGAULT J.B. et LÉVY, 1852. – Sur la composition de l'air confiné dans la terre végétale. Comptes Rendus Acad. Sci., **35**, 765 et Ann. Chim. Phys., (3) 37, 5-50 (réf. tirée de WAKSMAN, 1936).
- (3) CAPILLON A. et SEGUY L., 2002. – Ecosystèmes cultivés et stockage du carbone. Cas des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale. Communication orale à la séance thématique "Stockage du carbone dans la biosphère continentale. Stockage du carbone dans les sols agricoles : quels bénéfices ? des exemples de nouvelles pratiques" (19 juin 2002), C.R. Acad. Agric. Fr., **88**, n° 5, 63-70.
- (4) CHEVALLIER T., 1999. – Dynamique et déterminants du stockage du carbone dans un vertisol sous prairie. Mémoire de thèse, Rapp. Mult., IRD, Montpellier, 117 pages + Annexes.
- (5) CLARKE F.W., 1916. – The data of geochemistry. Bull. **616**, U.S. Geol. Survey (réf. tirée de WAKSMAN, 1936).
- (6) DE LUCA E., 2002. – Matéria orgânica e atributos dos solo em sistemas de colheita com e sem queima da cana-de-açúcar. Mémoire de thèse de doctorat. Rapport Mult., CENA, Piracicaba, Brésil.
- (7) DE SAUSSURE Th., 1804. – Recherches chimiques sur la végétation. Nyon Ed., Paris (fac-similé), Gauthiers-Villars, Paris, 1957, 327 pages.
- (8) FELLER C., ALBRECHT A., BLANCHART E., CABIDOCHÉ Y.M., CHEVALLIER T., HARTMANN C., ESCHENBRENNER V., LARRÉ-LARROUY M.C. et NDANDOU J.F., 2001. – Soil organic carbon sequestration in tropical areas. General considerations and analysis of some edaphic determinants for Lesser Antilles soils. In : Nutrient Cycling in Agroecosystems, **61**, 19-31.

- (9) GIEC, 2000. – Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Rapport spécial du GIEC : Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie. Résumé à l'intention des décideurs. OMM, PNUE, 24 pages.
- (10) GUO L.B. et GIFFORD R.M., 2002. – Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, **8**, 345-360.
- (11) IPCC, 2000. – Land Use, Land-Use Change, and Forestry. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. R. T. Watson, I. R. Noble, B. Bolin, N. H. Ravindranath, D. J. Verardo and D. J. Dokken (eds.), Cambridge University Press, UK. p. 375.
- (12) LE TACON F., 2002. – Introduction à la séance thématique "Stockage du carbone dans la biosphère continentale. Stockage du carbone dans les forêts tempérées" (22 mai 2002), *C.R. Acad. Agric. Fr.*, **88**, n° 5, 3-5.
- (13) LOUSTAU D., DEWAR R., GRANIER A. et NYS C., 2002. – La phase biosphérique forestière du cycle biogéochimique du carbone : ce que nous savons, ce que nous ignorons. Communication à la séance thématique "Stockage du carbone dans la biosphère continentale. Stockage du carbone dans les forêts tempérées" (22 mai 2002), *C.R. Acad. Agric. Fr.*, **88**, n° 5, 41-48.
- (14) LUNDEGÅRDH H., 1924. *Der Kreislauf der Kohlensäure in der Natur*. Jena, 308 pages.
- (15) NYS C., DUPOUEY J.L., HUET S. et EPRON D., 2002. – Effets de la sylviculture sur le stockage de carbone dans les sols forestiers. Communication orale à la séance thématique "La séquestration du carbone dans la biosphère continentale. La forêt puits de carbone" (22 mai 2002), *C.R. Acad. Agric. Fr.*, **88**, n° 5, 29-36.
- (16) RAZAFIMBELO T., 2002. – Effet du non-brûlis de la canne à sucre sur la séquestration de C dans un sol ferrallitique argileux. Mémoire de DEA national de Science du Sol. Rapp. Mult., IRD, Montpellier, 22 pages.
- (17) ROBERT M., 2002. – Stockage du carbone dans les sols : faisabilité et bénéfices. Communication à la séance thématique "Stockage du carbone dans la biosphère continentale. Stockage du carbone dans les sols agricoles : quels bénéfices ? des exemples de nouvelles pratiques" (19 juin 2002), *C.R. Acad. Agric. Fr.*, **88**, n° 5, 53-61.
- (18) ROY C., 1999. – Options techniques et socio-économiques des émissions de CO₂ et d'augmentation des stocks de carbone. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, **85**, n° 6, 311-320.
- (19) SIX J., FELLER C., DENEK K., OGLE S.M., SA J.C.M. et ALBRECHT A., 2002. – Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils ; effect of no-tillage. *Agronomy*, **91**, 217-232.
- (20) THEVENET G., MARY B. et WYLLEMAN R., 2002. – Stockage du carbone et techniques de travail du sol en milieu tempéré : bilan de 30 années d'expérimentation en grandes cultures. Communication à la séance thématique "Stockage du carbone dans la biosphère continentale. Stockage du carbone dans les sols agricoles : quels bénéfices ? des exemples de nouvelles pratiques" (19 juin 2002), *C.R. Acad. Agric. Fr.*, **88**, n° 5, 53-61.
- (21) WAKSMAN S.A., 1936. *Humus, origin, chemical composition and importance in nature*. Baillière, Tindall and Cox, London, 494 pages.
- (22) WEST T.O. and MARLAND G., 2002. – A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **22**, 755-775.

(Reçu le 7 octobre 2002, accepté le 2 décembre 2002)