

L'Agroforesterie

Outil de Séquestration du Carbone en Agriculture



Décembre 2009

Réalisation :

Xavier Hamon – Agroof

Christian Dupraz – INRA de Montpellier

Fabien Liagre – Agroof



1 CONTEXTE ET ENJEUX CLIMATIQUES

Le changement climatique défraye tous les jours la chronique en ce mois de décembre à l'occasion de la conférence internationale de Copenhague. Un réchauffement climatique de l'ordre de 2°C d'ici 2100 est désormais inévitable. La sonnette d'alarme a été tirée, mais les mesures et les objectifs de réduction des gaz à effet de serre (moins 20% d'ici 2020) sont restés bien en deçà des préconisations de la communauté scientifique ([Lepage 2009](#), [Monbiot 2009](#)). L'urgence est de mettre en place le plus rapidement possible des mesures effectives et économiquement viables de réduction de Gaz à Effet de Serre (GES) et de Captage et Stockage de Carbone (CSC) pour éviter un réchauffement de 4°C ou plus.

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a estimé que les émissions mondiales de gaz à effet de serre anthropiques dépassent les 50 Gt équivalent CO₂ par an. L'agriculture produit 13.5 % du total des émissions de GES; l'industrie, 19,4 % ; l'approvisionnement énergétique restant le premier poste d'émissions de GES avec 25,9 % du total des émissions ([GIEC 2007](#)).

La teneur en carbone totale des écosystèmes forestiers s'élèvent à 638 milliards de tonnes, dont la moitié (321 milliards de tonnes) en biomasse forestière et en bois mort, soit une quantité supérieure à la quantité de carbone actuellement présente dans l'atmosphère. Le déboisement et la dégradation du couvert forestier sont les principales sources d'émissions de carbone provenant du secteur forestier et produisent 17.4 % des émissions mondiales de GES ([Nation Unies 2009](#)).

En France, les émissions annuelles de CO₂ en 2007 sont chiffrées à 531 Mt éq. CO₂ ([MEED 2007](#)¹), dont 20 % pour l'agriculture et la sylviculture (secteurs confondus). Selon cet inventaire, le secteur agricole affiche globalement une tendance à la diminution depuis 1990. Cette baisse serait due à la diminution des quantités d'engrais utilisées alors que les autres postes restent stables. Si, le niveau de 2007 est de 11 % inférieur au niveau de 1990, la contribution de ce secteur aux réductions totales des émissions de GES pourrait néanmoins être mieux mise à profit.

Sur le territoire français, les estimations du stock de carbone organique sont de l'ordre de 3.1 milliards² de tonnes. La capacité de stockage potentiel serait de 1 à 3 millions t C/an sur une période de 20 ans ce qui représenterait 1 à 2 % des émissions françaises ([Arrouays 2002](#)). Les compartiments de la biosphère susceptible de stocker du carbone à ce rythme sont le bois et les matières organiques des sols ([Balesdent et al. 2005](#)).

L'occupation et la gestion des sols sont directement liées à la capacité de ceux-ci à pouvoir emmagasiner du carbone, soit temporairement dans la biomasse, soit plus durablement dans les sols. Les forêts, les plantations et les arbres champêtres, sont ainsi des puits potentiels de carbone. En agroforesterie, les arbres se distinguent par 2 aspects :

1. Leur enracinement est plus profond. En effet, du fait de l'environnement cultivé et de son relatif isolement, les racines des arbres agroforestiers descendent plus profondément dans les couches du sol que celles des arbres forestiers ([Mulia and Dupraz 2006](#)).

² Pour l'ensemble du territoire DOM-TOM, et pour la couche de sol 0-30 cm

2. Les arbres agroforestiers poussent plus vite et produisent plus de biomasse. Les arbres agroforestiers sont des arbres de pleine lumière et bénéficient d'un environnement qu'il leur est favorable (fertilisation de la culture, faible concurrence entre eux, travail du sol) (Dupraz and Liagre 2008). A âge égal, ils produisent ainsi 3 fois plus de biomasse par arbre (Gavaland and Burnel 2005).



Figure 1 : Parcelle agroforestière mis en place durant le premier programme CASDAR Agroforesterie 2006-2008 (Midi Pyrénées). *Crédit photo : R. Sauvaire*

De ce fait les systèmes agroforestiers, outre leurs bénéfices environnementaux et productifs, représentent un outil intégré pour la séquestration de carbone en agriculture. L'accueil et l'intérêt que portent les agriculteurs et les collectivités locales à l'agroforesterie suggèrent que l'adoption de ce type de systèmes, en termes de surface en France et en Europe, pourrait représenter un moyen intéressant pour atteindre les objectifs de réduction d'émissions de GES pris par les Etats membres. D'autant plus que le carbone séquestré par les systèmes agroforestiers pourrait être acheté et échangé sur le marché européen du carbone.

Ce document présente :

- (i) les mécanismes du marché du carbone européen et dans quelle mesure les quantités de carbone séquestrées par les systèmes agroforestiers pourraient y être intégrées
- (ii) le potentiel de séquestration des systèmes agroforestiers en milieu tropical et tempéré
- (iii) une évaluation prospective en termes de surfaces et de quantités de carbone en France et la contribution de l'agroforesterie aux efforts de réductions d'émissions de GES

2 DE KYOTO (1997) A COPENHAGUE (2009)

Selon deux articles du protocole de Kyoto de 1997, dans la réalisation de leurs engagements quantitatifs de réduction d'émissions (QELRC), les pays de l'Annexe I (pays industrialisés) peuvent prendre en compte les puits biosphériques de carbone créés par l'Utilisation des Terres, ses Changements et les Forêts (UTCF), Land Use, Land Use Change and Forestry, (*LULUCF en anglais*).

Le Protocole de Kyoto autorise les pays signataires à décompter de leurs émissions de gaz à effet de serre la séquestration de GES induite par des "activités supplémentaires". Ces activités visent principalement le piégeage de carbone dans la biomasse et dans les sols. Cela concerne d'une part les opérations de boisement (*Article 3.3 du Protocole*) ; le secteur agricole et la gestion forestière d'autre part (*Article 3.4 du Protocole*³) qui sont définies dans le LULUCF des accords de Marrakesh.

Depuis la rédaction du Protocole de Kyoto, les négociations se poursuivent, dans le cadre des Conférences des parties (CoP) annuelles. Elles sont alimentées par des travaux scientifiques (recherches et expertises), menés par un groupe international d'experts, le GIEC, qui a notamment rendu en 2000 un rapport sur les activités "LULUCF".

Alors que l'agroforesterie en milieu tropical (éligibles pour les pays hors Annexe 1) fait partie de cette liste d'activités anthropiques additionnelles, avec un potentiel net de séquestration élevé de 586 Mt C/an si 30% des 630 millions d'hectares ciblés étaient convertis, l'agroforesterie dans les pays de l'Annexe 1 ne font l'objet d'aucune estimation (*IPCC 2000*), suggérant que l'agroforesterie « tempérée » n'est pas une pratique suffisamment documentée pour être comptabilisée au sein de cette liste. Dès lors, l'agroforesterie tempérée n'est pas « lisible » dans le champ des activités additionnelles ayant un potentiel de séquestration.

Depuis, la recherche et développement en agroforesterie tempérée a progressé et ce document de travail fait état des dernières données disponibles quant au potentiel de séquestration de carbone des systèmes agroforestiers et de l'importance de ces pratiques dans les engagements de réduction des émissions de GES de la France.

La conférence internationale de Copenhague de décembre 2009 devant aboutir à un nouveau traité post-Kyoto, doit fixer des objectifs chiffrés sur la réduction des émissions, mais il reviendra aux Etats de choisir quels outils sont éligibles pour atteindre ces objectifs.

Comment alors, un projet agroforestier pourrait faire valoir sa contribution à l'atténuation du changement climatique ?

³ Ne sont déductibles au titre des articles 3.3 et 3.4 que les stockages additionnels "intentionnels", c'est-à-dire résultant d'une action volontaire (ce qui exclut par exemple le stockage de C lié au boisement spontané de zones agricoles abandonnées), engagée après 1990 (année de référence par rapport à laquelle ont été définis les objectifs de réduction d'émissions).

Le Protocole de Kyoto prévoit des engagements de réductions pour certains pays (les pays de l'Annexe I) et des mécanismes de flexibilité (Figure 2). Chaque pays de l'Annexe I ayant ratifié le Protocole reçoit une allocation initiale de permis d'émissions⁴ (ou droits à émettre) correspondant à son engagement de réduction. Les permis sont détenus par les gouvernements des pays du Nord qui peuvent se les échanger. Ce système est dit "cap-and-trade", c'est à dire un système où l'on fixe un objectif de réduction d'émissions avec possibilité d'échanger des permis.

Deux mécanismes de flexibilité font intervenir des projets, il s'agit de la Mise en Oeuvre Conjointe (MOC) ou *Joint Implementation (JI en anglais)* et du Mécanisme pour un Développement Propre (MDP) ou *Clean Development Mechanism (CDM en anglais)*. Dans le cadre de ces mécanismes, des projets génèrent des crédits proportionnellement à leur contribution à l'atténuation du changement climatique et peuvent les vendre à des pays de l'Annexe I.

En Europe, le Système Communautaire d'Echange de Quotas d'Emission de gaz à effet de serre (SCEQE) ou *European Union Emissions Trading Scheme (EU ETS en anglais)* est la mise en application au niveau de l'Union européenne (directive 2003/87/CE) d'un marché du carbone (marché d'engagement) prévu dans le cadre du protocole de Kyoto. Il concerne environ 12.000 sites industriels émetteurs de gaz à effet de serre en Europe. Une entreprise qui ne respectera pas ses engagements se verra attribuée une pénalité de 100 € (à partir de 2008) par tonne de CO₂ émise en plus de son quota.

Le marché européen est connecté au marché MDP. Selon la directive "projets" (directive 2004/101/EC), les entreprises européennes peuvent également avoir recours à des crédits issus de projets MDP ou MOC en plus des quotas internes à l'Europe.

Le marché a été organisé en phases. La période 2005-2007 a été la phase pilote de test. La seconde période couvre 2008-2012. Au début de chaque phase, chaque État-Membre élabore un Plan National d'Allocation des Quotas (PNAQ) qui doit être approuvé par la Commission Européenne.

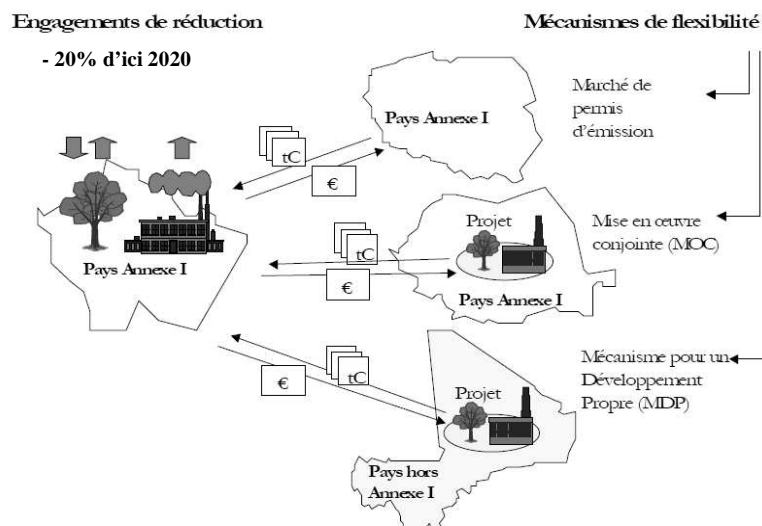


Figure 2: Représentation simplifiée du Protocole de Kyoto. Source : Gardette et Locatelli 2007

⁴ Dans le marché européen, les entreprises disposent de quotas échangeables appelés des Quotas Européens d'Emissions (QEE ou *European Union Allowances EUA*)

Extrait du rapport de l'ONF (2007) – Les marchés du carbone forestier

Les systèmes de marchés de permis ou quotas d'émission ont montré leur efficacité économique pour résoudre des problèmes environnementaux, comme dans le cas des émissions de soufre aux Etats-Unis ([Winebrake et al. 1995](#)). Un objectif d'émission totale est fixé et les acteurs réduisent leurs émissions en fonction de leurs coûts de réduction et de la valeur du permis d'émission.

Par exemple, supposons qu'un acteur émet 101 t eq. CO₂ au lieu de son objectif de 100 t CO₂ et que son coût marginal de réduction est de 20 €/tCO₂. Si le permis d'émission vaut 16 €, l'acteur économisera 4 € en achetant un permis plutôt qu'en réduisant ses émissions. Si un autre acteur présente un coût de réduction plus faible, par exemple 10 €/t eq. CO₂, il pourra réduire d'une tonne supplémentaire, même s'il a déjà atteint son objectif, pour vendre un permis et gagner 6 €.

L'avantage est que tous les acteurs vont réduire jusqu'à atteindre le même coût marginal égal au prix du permis sur le marché. Le problème des marchés de droits est que seule la quantité totale d'émissions est connue à l'avance, à la différence du prix des permis et des coûts de réduction ([Baumol & Oates 1975](#)).

Au delà de l'échange de permis il est possible d'effectuer des transactions entre un projet et une entité désireuse de compenser ses émissions. Le projet peut être de réduction d'émissions (projet énergétique ou industriel) ou d'absorption (projet forestier).

Deux mécanismes de flexibilité du Protocole de Kyoto, le MDP et la MOC, impliquent des projets et permettent des transactions de crédits, appelés les Unités de Réduction des Emissions (URE) ou Emission Reduction Units (*ERU en anglais*) pour la MOC et les Unités de Réduction Certifiée des Emissions (URCE) ou Certified Emission Reductions (*CER en anglais*) pour le MDP.

Les deux types de transactions, marchés de permis et transactions avec des projets, présentent des risques différents. Dans le cas d'un marché de permis, l'échange est simple et peu risqué car le bien à échanger existe avant la transaction. Au contraire, dans le cas d'un projet, la délivrance du crédit dépend de la mise en oeuvre du projet, de son additionnalité et de son acceptation aux différentes étapes du cycle de projet. Par conséquent, les risques de non création du crédit (non performance du projet, non validation des crédits, risques institutionnels) viennent s'ajouter aux autres risques de non livraison du crédit ([Lecocq, 2006](#)).

Pour atteindre son quota, une entreprise européenne peut comptabiliser des permis échangés sur le marché européen ou des crédits de projets MDP et MOC.

Mais ce lien est-il valable pour les projets agroforestiers ? Une entreprise européenne peut-elle comptabiliser des crédits de projets agroforestiers sur son territoire ou dans un autre pays de l'Annexe I (Mise en Œuvre Conjointe) ou encore dans un pays hors Annexe I dans le cadre du Mécanisme pour le Développement Propre ?

Si ce lien est valable, quelles sont les modalités du cycle du projet ? Terres éligibles, niveau de référence, évaluation des surfaces...

Mais il nous faut avant tout éclaircir une question cruciale. Combien de tonnes équivalent CO₂ (t eqCO₂) un hectare agroforestier peut-il absorber ?

SEQUESTRATION DE CARBONE DES SYSTEMES AGROFORESTIERS EN MILIEU TROPICAL

L'agroforesterie, association des arbres aux cultures ou aux pâturages, peut représenter une alternative durable au déboisement et à la culture itinérante, système de culture encore très répandu sous les tropiques. L'agroforesterie est reconnue comme une activité capable de séquestrer du carbone par l'UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) dans le cadre des mesures de reforestation et de plantation. Ce plus grand potentiel de fixation vient d'une meilleure efficacité de capture et d'utilisation des ressources, comparée à des systèmes en monoculture.

Le potentiel de séquestration du carbone des systèmes agroforestiers est largement étudié sous les tropiques. On compte plus de 266 articles, majoritairement parus dans les 15 dernières années, sous les mots clés « agroforesterie » et « séquestration de carbone » (Nair et al. 2009_b). Même si des estimations sont disponibles, le manque de rigueur scientifique et le nombre de facteurs influençant ces estimations (conditions agroécologiques, facteurs locaux, pratiques de gestion), nous forcent à rester prudent et à ne pas généraliser.

Les estimations disponibles concernant la séquestration du carbone sont calculées en combinant la moyenne du stock aérien sur une période de temps déterminée et le stock du carbone dans le sol. Nair et al. 2009_b, suggèrent des valeurs de séquestration de carbone dans le compartiment du sol⁵ sont de l'ordre de 5 à 10 KgC/ha (sur une période de 25 ans) dans les parcs agroforestiers extensifs des régions arides et semi-arides et entre 100 et 250 KgC/ha (sur une période de 10 ans) dans les systèmes agroforestiers multi-étagés des tropiques humides.

On estime à environ 1 milliards d'hectares les surfaces en agroforesterie dans le monde (Nair et al. 2009_a). Mais le potentiel de développement est élevé si l'on considère les terres en friches ou dégradées.

D'après le rapport du GIECC (IPCC 2000), si on convertit 30% de la superficie potentiellement convertible en agroforesterie dans les pays hors Annexe I (soit 630 millions d'hectares au total), d'ici 2040, cela engendrerait un potentiel net de séquestration de carbone de 586 millions de tC/an soit environ 17.5 Gt de C pour la période 2010 – 2040.

Oelbermann et al (2004) indiquent également que le potentiel de stockage de carbone par conversion de parcelles agricoles en parcelles agroforestières est très élevé à l'échelle mondiale : ils estiment que les systèmes agroforestiers pourraient stocker dans leur biomasse aérienne 2,1 Gt C/an en zone tropicale et 1,9 Gt C/an en zone tempérée.

SEQUESTRATION DE CARBONE PAR LES SYSTEMES AGROFORESTIERS TEMPERES

On distinguera d'une part la fonction de **fixation** de carbone (photosynthèse) et la fonction de **stockage** de carbone (création d'un stock de carbone dans le temps).

Shroeder (1994) suggère que la valeur médiane pour le taux de stockage de carbone dans la biomasse aérienne est de presque 4 tC/ha/an en zone tempérée sur un période de 30 ans. Cependant, l'article montre le peu d'études consacrées à ce sujet (n=4) jusque dans les

⁵ Potentiel de séquestration de carbone jusqu'à 1 m de profondeur

années 1990, et le manque de précision quant aux espèces d'arbres et aux densités mises en jeu.

La recherche en agroforesterie tempérée sur la thématique de la séquestration du carbone provient essentiellement de la France, du Canada et des Etats-Unis. Ces derniers sont notamment en avance au niveau des estimations de surface et des estimations de potentiel de stockage (**Tableau 1**).

Pratique agroforestière	Surface estimée (en millions d'hectares) ⁶	⁷ Potentiel de Stockage Carbone (en Mt C). Somme des compartiments aériens et souterrains.
Alignements d'arbres et cultures intercalaires	80	73,8
Silvopastoralisme	70	9,0
Haie brise vent	85 ⁸	4,0
Haie ripisylve	800 000 km de 30 m de large	1.5
Taillis à courte rotation (TCR) et autres pratiques forestières sur les exploitations	2 400 000 km de zones tampons boisées (TCR inclus)	2.0
TOTAL		90.3

Tableau 1: Estimations du stockage potentiel de carbone grâce aux pratiques agroforestières aux USA d'ici 2025. Adapté de Montagnini and Nair 2004.

La définition anglo-saxonne de l'agroforesterie étant plus large que celle que nous avons développée en France, les haies (brise vent, ripisylve) et même les taillis à courte rotation se retrouve sous la bannière de l'agroforesterie. Nous nous focaliserons par la suite uniquement sur les systèmes agroforestiers suivants : **alignements d'arbres et de cultures intercalaires et le silvopastoralisme.**

Zoom sur ...

Les Haies Champêtres et le Bocage

Les équipes de l'INRA ont travaillé sur le carbone organique des sols dans le réseau de bocage français (Baudry et al. 2000, Walter et al. 2003). Ces travaux ont été repris par l'Expertise Scientifique Collective qui suggère des estimations de flux annuels nets (pour un scénario à 20 ans) de 0.1 tC/ha/an pour 100mL de haie par hectare (Arrouays et al. 2002).

Ces stocks additionnels sont principalement localisés autour de la haie grâce un horizon superficiel préservé et enrichi par la litière aérienne de l'arbre (feuillage, bois) (Follain et al. 2007). Même si le rôle des haies et du réseau bocager dans le stockage de carbone est avéré, les données et la connaissance sur le fonctionnement de la dynamique du carbone du sol manquent cruellement, si l'on veut pouvoir proposer des estimations fiables pour des politiques environnementales qui viendraient s'inscrire dans la réduction de nos émissions de GES.

Aux Etats-Unis, le United States Department of Agriculture (USDA) estime que si l'on protégeait les 85 millions d'hectares cultivés du centre nord des Etats-Unis, en bordant 5% de cette surface avec des haies, on pourrait stocker 58 millions de tC en 20 ans soit 2.9 millions tC/an (USDA National Agroforestry Center Ressources⁹).

⁶ Surface actuellement ou potentiellement converties

⁷ La période de temps sur laquelle ces estimations seront pertinentes dépend de la rapidité d'adoption de ces pratiques. En supposant leur adoption d'ici 2010, les estimations de séquestration seraient vérifiées d'ici 2025.

⁸ Surface cultivée exposée, dont 5 % à planter en haies brise-vent

⁹ Consultable en ligne : www.unl.edu/nac

5.1 EXPERIENCES AU CANADA ET AUX ETATS UNIS

Thevathasan (2004) rapporte que des peupliers agroforestiers (111 arbres/ha), sur des sols limono-sableux de la station expérimentale de Guelph (Ontario, Canada) ont stocké 39 tC/ha sur une période de 13 ans dont 25tC stockés dans le sol (litière et turn over racinaire). Si l'on compte le re-largage de carbone à travers la minéralisation microbienne, le potentiel de stockage net pour les peupliers de cette station est de 1.65 tC/ha/an. Les auteurs ont montré que la parcelle agroforestière produit 4 fois plus de litières que le témoin sans arbres.

Le potentiel de conversion de terres cultivées en agroforesterie au Canada a été estimé à 45,5 millions hectares. Si la fixation de carbone est au minimum de 200 Kg/ha/an sur cette superficie, alors l'objectif de réduction de 20% des GES pourrait être atteint uniquement grâce à l'agroforesterie d'ici 10 à 15 ans.

Sur le même site, Peichl et al (2006) ont calculé in situ les pools (biomasse aérienne et racinaire + sol) et les flux (respiration, lessivage) de carbone dans la même plantation de peupliers âgée, et rapportent un flux net de fixation de + 13.2 tC/ha/an pour l'association peupliers-orge, + 1.1 tC/ha/an pour l'association épicéa-orge comparé à un flux négatif de - 2.9 tC/ha/an pour l'orge en culture pure.

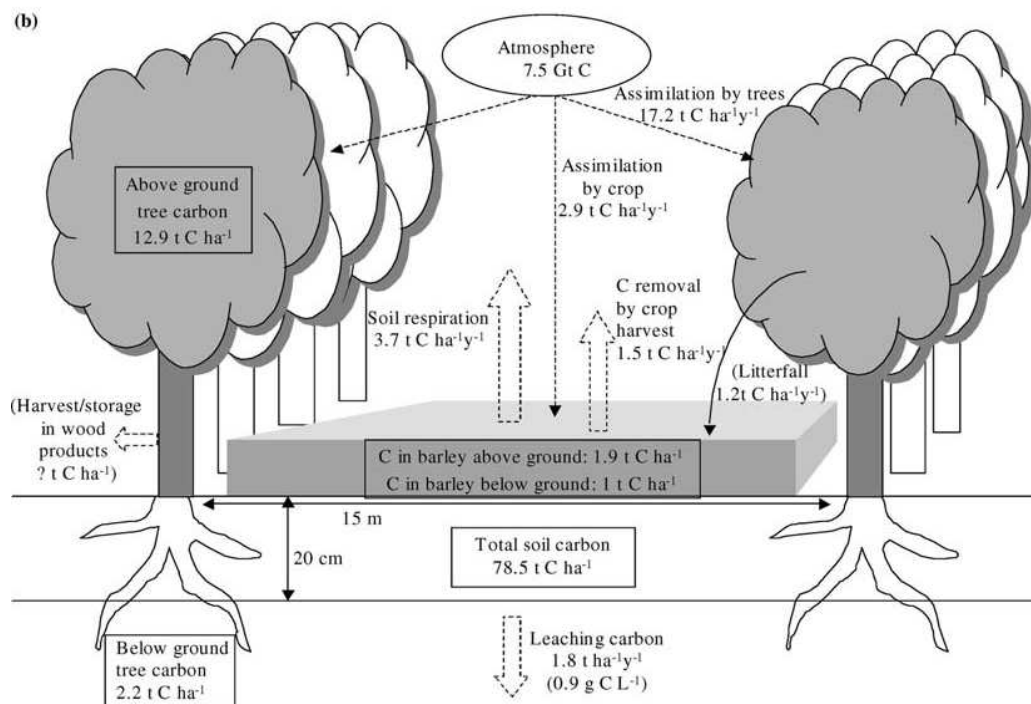


Figure 3 : Modèle de tous les pools et flux de carbone dans une parcelle agroforestière de peuplier âgée de 13 ans – Station expérimentale de Guelph, Ontario (Canada). Source : Peichl et al. 2006

Zoom sur ...**Le silvopastoralisme : des arbres dans les prairies**

En système silvopastoral au Canada, dans des parcelles de peupliers hybrides (*Populus* sp.) à 111 arbres/ha, le potentiel net de stockage de carbone est de l'ordre de 2.7 tC/ha/an alors qu'il est de moins d'1 tC/ha/an dans une prairie sans arbres (Gordon et al. 2005).

Sharrow and Ismail (2004) rapporte également un flux potentiel de stockage de carbone plus élevé en système agroforestier, de l'ordre de 1.11 tC/ha/an, pour une prairie de ray grass et de trèfle complantée avec des Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) de 11 ans. Les travaux de Haile et al. (2008) montrent que, comparées à une prairie sans arbres, les parcelles silvopastorales contiennent plus de carbone dans les couches profondes du sol dans des conditions écologiques équivalentes. Ceci serait imputé au fait que la décomposition des racines mortes des arbres est une source importante de carbone organique dans le sol.

On retiendra qu'une estimation raisonnable du stockage potentiel des prairies agroforestières, pour des densités de 100 arbres/ha est de l'ordre de **2 tC/ha/an**.

5.2 Expérience en France (INRA)

- Parcelle de peupliers (13 ans)

Presque sous les mêmes latitudes mais en climat méditerranéen, les peupliers agroforestiers de la station expérimentale de Vézénobres ont stocké en 13 ans environ 540 Kg C/arbre, dans le tronc et les branches (Dupraz comm. pers.). Les estimations du stockage de carbone dans les racines des peupliers de Vézénobres sont de l'ordre de 60 Kg C/arbre.



Figure 4 : Excavation et mesure de la biomasse racinaire des peupliers de la station INRA à Vézénobres (Gard). *Crédit photo : N. Girardin*

Les 140 peupliers de la parcelle agroforestière de Vézénobres sont donc capables de stocker 85 tC en 13 ans dans leur biomasse ligneuse aérienne et souterraine. L'évaluation du stock de carbone dans le sol

dans la parcelle agroforestière de Vézénobres n'a pas donné de résultats exploitables étant donné le décapage de la couche étudiée (0-30 cm) après une forte inondation en 2002. Des estimations du stock de carbone organique pour l'horizon 0-20 cm seraient d'environ 100 t C/ha (CASDAR 2008¹⁰) et ne seraient a priori pas différentes du stock de carbone en témoin agricole sans arbre laissant supposer une faible, voire inexistante, séquestration du carbone dans le sol sur terrain sableux en climat méditerranéen. Le potentiel de stockage de carbone dans la composante arborée serait donc de **6,5 t C/ha/an** pour une parcelle agroforestière (140 peupliers/ha) sur sols limono-sableux en climat méditerranéen.

¹⁰ Disponible en ligne à l'adresse : <http://agroforesterie.fr/CASDAR/20062008/casdar0608.html>

- Parcelle de noyers noirs (30 ans)



Figure 5 : Parcelle agroforestière de noyers et merisiers de 30 ans (Charente Maritime). *Crédit photo : F. Liagre*

Dans d'autres situations, des noyers noirs (*Juglans nigra*) sur sols de grois superficiels en climat océanique, ont montré une capacité de stockage estimée à 190 Kg C/arbre en 30 ans (CASDAR 2008) dans la partie aérienne et d'environ 100 Kg C/arbre dans les racines de structure (Gavaland et Burnel 2005 ; Gavaland. Comm.pers.) ce qui représente un potentiel de stockage de carbone dans la composante arborée de 20.3 tC/ha sur une période de 30 ans.

A cela s'ajoute le carbone stocké dans le sol à travers le turn-over des racines fines des arbres. Ce stock a été estimé en faisant la différence entre le stock actuel en témoin agroforestier et en témoin agricole sans arbres. La différence de valeurs en termes de C organique donne environ 20 tC/ha entre les 2 témoins.

Néanmoins, cette différence correspond à une atténuation du déstockage de carbone lors d'un défrichage et non d'une accumulation de carbone. La cinétique de stockage du carbone étant 2 fois moins rapide que celle de déstockage durant les 20 premières années (Arrouays 2002), on estime à 10 t C/ha le stock de carbone additionnel dans le compartiment du sol agroforestier, ramenant le potentiel total de la parcelle à 30.3 t C/ha en 30 ans soit une stockage potentiel de **1 t C/ha/an** pour une plantation de noyers noirs (70 arbres/ha) sur sols argilo-calcaires superficiels en climat océanique.

- Parcelle de noyers hybrides (10 ans)

Les noyers hybrides de la station de Restinclières (*Juglans regia x nigra* / 80 arbre/ha) sont associés à des cultures céréalières depuis maintenant 14 ans. L'INRA de Montpellier (UMR System) a développé un modèle (HisAFé) de partage des ressources pour comprendre les interactions arbres-cultures en parcelle agroforestière. Ce modèle nous permet aujourd'hui d'estimer la fixation annuelle moyenne des noyers à 3 tC/ha/an (sur 40 ans) conduisant à un stock final de C dans les parties ligneuses de 120 tC/ha (Dupraz comm.pers). Les travaux sur l'évaluation des variations de la teneur en C du sol sont en cours et se situent



Figure 6 : Mesure de la biomasse aérienne des noyers hybrides de la station INRA de Restinclières (Hérault). *Crédit photo : C. Dupraz*

dans la fourchette de 4 à 20 tC/ha sur 40 ans, soit 0.1 à 0.5 tC/ha/an stockés dans le sol. Le stockage potentiel cumulé (biomasse de l'arbres et carbone du sol) serait compris entre **3 et 3.5 tC/ha/an** pour des parcelles de 80 noyers hybrides par hectare.

On retiendra donc qu'une estimation raisonnable du potentiel de stockage d'une parcelle agroforestière moyenne est égale à la moitié du stock final – compte tenu de la dynamique d'accumulation – ce qui correspondrait à un stock de 60 TC/ha sur 40 ans pour les noyers hybrides (feuillus à croissance rapide) de Restinclières.

Type d'arbres	Durée de la rotation	Densité d'arbres	Potentiel de stockage (tC/ha/an)	Stockage moyen sur la durée de la rotation (tC/ha)	Stockage final (tC/ha)
Croissance lente	50 ans	50 arbres /ha	1.5	37.5	75
Croissance lente	50 ans	100 arbres/ha	3	75	150
Croissance rapide	15 ans	50 arbres/ha	2	15	30
Croissance rapide	15 ans	100 arbres/ha	4	30	60

Tableau 2 : Potentiel de stockage des principaux systèmes agroforestiers en fonction du type d'arbres et de la densité.

La création d'une parcelle agroforestière conduit à stocker annuellement entre 1.5 et 4 tC/ha pour des densités comprises entre 50 et 100 arbres/ha soit en moyenne 2 fois plus qu'un hectare forestier moyen, estimé à 1 tC/ha/an (Chevassus au Louis 2009) et entre 5 et 10 fois plus que les Techniques Culturelles Simplifiées (0.3 tC/ha/an) (TCS 2009).

La conversion des terres arables ou des prairies en agroforesterie représente donc, sur une unité de surface, un potentiel de stockage intéressant sur le long terme. D'autant plus que les parcelles agroforestières, contrairement aux forêts, partent d'un stock initial nul ...

A l'échelle nationale et européenne, quelle contribution l'agroforesterie pourrait-elle avoir dans les objectifs de réduction des GES de 2020 et 2050 ?

ESTIMATIONS DES SURFACES CONVERTIBLES & CONTRIBUTION AUX EFFORTS DE REDUCTION DES EMISSIONS DE CO₂

La mise en place et la réussite de parcelles agroforestières ne sont pas possibles dans n'importe quelles conditions écologiques et pédoclimatiques. Reisner et al. (2007), à la suite du programme de recherche européen SAFE¹¹ (Silvorable Agroforestry For Europe) ont croisé différents jeux de données : type de sol, climat, topographie, occupation du sol ; à travers un système d'information géographique (SIG) pour identifier des régions cibles où les arbres agroforestiers¹² seraient productifs et pourraient réduire certains risques environnementaux tels que l'érosion des sols, le lessivage des nitrates ou encore la perte de diversité paysagère.

Au total, les surfaces pouvant potentiellement être converties en agroforesterie représente 652 185 km² soit environ **40% des terres arables d'Europe**. Cette estimation pourrait être revue à la hausse si on élargissait la liste des essences agroforestières.

Ce recoupement d'informations géographiques pourrait être une étude pertinente à mener en France. Cependant, si nous nous basons sur les statistiques des surfaces agricoles en France nous pouvons établir les premières estimations nationales.

La France et l'UE se sont engagées à réduire d'au minimum 20% les émissions de GES d'ici 2020 sur la base des émissions de GES de 1990. En 1990 ces émissions étaient de **564 millions de tonnes équivalents CO₂** (MEED 2007). L'objectif est donc d'arriver au seuil de 451 millions teq CO₂ en 2020 (soit une réduction de 113 Mteq CO₂ en 10 ans). Dans le cas d'une réduction de 50 % à l'horizon 2050 les émissions françaises des GES représenteraient alors 282 Mteq CO₂ (soit une réduction de 282 Mteq CO₂ en 30 ans). En 2007, les émissions de GES des secteurs agricole et forestier confondus représentaient environ 20% des émissions françaises.

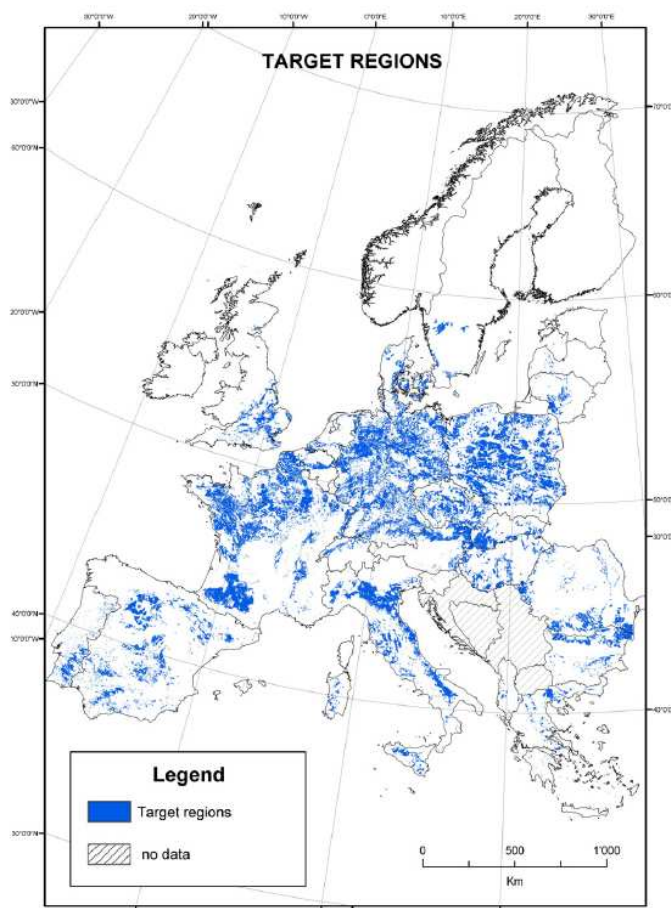


Figure 7 : Régions cibles pour l'agroforesterie sur terres arables en Europe. Dans ces régions, l'introduction de systèmes agroforestiers permet de réduire des risques environnementaux majeurs. Source : Reisner et al. 2007

¹¹ Site internet du programme de recherche européen SAFE <http://www.ensam.inra.fr/safe/>

¹² L'étude s'est basée sur une liste de 5 essences: *Juglans* spp., *Prunus avium*, *Populus* spp., *Pinus pinea*, et *Quercus ilex*

Utilisation des terres (Agreste 2007)	Superficie (ha)	Adoption / Conversion (ha)		Taux de stockage (t C.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Potentiel de stockage en (Mt eq CO ₂ .an ⁻¹) et (% des objectifs de réduction)	
		2020	2050		2020	2050
Terres arables (a)	13 052 834	400 000 (3%)	1 300 000 (10%)	2	2.93 (2.6%)	9.53 (3.4%)
Prairies (b)	12 668 673	200 000 (2%)	600 000 (5%)		1.47 (1.3%)	4.40 (1.6%)
TOTAL	25 721 507	600 000 (5%)	1 900 000 (15%)		4.40 (3.9%)	13.93 (4.9%)

Tableau 3 : Estimations des surfaces convertibles en agroforesterie en France et du potentiel de stockage de carbone en 2020 et 2050. (a) Céréales (sauf riz), Oléagineux, Protéagineux, Fourrage annuel (maïs fourrage et ensilage) ; (b) Prairies temporaires et Surface Toujours en Herbe (STH). Source : Agreste 2007

Si l'on prévoit la plantation de 1.9 million d'hectares d'agroforesterie d'ici 2050 (15% de la SAU), on pourrait alors envisager de stocker 13.9 Mt eq CO₂/an ce qui représenterait environ **5 % des objectifs de réduction d'émissions soit 25 % des émissions de GES imputables aux secteurs agricole et forestier**. L'agroforesterie est un outil économe et facile à mettre en place sur le territoire agricole dans le cadre des réductions des émissions, d'autant plus que contrairement à la forêt, le stock de carbone est entièrement créé et restera constant par replantation des parcelles exploitées. Un programme de soutien à la conversion agroforestière d'une partie de la SAU française conduirait à la création d'un puit supplémentaire de carbone stable dans le temps.

	Plantation (ha)		Taux de stockage (t C.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Potentiel de stockage (en Mt eq CO ₂ .an ⁻¹) et (en % des objectifs de réduction)	
	2020	2050		2020	2050
Haies champêtres (100ml/ha)	5 144 301 (20%)	10 288 602 (40%)	0.1	1.89 (1.7%)	3.77 (1.3%)

Tableau 4 : Estimations des plantations de haies champêtres en bords de champs et de leur contribution aux réductions des émissions de GES pour les horizons 2020 et 2050.

Les haies rurales sont aussi un outil d'aménagement des territoires facile à implémenter dans les régions en vue de contribuer à la fixation et au stockage de carbone. Si l'on fait l'hypothèse que chaque hectare peut être bordé au minimum de 100 ml de haies champêtres (soit 1 km de haies pour une parcelle de 10ha) on pourrait alors à terme stocker annuellement entre 2 et 4 millions de tonnes équivalent CO₂ grâce aux haies ce qui représenterait une contribution d'environ **1.5% des objectifs de réductions des GES en 2020 et 2050 soit 8% des émissions de GES imputables aux secteurs agricoles et forestier**.

Les émissions combinées du secteur agricole et forestier comptaient pour 20% des émissions totales en 2007. En convertissant 15 % de la SAU française en agroforesterie et en plantant des haies sur 20 %, ces aménagements pourraient alors contribuer à 5 % des objectifs de réduction d'émissions dès 2020 soit plus de 30 % des objectifs de réductions des émissions des secteurs agricole et forestier en 2050.

OUTILS DE MISE EN PLACE ET DE VERIFICATION DES PROJETS CARBONE AGROFORESTIER

- Outils de mise en place de « Projets Carbone AgroForestiers » (PCAF)

La reconnaissance des projets agroforestiers comme outils permettant de contribuer à la réduction des émissions de CO₂ ainsi que ces premières estimations de leur potentiel de séquestration pourraient nous permettre aujourd'hui de valoriser ces projets sur le marché du carbone et de rémunérer les agriculteurs pour ce service rendu.

Au niveau national, une réflexion est en cours avec l'**Association Française d'Agroforesterie (AFAF)** et l'**Association Française des Arbres et Haies Champêtres (AFAHC)** sur la création d'un organe de gestion de portefeuilles de projets carbone agroforestiers en lien avec les entreprises souhaitant investir dans des projets agroforestiers sur le territoire national (Mise en Œuvre Conjointe). L'association serait le relais entre la demande des entreprises émettrices de carbone au delà de leur quota, et l'offre de projets agroforestiers chez les agriculteurs et les propriétaires, au sein des territoires. Implantée partout en France avec plus de 50 opérateurs de terrain, l'AFAHC garantirait le cycle du projet par un cahier des charges de plantation et d'entretien régional.

Outre la séquestration de carbone, l'agroforesterie contribue aussi à l'intégration de la biodiversité au sein des agrosystèmes et représente un système innovant et prometteur dans la lutte contre la pollution des nappes par les nitrates. Le développement de l'agroforesterie en zone sensibles (nitrates), dans les zones soumises à de forts aléas d'érosion ou encore dans des régions à faible diversité paysagère permettrait alors de combiner stockage de carbone et autres services écosystémiques.

- Outils de vérification des « Projets Carbone AgroForestiers » (PCAF)

Les procédures de vérification des projets proposées par le GIEC prévoient généralement une vérification décomposée en :

- ✎ une vérification du stockage par **unité de surface** induit par une pratique, fondée sur la mesure des variations locales de stock de C (réalisée par échantillonnage et/ou modélisation numérique), et sur le suivi périodique de sites de référence comprenant des parcelles témoins et d'autres soumises à un changement d'usage ou de pratique. Les outils de modélisation développés par l'INRA de Montpellier et le réseau national de parcelles de référence créé en 2008 lors du projet DAR « Agroforesterie 2006-2008 » nous permettront de produire des références régulières dans différentes situations pédoclimatiques et pour des plantations d'âge différent.
- ✎ une vérification des **surfaces concernées** par ces changements d'usage ou de pratique, réalisée, par exemple, grâce à des méthodes de télédétection. En collaboration avec des entreprises de services d'information géographique, le suivi régulier des projets carbone agroforestiers pourra être effectué de manière fiable par photos satellites. Nous pourrions ainsi suivre l'évolution des densités et le type d'activité agricole sur les parcelles.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

De l'importance de la contribution des arbres hors forêts au stockage de carbone ...

Même si la forêt française gagne environ 50 000 ha.an⁻¹ (INRA 2008) le puits forestier risque de diminuer d'ici 2020 en raison d'une exploitation accrue des ressources en bois notamment pour les filières énergétiques (bois énergie). La perte de stockage engendrée par cette gestion intensive des forêts ne sera pas compensée par l'augmentation de la surface forestière nationale.

Si les émissions nettes (différence entre sources et puits de carbone) des cultures, prairies, forêts et tourbières sont nulles au niveau européen (INRA 2008), il est nécessaire de développer dès aujourd'hui une réelle **politique d'anticipation** qui prenne en compte tous les outils possibles (changement d'usage des terres, pratiques agricoles, infrastructures écologiques), permettant d'exploiter le potentiel de séquestration de carbone du secteur agricole. Les arbres hors forêt (haies, agroforesterie, bocage, arbres isolés, ripisylves...) contribuent pleinement à cet effort de réduction et représente un potentiel de stockage conséquent à l'échelle nationale.

Le quatrième rapport d'évaluation du GIEC a identifié quatre grandes catégories de **mesures d'atténuation terrestre** dont l'introduction de systèmes agroforestiers (GIEC 2007). La FAO constate par ailleurs que ces pratiques améliorées de gestion agricole sont souvent les mêmes que celles renforçant la productivité, l'adaptation aux changements climatiques et la sécurité alimentaire (FAO 2009).

Perspectives de développement de l'agroforesterie dans le marché carbone

Du fait de leur **potentiel de séquestration élevé** (entre 1.5 et 4tC/ha/an) et de **l'importance des surfaces potentiellement convertibles** (atténuation de risques environnementaux en zones sensibles, adaptation aux systèmes de productions agricoles modernes) l'agroforesterie et les haies sont deux techniques économes, simples et rentables de valorisation du potentiel du secteur agricole dans le cadre des objectifs de réduction des émissions aux horizons 2020 et 2050.

Une **politique ambitieuse de développement de l'agroforesterie**, dépassant l'objectif des 25 % énoncé dans cette synthèse, combinée à des techniques de réduction d'émissions (Techniques Culturelles Simplifiées, Semis sous Couvert Végétal) pourraient compenser intégralement les émissions de GES du secteur agricole. La conversion de 50 % des terres arables françaises, dans l'hypothèse d'une conversion progressive au semis direct en 20 ans, représenterait en effet un stockage additionnel de presque 40 MtC (soit 150 Mt eq. CO₂) d'ici 2050 (Arrouays et al. 2002). Un changement significatif des pratiques agricoles et le réaménagement arboré partiel de la surface agricole française permettraient de garantir une **agriculture décarbonnée** et productive en France.

Cette synthèse est une première étape dans le processus d'intégration des arbres hors forêt aux politiques de lutte contre le changement climatique. Les politiques publiques à mettre en œuvre après la conférence de Copenhague ne pourront ignorer l'importance de l'agriculture et des nouveaux systèmes agricoles puits de carbone. La rémunération des agriculteurs pour le stockage de carbone des arbres agroforestiers est une voie d'avenir pour l'agroforesterie, pour l'agriculture et pour l'accomplissement des objectifs de réduction des GES.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARROUAYS D., BALESSENT J., GERMON J.C., JAYET P.A., SOUSSANA J.F., STENGEL P., 2002, Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?, Expertise Scientifique Collective INRA, 334p
- BALESSENT J., ARROUAYS D., CHENU C., FELLER C., 2005. Chapitre 10 : Stockage et recyclage du carbone, 238-259 in GIRARD M.C., WALTER C., REMY J.C., BERTHELIN J., MOREL J.L. (2005) Sols et Environnement. Dunod (Ed.) 816p
- BAUDRY, J., BUNCE, R.G.H., et al., 2000. Hedgerows: an international perspective on their origin, function and management. *Journal of Environmental Management* 60 (1), 7–22.
- BAUMOL W.J, OATES W.E., 1975. *The Theory of Environmental Policy*. Prentice Hall, New York
- CASDAR 2008. Bilan eau, azote et carbone en parcelles agroforestières. Rapport de synthèse, Programme Agroforesterie 2006-2008, 54 p.
- CHEVASSUS-AU-LOUIS B. SALLES J-M., BIELSA S., RICHARD D., MARTIN G., PUJOL J-L, 2009. Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes – Contribution à la décision publique, 378p.
- DUPRAZ C. and LIAGRE F., 2008. *Agroforesterie : des arbres et des cultures*. Ed. France Agricole, Paris, 413 p.
- FAO 2009. *Food security and Agricultural Mitigation in Developing countries: Options for capturing synergies*. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome, November 2009, 84 p.
- FOLLAIN S., WALTER C., LEGOUT A., LEMERCIER B., DUTIN G., 2007. Induced effects of hedgerow networks on soil organic carbon storage within an agricultural landscape. *Geoderma*, 142, pp. 80–95
- GARDETTE Y-M. and LOCATELLI B., 2007. Lesq marchés du carbone forestier. Comment un projet forestier peut-il vendre des crédits carbone ? ONF International, CIRAD, 72 p.
- GAVALAND A. and BURNEL L., 2005. Croissance et biomasse aérienne de noyers noirs, *Chambres d'agriculture* n°945, pp. 20-21
- GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de-)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 p.
- GORDON AM, Naresh RPF and Thevathasn V (2005) How much carbon can be stored in Canadian agroecosystems using a silvopastoral approach? In: Mosquera-Losada MR, McAdam JH and Riquerio-Rodriguez A. *Silvopastoralism and Sustainable Land Management*, CABI Publishing, Wallingford UK. pp 210-218.
- HAILE S. G., NAIR R. P. K., NAIR V. D., 2008. Carbon storage of different soil-size fractions in Florida silvopastoral systems, *Journal of Environmental Quality*, 37, pp. 1789–1797
- INRA 2008. Projections des émissions/absorptions de gaz à effet de serre dans les secteurs forêt et agriculture aux horizons 2010 et 2020, Rapport final, 202 p.
- IPCC 2000. *Land use, land-use change and forestry (LULUCF)*. Watson, R.T. et al. (eds). Cambridge University Press. 375 pp.
- LECOQC, F., 2006. Les marchés carbone dans le monde. *Revue d'économie financière*, 83.
- LEPAGE C., 2009. Changement climatique : parlons clair ! *Actu-Environnement*, 30 septembre 2009
- MEED 2007. Inventaire national des émissions de gaz à effet de serre, créé le 30 janvier 2009. Disponible en ligne à l'adresse : <http://www.ecologie.gouv.fr/Inventaire-national-2007.html>.
- MONBIOT G., 2009. Climat : ne pas baisser les bras, *The Guardian* (Londres). In : *Courrier International*, Hors série, Septembre-Octobre-Novembre 2009
- MONTAGNINI F. and NAIR P. K. R., 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 61, pp. 281–295
- MULIA R., DUPRAZ C., 2005. Unusual fine root distributions of two deciduous tree species observed in Southern France: what consequences for root dynamics modelling?, *Plant and Soil* 281, pp. 71-85
- NAIR P.K.R., KUMAR B.M., NAIR V.D., 2009a. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *J. Plant Nutri. Soil Sci.* 172, 10–23.
- NAIR P.K.R., NAIR V. D., KUMAR B.M., HAILE Solomon G., 2009b. Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. *Environmental Science and Policy*, in press.
- NATIONS UNIES – Conseil Economique et Social, 2009. *La forêt et le changement climatique*. Forum des Nations Unies sur les forêts, Huitième session. New York, 20 avril-1er mai 2009, 19 p.
- OELBERMANN M., VORONEY R.P., GORDON A.M., 2004. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104, pp. 359–377
- PEICHL M., THEVATHASAN N. V., GORDON A. M., HUSS J., ABOHASSAN R. A., 2006. Carbon sequestration potentials in temperate tree-based intercropping systems, southern Ontario, Canada, *Agroforestry Systems*, 66, pp. 243–257
- REISNER Y., DE FILIPPI R., HERZOG F., PALMA J., 2007. Target regions for silvoarable agroforestry in Europe, *Ecological Engineering*, 29, pp. 401-418
- SCHROEDER, P. 1994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 27: 89.97.
- SHARROW S.H., and ISMAIL S., 2004. Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in western Oregon, USA. *Agroforestry Systems*, 60, pp. 123–130
- TECHNIQUES CULTURALES SIMPLIFIEES 2009, Metz, n°54, 35 p.

THEVATHASAN N.V. and GORDON A.M., 2004. Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: Experiences from southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 61,pp.257-268,

WALTER C., MEROT P., LAYER B. & DUTIN G., 2003. The effect of hedgerows on soil organic carbon storage in hillslopes. *Soil Use and Management*, 19,pp. 201-207

WINEBRAKE J.J., FARRELL A.E., BERNSTEIN M.A., 1995. The clean air act's sulfur dioxide emissions market: Estimating the costs of regulatory and legislative intervention. *Resource and Energy Economics*, 17 (3), pp. 239-260