

# L'agroforesterie permet-elle de concilier production agricole et atténuation du changement climatique ?

par Tiphaine Chevallier<sup>1)</sup>, Rémi Cardinael<sup>1),2)</sup>, Camille Béral<sup>3)</sup>, Claire Chenu<sup>2)</sup> et Martial Bernoux<sup>1)</sup>

Les débats internationaux commencent à aborder la question spécifique du carbone (C) des sols, comme ayant un rôle majeur dans la fertilité des sols et dans le cycle global du carbone terrestre. Les agrosystèmes contribuant au stockage de carbone dans les biomasses et dans les matières organiques du sol permettent d'atténuer les effets du changement climatique. Les systèmes agroforestiers, associant arbres et cultures annuelles, sont-ils une solution efficace et durable pour assurer la sécurité alimentaire et lutter contre le changement climatique ?

1) UMR Eco&Sols, IRD, Place Viala, Campus SupAgro, Montpellier

2) AgroParisTech, UMR Ecosy, Bâtiment EGER, Campus AgroParisTech Grignon, 78850 Thiverval Grignon.

3) Agrooof, 9 plan de Brie 30140 Anduze.

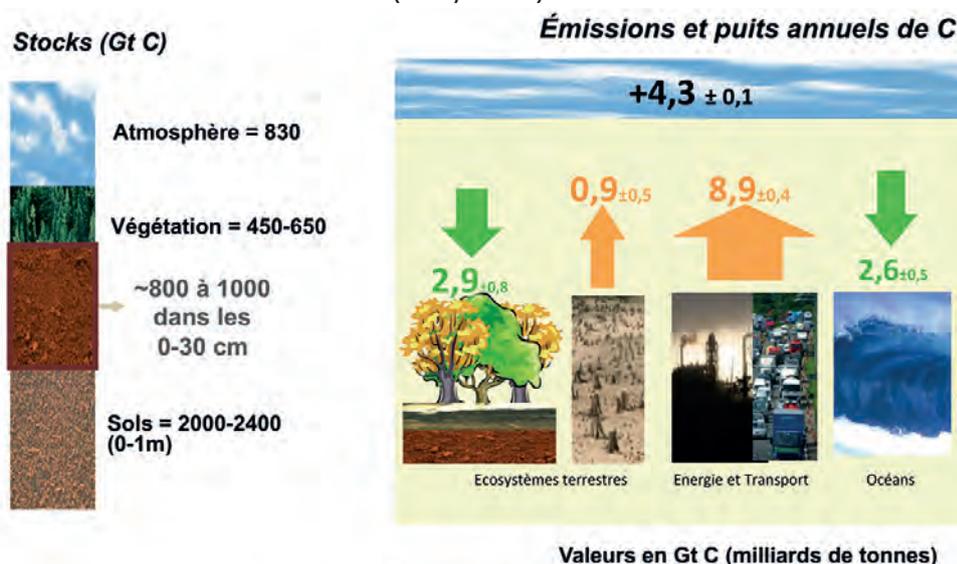
## Le stockage de carbone dans les sols agricoles, une question d'actualité

Le secteur de l'agriculture et la forêt participent à 24 % des émissions globales de gaz à effets de serre (dioxyde de carbone, CO<sub>2</sub>, méthane, CH<sub>4</sub> et protoxyde d'azote, N<sub>2</sub>O) dans l'atmosphère selon le dernier rapport du GIEC [1]. En France [2], l'agriculture contribue pour près d'un cinquième des émissions de gaz à effet

de serre (GES). Le secteur agriculture-forêt représente ainsi un réel potentiel de diminution des émissions, mais aussi de séquestration de C dans les sols et dans la biomasse.

Dans le cycle du carbone terrestre, le carbone des sols, qui est sous forme de matières organiques (Encadré p. 50), représente le plus grand réservoir de C en interaction avec l'atmosphère (Figure 1). Les sols à la fois émettent du CO<sub>2</sub> via la respiration des racines et des microorganismes du sol, et piègent du

**Figure 1-** Stocks et flux annuels globaux de carbone entre les écosystèmes et l'atmosphère. Les valeurs sont en Giga tonnes, soit en milliards de tonne de carbone (Giec, 2013).



Le Quéré et al., 2014. Global carbon budget 2014. Earth Syst. Sci. Data Discuss. <http://dx.doi.org/10.5194/essdd-7-521-2014>

CO<sub>2</sub> via la photosynthèse des plantes. Les plantes puisent le CO<sub>2</sub> atmosphérique puis se décomposent lentement dans les sols pour former le stock de C des sols.

Le bilan de ces échanges est positif. Il est de l'ordre de 2,9 milliards de tonnes de C stocké annuellement dans les écosystèmes terrestres<sup>[1]</sup> (Figure 1). L'ensemble des sols de la planète contient ainsi environ 2400 milliards de tonnes de C organique, dont 800 à 1000 milliards de tonnes se situent dans les 30 premiers centimètres du sol.

Une faible augmentation de ces stocks de C des sols, + 4 ‰ à +5 ‰ pour les stocks de surface, permettrait d'annuler l'augmentation annuelle de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère de + 4,3 milliards de tonnes. Pour un stock moyen de 50 tonnes de C à l'hectare sur 1 mètre de profondeur (GIS Sol<sup>[6]</sup>), cette augmentation correspondrait à un taux de stockage de C annuel de 200 à 250 kgC/ha/an. L'agroforesterie est-elle une pratique agricole permettant une telle augmentation annuelle des stocks organiques des sols ?

### Utiliser la bonne terminologie

Les termes de « matière organique du sol » et de « carbone organique du sol », voire même de carbone du sol sont souvent confondus et employés l'un pour l'autre. Le carbone organique du sol représente environ 50 % de la matière organique. Pour les sujets touchant au cycle global du carbone, c'est-à-dire avec des quantités par unité de surface, comme ici des kilogrammes de C par hectare (kgC/ha), on parle plutôt de carbone organique des sols, COS. Attention aussi à la comparaison de valeurs données en tonne d'équivalent CO<sub>2</sub> et en tonne de C (1 tCO<sub>2</sub> = 12/44 soit 0,27 tC). Pour les sujets s'intéressant à la qualité des sols ou à sa fertilité, on parle plutôt de matière organique des sols (MOS), exprimée en teneur ou en concentration (par exemple milligramme de matière organique par gramme de sol).

## Estimation du stockage de carbone annuel dans les sols d'un système agroforestier

### Comparer les stocks de carbone dans des parcelles agricoles avec et sans arbre

La comparaison des stocks de carbone des sols de parcelles agricoles contiguës, parcelles agroforestières dont une partie a été plantée avec des arbres et parcelles témoins sans arbres, permet d'estimer l'éventuel stockage additionnel de C des sols par les systèmes agroforestiers. Les deux types de parcelles sont cultivées et gérées exactement de la même façon, seule la présence d'arbres différencie les parcelles agroforestières des parcelles témoins. L'existence de tel couple de parcelles sur un même sol et ayant une même histoire est relativement rare. De plus, comme le stockage de C dans les sols est lent, la plantation d'arbres ne doit pas être trop récente afin de pouvoir mesurer des différences de stock de carbone significatives entre les deux types de parcelle. Face à cette difficulté, les données quantitatives de la littérature scientifique sont peu nombreuses et variables. Pour la FAO<sup>[3]</sup>, en milieu tropical on note des valeurs de 95 à 196 kgC/ha/an, pour l'Inra<sup>[2]</sup>, en France on note des valeurs de 100 à 1350 kgC/ha/an.

Face à ces valeurs éparées, des travaux de recherche financés par l'Ademe (programme Reactif) ont récemment cherché à quantifier précisément le bilan complet des entrées et sorties de C dans ces agrosystèmes pour estimer le stockage de carbone additionnel des systèmes agroforestiers (Encadré p. 51). Près de Montpellier, à Prades-le-Lez sur le domaine de Restinclières, un couple de parcelles expérimentales en agroforesterie (blé dur/noyer,

Figure 2 - Parcelle en agroforesterie à Prades-le-Lez (Hérault). Lignes de noyers intraparcélaires dans une culture de blé dur. À gauche en novembre 2013, à droite, juin 2014. Notez la présence de végétation spontanée sur la ligne d'arbres même en hiver.





Pâturage et agroforesterie (Theix, Puy de Dôme).

110 arbres/ha) et témoin (blé dur) est installé depuis 18 ans (Figure 2). L'ensemble des entrées de carbone dans le sol et la comparaison des stocks de carbone entre ces deux types de parcelles permet d'estimer un taux de stockage annuel additionnel par le système agroforestier.

#### **Dans l'Hérault, une estimation précise du stockage annuel de carbone d'un système agroforestier**

Les entrées de carbone dans le sol sont supérieures en agroforesterie de 863 kgC/ha/an, soit une augmentation des entrées annuelles de C de 32 % par rapport à la parcelle cultivée. Ces entrées sont constituées des feuilles

mortes, du renouvellement de la végétation spontanée qui pousse sur la ligne d'arbres, et des racines fines des arbres. Cette différence est donc due à la fois à la présence d'arbres mais aussi de la végétation spontanée de la ligne de plantation (Figure 2). Des prélèvements de sol jusqu'à 2 m de profondeur sur la ligne d'arbre, dans l'inter-rang et dans la parcelle cultivée ont montré que ces entrées additionnelles et régulières de carbone conduisaient à un taux de stockage de carbone dans le sol de  $248 \pm 31$  kgC/ha/an sur 30 cm de profondeur et de  $350 \pm 41$  kgC/ha/an sur 1 mètre de profondeur en 18 ans, soit une augmentation de 12 % du stock de carbone

### Mécanismes du stockage de carbone dans les sols

Les stocks de carbone des sols résultent du bilan entre les entrées organiques (résidus de culture, racines, litières des arbres) et les sorties par minéralisation des matières organiques du sol. Pour augmenter les stocks de carbone des sols, il faut donc augmenter les entrées de carbone dans les sols et/ou en diminuer les sorties <sup>[4]</sup>.

Augmenter les entrées de carbone, c'est-à-dire la production végétale et son retour au sol (litières, racines, résidus de culture) ou les apports de produits organiques tels que fumier ou compost, est relativement facile à visualiser et à estimer.

Diminuer les sorties de carbone, c'est-à-dire la minéralisation des matières organiques des sols est plus difficile à réaliser et à mesurer. Une solution souvent préconisée est d'éviter le travail du sol et d'éviter de laisser le sol nu. Le travail du sol, en cassant les agrégats du sol et en éliminant une partie de la faune du sol responsable de l'enfouissement et de l'incorporation des résidus de culture au sol, augmente la minéralisation des matières organiques. Le travail du sol limite ainsi le stockage de carbone dans les sols, voire accentue la diminution des teneurs en matière organique des sols cultivés. Si ce mécanisme existe bien, il est dépendant des conditions climatiques et du type de sol. On estime le stockage de carbone par l'adoption du non-labour ou semis direct à 150 kgC/ha/an en moyenne avec une gamme de variation très large (0 à 300 kgC/ha/an) <sup>[5]</sup>. La diminution des réserves organiques des sols cultivés observée en France et dans le monde est surtout expliquée par une absence d'apport organique au sol entre deux cultures, soit sous forme de résidus de culture en quantité suffisante, d'amendements organiques ou de cultures intercalaires.

Le stockage de carbone dans les sols cultivés est donc possible sur de grandes surfaces. Cependant celui-ci reste limité dans le temps lorsque les sols ont atteint un nouvel état d'équilibre après quelques décennies et il est réversible si son mode d'usage change pour une pratique non respectueuse du maintien des réserves organiques du sol.

du sol sur 30 cm en 18 ans (5 % sur 1 m de profondeur). Si le C contenu dans la biomasse aérienne des arbres est ajouté à celui du sol, le taux de stockage total du système agroforestier est de 1 110 kgC/ha/an. La ligne d'arbres qui ne représente que 16 % de la surface de la parcelle représente environ 50 % de ce stockage. Un réseau de parcelles agroforestières a été constitué par Agroroof, un bureau d'études spécialisé en Agroforesterie. Ce réseau de parcelles chez des agriculteurs comprend aussi des couples de parcelles agricoles sans arbre et avec lignes d'arbres intraparcellaires. La culture, souvent des céréales, est gérée exactement de la même façon entre les 2 parcelles, les itinéraires techniques sont identiques. Ces conditions sont indispensables à la quantification spécifique de l'apport des arbres au stockage de C par le système agroforestier. Les résultats sur les 5 premiers sites étudiés présentent des taux de stockage additionnels de l'ordre de 100 à 450 kgC/ha/an dans les 20 premiers centimètres du sol. Dans les systèmes agroforestiers récents, le stockage de carbone est mesuré principalement sur les 10 premiers centimètres de profondeur du sol et sur la ligne d'arbres. Le stockage est du même ordre de grandeur que celui mesuré pour des bandes enherbées, pour de l'enherbement des vignobles et vergers (Figure 3).

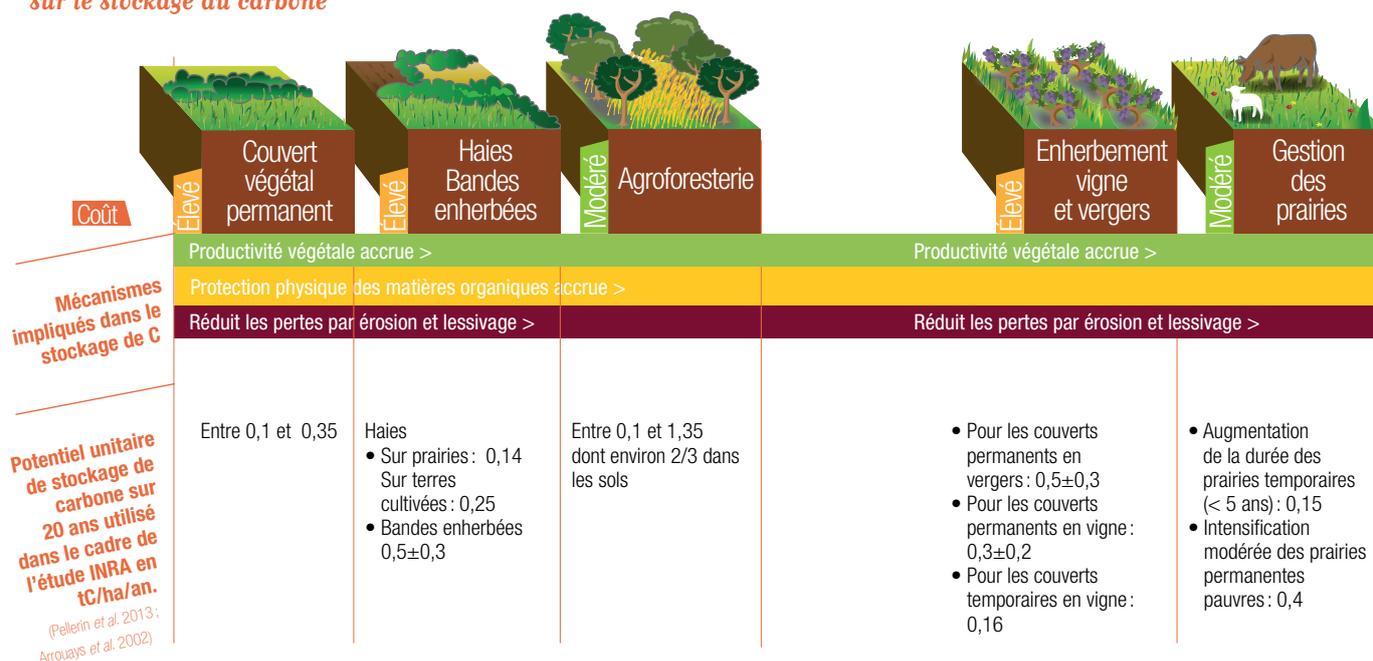
Pour faire un bilan complet des gaz à effet de serre des parcelles agricoles, nous ne pouvons pas nous restreindre aux émissions de CO<sub>2</sub>. Le secteur de l'agriculture et la forêt participent aussi aux émissions de méthane et de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) dans l'atmosphère. Sans entrer dans les détails de toutes ces émissions de gaz, l'utilisation de fertilisants minéraux azotés est responsable en grande partie des émissions de N<sub>2</sub>O. La présence d'arbres dans les parcelles agroforestières, diminue les surfaces agricoles fertilisées et donc les émissions de N<sub>2</sub>O à l'hectare de surfaces agricoles.

### Peut-on généraliser ces taux de stockage de C à l'échelle du territoire national ?

Plusieurs études évaluent et comparent les différentes pratiques agricoles dites séquestrantes en carbone dans les sols. Les taux de stockage de carbone à l'hectare en agroforesterie sont relativement élevés par rapport à ceux d'autres pratiques agricoles (Figure 3). En revanche, l'agroforesterie représente un important investissement matériel et humain pour la mise en place et l'entretien des arbres, et n'est souvent rentable économiquement qu'à long terme. L'adoption sur de grandes surfaces agricoles ne semble pas réaliste à court terme. Une étude récente de l'Inra<sup>[2]</sup> a

Figure 3 - Différents stockage de carbone dans les sols agricoles selon leur mode de gestion.

#### Estimation de l'impact des pratiques agricoles sur le stockage du carbone



estimé qu'environ 10 % des surfaces agricoles possiblement concernées pourrait être effectivement convertie en agroforesterie d'ici 2030. Sous cette hypothèse, et avec un taux moyen de stockage de C d'une tonne de C par hectare et par an, l'agroforesterie pourrait réduire les émissions nationales de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère de l'ordre de 2 millions de tonnes de C. Cela représente 8 % des émissions de CO<sub>2</sub> liées au secteur agricole ou 6 % des émissions de CO<sub>2</sub> liées au transport routier.

Les mécanismes de stockage de carbone dans les sols sont simples, mais la comptabilité carbone est compliquée à mettre en œuvre. Le choix des sites représentatifs étudiés, les mesures de terrain et les analyses de sol sont coûteux en main-d'œuvre, en temps et en argent. La quantification des stocks de C des sols et leurs évolutions dans le temps sont des sujets de recherche actuels, aussi bien pour mettre au point des moyens de mesure innovants que pour construire des calculateurs « Bilan de C » des stocks organiques suite aux modifications des usages des sols selon les milieux : Ex-Act mis au point et utilisé par la FAO ([www.fao.org/tc/exact/accueil-ex-act/fr/](http://www.fao.org/tc/exact/accueil-ex-act/fr/)) ou Climagri mis au point et utilisé par l'Ademe ([www.ademe.fr/climagri](http://www.ademe.fr/climagri)).



© R. Cardinael

Prélèvement de sol au cylindre pour mesurer la densité apparente de sols et ainsi calculer des stocks de carbone.

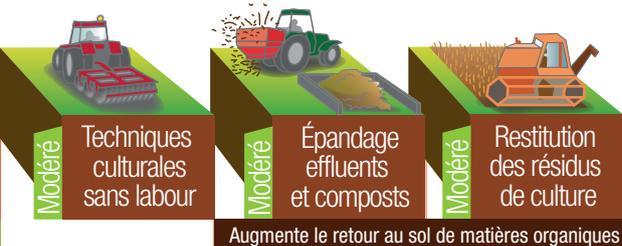


© R. Cardinael

Prélèvement de carottes de sol jusqu'à 2 mètres de profondeur grâce à une carotteuse motorisée.

**Remarques :**

- Une tonne de carbone stocké équivaut à environ 3,66 t de CO<sub>2</sub> captées.
- La surface agricole française représente 28,2 Mha.



**Minéralisation plus faible si le rapport C/N est élevé**

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Passage en semis direct, 0,15</li> <li>• Passage en labour quinquennal : 0,10</li> <li>• Travail du sol superficiel : pas de stockage de C additionnel</li> </ul>	Entre 10 et 50 % du carbone apporté selon le type d'apport.	0,15 pour 7 tonnes de paille
--	---	------------------------------

France métropolitaine

## Stockage de carbone et production agricole dans les systèmes agroforestiers

Si stocker du carbone est une priorité, l'ensemble des sols agricoles ne peut pas être convertis en forêt ou en prairie permanente, deux écosystèmes particulièrement performants en termes de stockage de carbone. L'agroforesterie intraparcellaire est un bon compromis entre limitation des émissions de gaz à effet de serre et production agricole puisque près de 80-85 % de la surface reste en céréales.

Au-delà d'être bénéfique au climat, stocker du carbone dans les sols agricoles améliore aussi leurs taux de matières organiques et donc leur fertilité. Les matières organiques du sol sont des éléments clés de la structure et de la cohésion du sol. Elles jouent un rôle important

contre la dégradation physique des sols, et donc contre les phénomènes de battance et d'érosion. Elles favorisent aussi la rétention et la biodisponibilité de l'eau et des nutriments pour les plantes et stimulent les activités biologiques du sol. Stocker du carbone dans les sols est donc à la fois bon pour l'environnement et la fertilité des sols. Des études scientifiques<sup>[3]</sup> montrent ainsi un lien positif entre pratiques agricoles séquestrantes de carbone dans les sols et rendement agricole sur le long terme dans les systèmes à bas intrants, c'est-à-dire peu fertilisés.

De grandes variations existent cependant entre les différents milieux. Cette augmentation de rendement observée en milieu tropical où les niveaux d'intrants sont faibles est plus discutable en milieu tempéré où l'agriculture a recours à des fertilisants. Une baisse de rendement de la culture en céréales en milieu tempéré est parfois observée après la plantation des arbres, essentiellement due à la diminution de la surface consacrée à la culture tout simplement. L'impact de la présence des arbres dans les parcelles de céréales dépend cependant de plusieurs facteurs, par exemple de la densité et l'orientation des arbres pour l'ensoleillement et de l'enracinement plus ou moins compétitif pour l'approvisionnement en eau de la culture. L'ombrage des arbres peut aussi protéger les céréales de l'échaudage thermique et être une forme d'adaptation de l'agriculture aux changements climatiques. Le manque de données ne permet pas encore de conclure et d'avoir une vision sur le long terme de l'évolution des rendements en présence des arbres.

## Conclusion

Les systèmes agroforestiers permettent de concilier à la fois production alimentaire et atténuation du changement climatique par un stockage de C important dans la biomasse ligneuse des arbres et dans les matières organiques du sol. Ce type d'agrosystème fait partie de l'ensemble des pratiques agricoles que l'on qualifie parfois de « climato-intelligente » ou en anglais de « *Climate Smart Agriculture* ». Une agriculture capable de s'adapter aux changements climatiques, capable d'atténuer les changements climatiques et bien sûr toujours capable de production alimentaire. ■

> Ademe, 2014. Carbone organique des sols. L'énergie de l'agro-écologie, une solution pour le climat. Téléchargeable [http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/7886\\_sol-carbone-2p-bd.pdf](http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/7886_sol-carbone-2p-bd.pdf)

> Bernoux M. et Chevallier T., 2013. Le carbone dans les sols des zones sèches. Une multifonctionnalité indispensable. Dossier thématiques du CSFD (Comité Scientifique Français de la Désertification). N°10.

Téléchargeable <http://www.csf-desertification.org/dossier/item/dossier-carbone-sols-zones-seches>

## Bibliographie

[1] GIEC, 2013. Climate change 2013 - The physical science basis.

Téléchargeable [https://www.ipcc.ch/home\\_languages\\_main\\_french.shtml](https://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml)

[2] Pellerin S. et al., 2013. *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques*. INRA, Paris.

[3] Branca G., Mc Carthy N., Lipper L., Jolejole MC., 2011. *Climate Smart Agriculture: A synthesis of empirical evidence of food security and mitigation benefits from improved cropland management*. FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome

[4] Calvet R., Chenu C., Houot S., 2011. *Les matières organiques des sols: Rôles agronomiques et environnementaux*. Paris, FRA : Éditions France Agricole, 347 p.

[5] Chenu C., Klumpp K., Bispo A., Angers D., Colnenne C., Metay A., 2014. *Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France*. *Innovations Agronomiques* 37 (2014), 23-37. Téléchargeable <http://www6.inra.fr/ciag/Revue/Volumes-publies-en-2014/Volume-37-Juillet-2014>

[6] Rapport sur l'état des sols de France publié par le GIS Sol, des cartes sur les taux de carbone dans les sols en France sont téléchargeables sur : <http://www.gissol.fr/thematiques/matieres-organiques-des-sols-42>

## Résumé

Les systèmes agroforestiers, associant arbres et cultures annuelles, permettent, tout en conservant leur fonction de production alimentaire, de stocker du carbone dans la biomasse ligneuse des arbres et aussi dans les matières organiques du sol, de l'ordre d'une tonne de carbone par hectare et par an. Ce système culturel stocke du carbone atmosphérique de façon efficace et durable, il contribue ainsi à atténuer l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique.

**Mots-clés :** agroforesterie, sol, carbone, matières organiques, climat.

## En 2015, les sessions de formation "gestionnaires" de Pro Silva France ont fait le plein.

Pour 2016, le programme n'est pas moins riche, avec neuf sessions d'ores et déjà programmées partout en France.

► Tous les programmes sont disponibles sur le site internet de Pro Silva France, onglet « Agenda », rubrique « Autres manifestations »

[http://www.prosilva.fr/brochures/brochure\\_Carte\\_formation\\_PSF\\_2016\\_Interactive.pdf](http://www.prosilva.fr/brochures/brochure_Carte_formation_PSF_2016_Interactive.pdf)

Rappel : les formations peuvent être prises en charge dans le cadre de la formation professionnelle.

Renseignez-vous auprès du CEFA de Montélimar ou de Pro Silva France, auprès de Nicolas LUIGI, PRO SILVA FRANCE - Domaine St Pierre - 981 Route de Volx - 04100 Manosque - Port. : 06 71 90 16 00  
[nicolas.luigi@prosilva.fr](mailto:nicolas.luigi@prosilva.fr)