

# CASDAR Agroforesterie 2009-2011

« Améliorer l'efficacité Agro-environnementale des Systèmes Agroforestiers »



Responsable : Agroof Développement



## Groupe de Travail 3 – SOL

Délivrable 3.1  
Synthèse bibliographique



Avec le soutien financier du Compte d'Affectation Spécial pour le Développement Agricole et Rural (CASDAR) du Ministère de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Pêche

# - SOMMAIRE -

<b>I</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
I.1	Réglementations à l'échelle européenne et internationale : quelles avancées pour le sol ?	4
I.2	En France : le sol sous surveillance	5
I.2.1	Le GIS Sol- Système d'information des sols de France	6
I.2.2	Objectif Terres 2020 – Pour un nouveau modèle agricole français	6
<b>II</b>	<b>ENJEUX - LE SOL : UNE RESSOURCE LIMITEE, NON-RENOUVELABLE</b>	<b>7</b>
II.1	La Matière Organique et le Carbone du Sol	8
II.1.1	Les taux de matières organiques diminuent	8
II.1.2	Le sol : source et puits de Carbone	9
II.2	Erosion : principale menace pour les sols européens	12
II.3	Biodiversité des sols : une diversité biologique presque invisible, un enjeu bien réel	14
II.4	Enjeux socio-économiques : vers une évaluation des services rendus	15
<b>III</b>	<b>LE SOL, UNE MATRICE VIVANTE</b>	<b>17</b>
III.1	A la découverte du système sol	17
III.2	Des constituants élémentaires aux propriétés du sol	18
III.2.1	Les constituants du sol	18
III.2.2	Propriétés physiques : la texture et la structure du sol	20
III.3	Les êtres vivants et leurs actions sur le fonctionnement du sol	21
III.3.1	Les organismes du sol : de la mirco- à la macro-faune	21
III.3.2	Microflore : bactéries, champignons et algues	22
III.3.3	La pédofaune : catégories, rôles et habitats	23
<b>IV</b>	<b>L'ARBRE ET LE SOL : QUELLES INTERACTIONS ?</b>	<b>25</b>
IV.1	Les Systèmes Agroforestiers	25
IV.1.1	Enseignements des expériences tropicales	26
IV.1.2	Séquestration de carbone dans la biomasse et le sol en système agroforestier tempéré	28
IV.1.3	Biodiversité des sols agroforestiers : quelles différences ?	32
IV.1.4	Services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers	36
IV.2	Les Haies, les Trognons et le Bocage : quelle production de biomasse ?	37
IV.2.1	Evolution du linéaire de haie	37
IV.2.2	Production de bois énergie – quelques repères	38
IV.2.3	Production de Bois Raméal Fragmenté : un besoin de recherche	39
IV.3	Le Bois Raméal Fragmenté : intérêt agronomique	40
IV.3.1	Définition – concept et enjeux	40
IV.3.2	Bois raméal fragmenté et vie biologique du sol	41
IV.3.3	Bois raméal fragmenté, carbone et aggradation des sols	41

<b>V</b>	<b>AXES ET METHODES DE RECHERCHE</b>	<b>43</b>
V.1	Définition des axes de recherche	43
V.2	Présentation des sites d'études	43
V.3	Méthodologie d'évaluation comparée de la fertilité organique et microbiologique	45
V.4	Méthodologie d'évaluation comparée de la biodiversité des sols agroforestiers	45
V.4.1	Protocole d'étude des lombriciens	48
V.4.2	Protocole d'étude des Cloportes	50
V.5	Méthodologie d'évaluation comparée de la biomasse des arbres hors-forêt	50
<b>VI</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>51</b>
<b>VII</b>	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>52</b>
<b>VIII</b>	<b>ANNEXES</b>	<b>58</b>

## INTRODUCTION

Depuis le développement de notre civilisation, il y a moins de 10 000 ans AV-JC, la fonction principale des sols a été la production agricole pour la fourniture alimentaire de l'humanité (Robert 2005). Cette fonction repose sur un certain nombre de propriétés des sols que nous aborderons dans le Chapitre III consacré au sol.

Il faut environ 100 000 ans pour former un sol rouge méditerranéen de 1 m d'épaisseur. Cette durée et les variations climatiques en font une ressource non renouvelable à l'échelle humaine (Ifen 1998). Si la formation du sol est un processus lent, la dégradation des terres cultivables, est en revanche un processus rapide. La ressource en sol ne représente que 22% des terres émergées (3 300 millions d'hectares dont 1 800 millions d'hectares non cultivés, en réserve). Les pertes annuelles de ce capital sont estimées entre 12 et 16 Mha seulement sur la période 1975-2000 soit 400 millions d'hectares d'ici 2015 (Robert et Cheverry 2009). Le PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) indique qu'au cours de ces 20 dernières années la progression exponentielle des sols cultivés s'est ralentie mais que leur utilisation est plus intensive.

En France, les paysages agricoles, forestiers et naturels prédominent. Entre 1990 et 2000, 2 % du territoire ont changé de mode d'utilisation. Les paysages urbains ont progressé de manière significative, alors que les prairies et les territoires agricoles hétérogènes comme les bocages ont régressé (Ifen 2005<sub>b</sub>). Les pertes en sols s'accroissent par dégradation mais donc aussi par urbanisation. Entre 60 000 et 80 000 hectares sont urbanisés chaque année en France, soit en moyenne un département tous les 10 ans (Seghier 2007).

Les sols se dégradent. Les causes sont multiples et connues depuis plusieurs décennies : imperméabilisation, dégradation physique (érosion, tassement), chimique (acidification), biologique (perte de biodiversité)...etc.

Certes, l'appauvrissement des sols est en partie naturel (acidification progressive par entraînement des ions dans les eaux de percolation) et quasi-inéluctable. Cependant, l'agriculture reste le principal facteur d'épuisement des sols (Tessier 2009).

Face à cet appauvrissement, l'amendement et la fertilisation des terres, essentiellement par synthèse industrielle se sont généralisés. Les pertes de matières organiques (Cf. infra Chapitre II.1) dues à un changement d'utilisation des sols ou à l'intensification des pratiques agricoles, ne sont pas généralisables à l'ensemble du territoire. Cependant à l'échelle d'une génération la dégradation physique d'un sol cultivé peut aboutir à l'érosion complète des couches superficielles ou à la minéralisation du stock de matière organique du sol.

L'aggradation (reconstitution de la fertilité) des sols n'est pourtant pas impossible. Ou du moins, le maintien de sa fertilité. Si l'approche agronomique classique consiste à raisonner en termes de pratiques culturales (rotation et assolement, agriculture de conservation, amendements et préparations...etc.), l'apport de l'arbre dans la reconstruction d'un capital sol pérenne reste encore peu abordé ; ou indirectement à travers des amendements extérieurs tels que les Bois Raméaux Fragmentés (BRF) (Cf. infra Chapitre IV.3).

**Cette synthèse bibliographique a pour objectif de faire le lien entre les enjeux relatifs à la conservation et la protection des sols et l'apport des systèmes agroforestiers. Nous dresserons dans un premier temps l'évolution de la prise en compte des sols dans les réglementations et les programmes de développement puis nous définirons les différents enjeux actuels autour de la gestion de la ressource en sol.**

Dans une deuxième partie, nous aborderons le fonctionnement propre du sol et ses différents compartiments pour mieux comprendre l'importance des propriétés et des fonctions de cet écosystème et quel pourrait être l'impact des systèmes agroforestiers, ou indirectement de la biomasse arborée, sur sa fertilité.

Nous développerons enfin les axes et méthodologies de recherche mis en place pour répondre aux questions posées par cette synthèse : les systèmes agroforestiers peuvent-ils contribuer durablement à la restauration de la fertilité biologique et organique des sols cultivés ?

## I.1 Réglementations à l'échelle européenne et internationale : quelles avancées pour le sol ?

Durant cette dernière décennie ce sont les préoccupations environnementales, l'évolution de l'agriculture, et le contexte de crises successives concernant la sécurité alimentaire, qui ont amené à prendre en compte plusieurs fonctions du sol au-delà de leur rôle unique sur la production et à faire émerger au niveau politique la notion de qualité des sols (Arrouays 2009).

La Charte des sols du Conseil de l'Europe de 1972 a invité les États à promouvoir une politique de conservation des sols. La Charte mondiale des sols de la FAO (1982) et la Politique mondiale des sols du Programme des Nations Unis pour l'Environnement (1982) ont déjà à l'époque cherché à encourager la coopération internationale en matière d'utilisation rationnelle des ressources du sol.

Sous l'angle du changement climatique, la Convention Cadre sur les Changements Climatiques (CCC) de 1992 reconnaît quant à elle le rôle et l'importance des écosystèmes terrestres comme puits de gaz à effet de serre et souligne que les problèmes engendrés par la dégradation des terres et les modifications dans l'utilisation des terres peuvent aggraver l'émission de gaz dans l'atmosphère.

Sous l'angle de la biodiversité, la Convention sur la Diversité Biologique<sup>1</sup> de 1992 aborde la protection de la biodiversité du sol et recommande la réduction des effets négatifs sur cette ressource de certaines pratiques agricoles telles que l'utilisation excessive d'intrants. Par la suite, le concept de développement durable a été instauré et des conventions juridiquement contraignantes sur les changements climatiques, la diversité biologique et la désertification ont été adoptées. La convention de 1994 sur la lutte contre la désertification vise à prévenir et réduire la dégradation des terres, remettre en état les terres partiellement dégradées et restaurer les terres désertifiées.

Dans ce contexte, le 6<sup>ème</sup> Programme d'Action Communautaire pour l'Environnement<sup>2</sup> (Commission des Communautés Européennes 2002) prévoit une Stratégie Thématique pour la protection des sols, accordant une attention particulière à la prévention de l'érosion, la détérioration, la contamination et la désertification. Le terme sol, tel qu'utilisé dans ce document, se réfère à la couche supérieure de la croûte terrestre, constituée de particules minérales, de matières organiques, d'eau, d'air et d'organismes vivants.

<sup>1</sup> Site officiel : <http://www.cbd.int/>. Télécharger la convention au format pdf : <http://www.biodiv.org/doc/legal/cbd-un-fr.pdf>

<sup>2</sup> « Environnement 2010: notre avenir, notre choix » couvre la période allant du 22 juillet 2002 au 21 juillet 2012. Ce programme est inspiré du cinquième programme d'action pour l'environnement qui couvrait la période 1992-2000.

En vue de répondre à cet objectif, la stratégie européenne de protection des sols vise en particulier à identifier les fonctions et caractéristiques importantes des sols (production d'aliments et de biomasse, stockage, filtration et transformation, habitat et pool génique, environnement physique et culturel pour l'homme, source de matières premières), les menaces majeures qui pèsent sur les sols (érosion, contamination, baisse des teneurs en matière organique, diminution de la biodiversité, artificialisation, salinisation et désertification) et harmoniser les inventaires, nécessaires à la spatialisation de l'information (Montanarella 2004).

L'importance de la protection des sols est de mieux en mieux perçue au niveau international, comme en témoigne la révision de 2003 de la Charte du Conseil de l'Europe sur la protection et la gestion durable des sols.

Dans une communication de septembre 2006, la Commission propose, entre autre, l'adoption d'une Directive Cadre, jugée le meilleur moyen de garantir une approche globale tout en respectant pleinement le principe de subsidiarité des États membres (CCE 2006). Neufs États membres possèdent une législation spécifique en matière de protection des sols, mais qui répond souvent à un risque déterminé comme la contamination.

La directive prévoit notamment la création d'un répertoire national des sites contaminés, la définition de « zones prioritaires » à protéger contre l'érosion, les glissements de terrain ou encore la perte de biodiversité. Les États membres devront également améliorer la capacité des sols à capturer le carbone.

Approuvé par le Parlement européen en novembre 2007, le projet n'a pas été voté en décembre de la même année par l'Allemagne, l'Autriche et le Royaume-Uni et par la France, qui s'est abstenue, lors du Conseil Environnement. Les associations telles que European Environmental Bureau (EEB) ou France Nature Environnement, jugeaient par ailleurs ce texte décevant et peu ambitieux, n'incitant pas les États membres à utiliser de manière plus durable une ressource effectivement non renouvelable (Seghier 2007). La reprise des négociations est prévue pour 2010, sous la présidence espagnole de l'Union Européenne. La France a entre temps assoupli sa position (Roussel 2009).

**En 2009, à l'occasion du Conseil environnement des 24 et 25 juin, les ministres de l'environnement des 27 États membres de l'UE n'ont pas réussi à trouver un terrain d'entente pour la future directive sur la protection des sols. La France s'est abstenue (Council of the European Union 2009).**

**Néanmoins, le processus de discussion est enclenché. Même s'il reste encore beaucoup de chemin à parcourir, la mise en place de la Stratégie Thématique pour la protection des sols a permis d'avoir un lieu de confrontation en vue d'organiser une politique commune centrée sur les sols. Les sols auront donc prochainement leur place en tant que compartiment à part entière de l'environnement au même titre que l'eau et l'air (King 2009).**

## **I.2 En France : le sol sous surveillance**

En 1998, l'IFEN alertait d'ores et déjà sur les menaces qui pesaient sur les sols français : surexploitation, pollution industrielles, épandage de boues...et la difficulté de mettre en place un réseau d'observation afin d'avoir une vue d'ensemble de l'état des sols en France. Le sol fait en effet l'objet d'une appropriation, à la différence de l'eau et de l'air. Il y a 10 ans,

l'Observatoire de la Qualité des Sols (OQS) et le RENECOFOR, le réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers constituait un embryon de ce qui deviendra plus tard à un réseau national d'observation à travers le programme GESSOL.

- **Le GIS Sol - Système d'information des sols de France**

En 2002, la France a adopté un plan national d'action pour la gestion et la protection des sols. Ce plan prévoit notamment un nouveau réseau de surveillance des sols, la réalisation de la carte nationale des sols et de cartes sur les risques d'érosion et sur les matières organiques des sols.

Initiative récente en France, le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS), basé sur le système de surveillance des sols forestiers, a établi un réseau national de contrôle de la qualité des sols, selon un quadrillage de 16 km par 16 km, avec 2 000 placettes d'échantillonnage représentatives des usages et des sols, régulièrement répartis sur le territoire. Tous les 5 ans, ce réseau mesurera un certain nombre de paramètres environnementaux tels que la pollution diffuse et la matière (Arrouays 2009).

Ce programme national est piloté par le GIS Sol<sup>3</sup> regroupant les Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement, l'INRA, l'ADEME, l'IFEN et l'IRD. Créé en France en 2001, reconduit en 2006, ce programme est sous la conduite de l'unité InfoSol de l'INRA d'Orléans. La Stratégie Thématique pour la protection des sols (Cf. supra Chapitre I.1) renforce donc l'initiative de la France à se doter d'un système performant d'acquisition, de gestion et de diffusion d'informations sur les sols.

Le développement de nouveaux programmes d'évaluation de l'état et de l'évolution de la qualité des sols en France passe aussi par le développement de 2 autres outils (Jolivet 2009) :

- La Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) regroupant à l'INRA les résultats d'analyses de terres (plus d'1,1 million d'analyses) pour la période 1990-2004
- L'Inventaire Gestion et Conservation des Sols (IGCS) permettant de disposer d'informations spatialisées en associant les bases de données géographiques.

- **Objectif Terres 2020 – Pour un nouveau modèle agricole français**

Ce plan<sup>4</sup> définit les voies possibles d'une agriculture réinventée, conciliant performance économique et efficacité écologique. L'agriculture et la forêt doivent relever cinq défis majeurs pour la valorisation des ressources naturelles ; ils portent sur la raréfaction de l'eau, la restauration de sa qualité, la préservation des sols, de la biodiversité et des paysages, et la maîtrise énergétique.

Ce projet se décline en une soixantaine d'actions. Pour la protection des sols, le Ministère reprend l'état des lieux sur les menaces qui pèsent sur les sols évoquées dans la Stratégie Thématique européenne pour la protection des sols dans le défi n°4 « Protéger les sols

---

<sup>3</sup> Pour en savoir plus sur les programmes et outils du GIS Sol, consultez l'adresse internet suivante : <http://www.gissol.fr/index.php>

<sup>4</sup> Disponible en ligne à l'adresse suivante : [http://terres2020.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Agirbis\\_plan\\_cle0e9659.pdf](http://terres2020.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Agirbis_plan_cle0e9659.pdf)

agricoles » qui se décline en 3 mesures spécifiques et 2 mesures connexes relatifs aux enjeux sur la ressource en eau.

👉 **Mesure 18 - Développer la recherche en microfaune des sols**

Quatre axes de recherche seront développés ou approfondis :

- la connaissance des micro-organismes et de la microbiologie du sol
- les interactions entre les micro-organismes et les cycles des principaux nutriments (azote, carbone)
- les impacts des pratiques de gestion sur la microfaune et la biodiversité du sol
- les services agro-écologiques rendus par la microfaune sur la stabilité des agro-systèmes.

👉 **Mesure 19. Développer le travail simplifié du sol :** et en particulier les techniques culturales sans labour (TCSL) qui nécessitent encore des efforts de recherche, développement et formation en vue de leur optimisation et de leur développement sur le territoire français à l'ensemble des cultures.

👉 **Mesure 20. Favoriser l'implantation de haies :** pour leur rôle anti-érosif et leur rôle en faveur de la biodiversité.

On notera aussi 2 mesures indirectement liées à ce défi de « Protection des sols », qui promeuvent les infrastructures écologiques du paysage (bandes enherbées, haies, arbres...) et l'agroforesterie.

Parallèlement, la couverture des sols en hiver et la généralisation des bandes enherbées le long des cours d'eau devrait permettre de réduire l'érosion des couches superficielles par ruissellement des eaux de pluies et le risque de pollution des eaux par les Matières En Suspension (MES).

2

## **ENJEUX - Le sol : une ressource limitée, non-renouvelable**

Le sol est essentiellement une ressource non renouvelable avec des taux de dégradation potentiellement rapides et des processus de formation et de régénération extrêmement lents. La quantité de terre, et donc de sol disponible, pour la production alimentaire par personne est limitée. Lorsque le sol est dégradé, sa capacité globale à remplir ses fonctions est réduite.

Le sol est sous la menace croissante d'une vaste gamme d'activités humaines qui réduisent sa disponibilité et sa viabilité à long terme. La phase finale du processus de dégradation est la désertification des terres, quand le sol perd sa capacité à assurer ses fonctions.

Ces menaces n'apparaissent pas de manière homogène dans toute l'Europe mais il est prouvé que les processus de dégradation s'accroissent, aussi bien dans les États membres actuels que dans les pays candidats. Il est probable que le changement climatique les aggravera. Dans l'Union Européenne, on estime que 52 millions d'hectares, représentant plus de 16 % de la superficie totale, sont touchés par des processus de dégradation (CCE 2002).

Nous avons choisi de développer 4 enjeux majeurs, en lien avec l'utilisation agricole des sols cultivables :

- la perte de matière organique et le stockage de carbone
- la perte de sol à travers l'érosion
- la perte de biodiversité
- et l'évaluation des services écologiques rendus

## II.1 La Matière Organique et le Carbone du Sol

- **Les taux de matières organiques diminuent ...**

La matière organique du sol est un mélange de constituants majoritairement végétaux en voie de décomposition, d'origine naturelle ou apportés par l'homme, et d'organismes vivants. Composante importante de la fertilité, elle joue un rôle environnemental de premier plan : elle contribue à préserver les sols de l'érosion en favorisant le développement des végétaux et en stabilisant les matériaux des couches de surface. Elle est une source d'énergie et de nutriments pour les organismes vivant dans le sol. L'activité biologique et la stabilité des écosystèmes sont donc étroitement liées à la présence de matières organiques.

Elles représentent, sur terre, une masse de 2 000 à 3 500 Gt. Les matières organiques sont composées en moyenne de 58 % de carbone organique. Dans leurs formes les plus évoluées, elles sont intimement liées à la matière minérale du sol (Ifen 2007). Une partie notable du carbone d'origine végétale persiste quelques dizaines d'années jusqu'à plusieurs millénaires sous forme organique avant d'être minéralisée (Balesdent et Chenu 2009). Leur temps moyen de décomposition et de minéralisation est estimé à 15 ans, mais leur temps de résidence dans le sol est extrêmement variable selon les types de composés organiques.

Fortement dépendant du type de couverture végétale, ce stock est en moyenne 1,6 fois plus élevé dans les sols à végétation permanente et sous forêt que dans les sols cultivés. Le type d'occupation du sol représente donc un enjeu important quant aux services écosystémiques rendus par les matières organiques du sol (Ifen 2007).

En Europe, les teneurs en matières organiques sont élevées dans les pays scandinaves, au Royaume-Uni et en Irlande. Elles sont moyennes en Europe centrale et dans les zones montagneuses. Les teneurs sont faibles sur le pourtour méditerranéen. Ce gradient nord-sud reflète l'influence des températures et du drainage des sols sur la vitesse de décomposition des matières organiques.

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. La spatialisation et la spécialisation des productions, et notamment la monoculture, la séparation des terres arables et de l'élevage ; ont induit en France et en Europe, un remplacement insuffisant des matières organiques exportées. Cette perte est estimée à 6 millions de tonnes de carbone par an, entre les périodes 1990-1995 et 1999-2004. Parallèlement, sur la même période, le stockage dans les sols forestiers induit par l'accroissement des surfaces boisées est de l'ordre de 0,7 Mt C/an. Les sols de France auraient donc perdu 53 Mt de carbone sur dix ans, soit 1,7 % de leur stock estimé (Ifen 2007).

**Cette perte de matière organique des sols n'est pas homogène dans l'espace et affecte en premier lieu les sols aux teneurs organiques élevés. Les données de l'Ifen montrent que les taux de matières organiques sont par exemple à la hausse à la périphérie de la région parisienne, dans un corridor entre Angers et Nantes, au sud de Bordeaux et à l'est de Toulouse.**

Pourtant l'enjeu est de taille. La préservation ou l'augmentation des taux de matières organiques ont non seulement des conséquences directes sur la fertilité des terres agricoles, et donc la production alimentaire, mais aussi sur la séquestration de carbone atmosphérique, enjeu majeur pour la lutte contre les changements climatiques.

Mais alors peut-on stocker du carbone dans les sols ?

- **Le sol : source et puits de carbone**

Le stock de carbone dans les sols est important à l'échelle mondiale : 1 500 milliards de tonnes soit 2 fois plus que celui du compartiment atmosphérique (Batjes 1996). Pour donner un ordre d'idée, l'Expertise Scientifique Collective (ESCO) donne des stocks moyens de carbone en fonction du mode d'occupation des sols (**Tableau 1**).

Occupation du sol	Stocks moyens (tC/ha)	Remarques
Culture annuelles et cultures pérennes avec sol nu	< 45	Vignes et vergers < 32 (faibles restitutions organiques) Terres arables = 43 en moyenne
Prairies permanentes et forêts	70	Litière exclue dans le cas de forêts
Pelouses d'altitude et zones humides	90	Influences des basses températures et de l'anoxie sur la minéralisation du carbone

**Tableau 1: Stocks moyens de carbone selon les modes d'occupation et les types de sol. Source : adapté de Arrouays et al. 2002**

Il apparaît que l'hémisphère nord continental représente un puits (piégeage) de CO<sub>2</sub>, qui pourrait absorber 15-30% des émissions de combustions fossiles. 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).

Le sol exerce différentes fonctions régulatrices sur la composition de l'atmosphère (Germon 2009):

- échanges entre le système sol-plante et l'atmosphère
- mécanismes de production/émission
- et absorption/transformation.

Parmi les principaux gaz traces impliqués dans le changement climatique (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O) le gaz carbonique augmente annuellement de 0.5% et réside une centaine d'année dans l'atmosphère. Rien que pour la période 2000-2005 le GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Expert sur l'Evolution du Climat ou Intergouvernemental ou International Panel on Climate Change (IPCC en anglais) a mesuré un accroissement de 4.1 Gt de carbone soit plus que l'accroissement de la décennie précédente (1990-2000).

Le CO<sub>2</sub> va rester un élément majeur de l'évolution du climat au cours du 21ème siècle engendrant des augmentations moyennes de température à la surface du globe de 1.8 à 4°C selon les scénarii (IPCC, 2007). Les changements et la variabilité des phénomènes climatiques (sécheresse, forte pluviométrie...) auront sûrement un impact sur l'évolution de la matière organique du sol et les cycles des éléments minéraux.

Les sols de l'Union Européenne renferment plus de 70 milliards de tonnes de carbone organique, et la libération d'une petite fraction seulement de cette réserve suffirait à anéantir les efforts des autres secteurs (Boughriet 2008).

En Angleterre et au Pays de Galle des chercheurs ont montré un possible déstockage généralisé dû à une minéralisation accrue à cause de températures plus élevées (Bellamy et al 2005). Leurs recherches indiquent que les pertes de carbone dans les sols anglais et gallois n'ont pas compensé la séquestration par les puits de carbone terrestres. De plus, il semblerait que le taux de perte de carbone augmente avec la teneur en carbone du sol de plus de 2% par an pour des teneurs supérieures à 100 g/Kg.

En 2002, sur le territoire français, les estimations du stock de carbone organique sont de l'ordre de 3.1 milliards<sup>5</sup> 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 (environ 150 millions de tonnes de carbone) (Arrouays 2002). Cependant ce scénario de stockage additionnel se ferait aux prix d'un « changement massif des pratiques agricoles ».

La séquestration de carbone dans les sols pourrait néanmoins constituer une proportion importante des efforts à fournir pour respecter les engagements pris par la France dans le cadre des accords sur le changement climatique. D'autant plus que certains auteurs affirment que les sols ont des capacités importantes de stockage de carbone organique en fonction de leur composition granulométrique (Arrouays et al. 2006).

Ceci nécessite néanmoins un changement radical des pratiques agronomiques comme celles des techniques culturales sans labour (**voir encart**) et demanderait un réel effort en termes de politiques incitatives pour accompagner les changements des pratiques et des usages ainsi que le développement d'outils d'observations et de procédures de vérification des stockages additionnels aujourd'hui inexistantes. Toutefois, les modalités d'application de ces principes sont encore en débat ; selon le niveau d'exigence qui sera retenu, les moyens à mettre en œuvre et leur coût pourraient s'avérer rédhibitoires (comparés au prix de la tonne de carbone sur le marché).

Les procédures proposées par le GIECC 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 un suivi périodique de sites de référence comprenant des parcelles témoins et d'autres soumises à un changement d'usage ou de pratique
- une vérification des surfaces concernées par ces changements d'usage ou de pratique, réalisée, par exemple, grâce à des méthodes de téledétection.

Dans les différents scénarii de changements de pratiques testés, les durées moyennes nécessaires à la détection d'un changement de stock de carbone du sol varient de 3 à 15 ans ; dans les scénarii les plus défavorables, ces durées atteignent 10 à 25 ans.

Par ailleurs, le rapport de l'Expérience Scientifique Collective Sol (ESCO) indique que même si ce stockage additionnel s'accompagne souvent de bénéfices agronomiques et environnementaux connexes, le stockage de carbone dans les sols ne constitue pas une solution durable de réduction du CO<sub>2</sub> atmosphérique compte tenu du fait que les stocks dans les sols cessent de croître après une décennie (**Figure 1**) et que la disponibilité des terres agricoles est limitée.

---

<sup>5</sup> Pour l'ensemble du territoire DOM-TOM, et pour la couche de sol 0-30 cm

L'implantation des haies et l'agroforesterie sont décrites comme susceptibles de contribuer au stockage de carbone mais étant plus difficiles à quantifier (Cf. infra Chapitre IV.1.2).

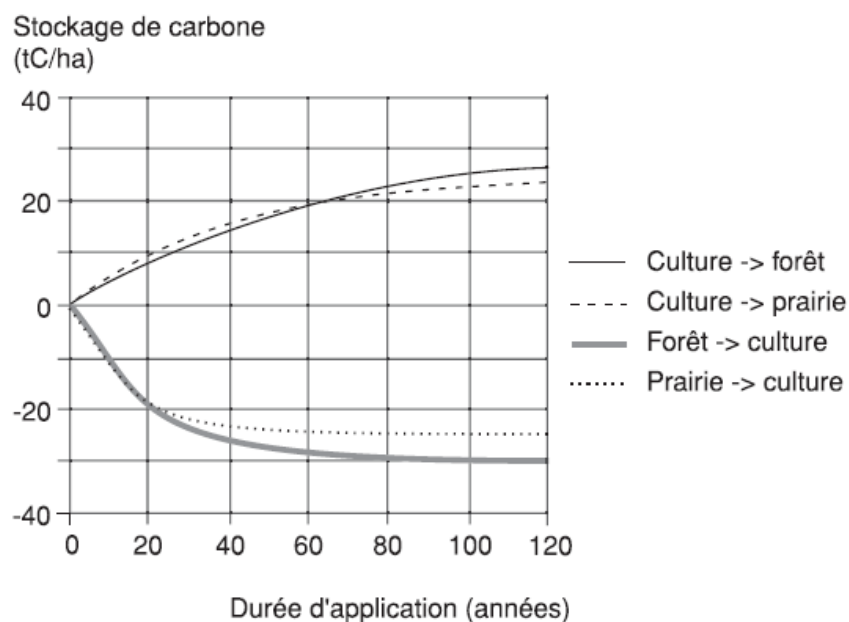


Figure 1: Evolutions du stock de carbone dans le sol associées aux pratiques provoquant les stockages (0,5 tC/ha/an durant les 20 premières années) ou les déstockages (1 tC/ha/an) extrêmes.

### TCS et non labour ...

#### L'abandon du labour induit une augmentation des teneurs en carbone

Les Techniques Culturelles Simplifiées (TCS), généralement associées au non-labour, recouvrent une large gamme de pratiques, du semis direct aux travaux du sol plus ou moins profonds (sans retournement). Semis direct et travail superficiel du sol auraient des effets comparables : le stockage additionnel est évalué à  $0,20 \pm 0,13$  tC/ha/an (Arrouays et al. 2002).

L'agriculture de conservation (autre nom emprunté par ces pratiques culturelles, associées à des choix de rotations appropriées), compte plus de 70 millions d'hectares dans le monde en agriculture de conservation. Rien qu'au Brésil, la superficie s'accroît chaque année de 1 million d'hectares (Robert and Richard 2009).

Selon les enquêtes sur les pratiques culturelles 2006 en France, plus de 40% des superficies de blé tendre ont été semées sans labour préalable dans les grandes exploitations (>50 ha). Cette proportion pouvant aller jusqu'au ¾ des terres en blé tendre pour les très grandes exploitations (400 ha et plus) (Source Agreste).

#### Effets négatifs VS Effets positifs

- Contrôle des adventices (salissement des parcelles)
- Contrôle des ravageurs (ex: limace)
- Usages d'herbicides totaux
- + Protection des sols contre l'érosion hydrique
- + Conservation des habitats du sol dans les horizons de surface, bénéfique à la biodiversité du sol
- + Diminution du tassement du sol

- + Réduction de l'évaporation du sol
- + Diminution du temps de travail et de la consommation d'énergie
- + Séquestration du carbone (en moyenne 0.2 tC/ha/an)

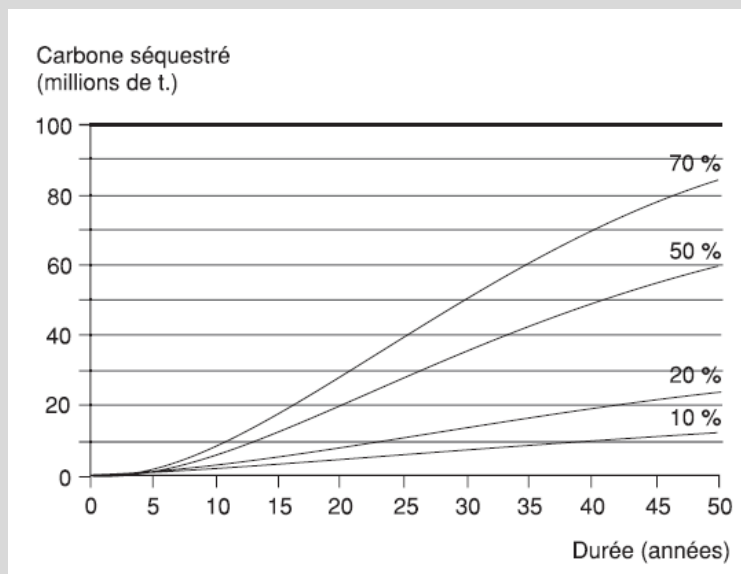


Figure 2 : Simulation du stockage additionnel de C dans les terres arables françaises sous hypothèse d'une conversion progressive au semis direct en 20 ans. Hypothèses de conversion au semis direct de 10, 20, 50 et 70% des terres arables. Source : Arrouays et al. 2002

Ces systèmes présentent un intérêt pour le stockage du carbone. L'accumulation de matière organique qu'ils génèrent contribue à la fourniture d'éléments minéraux, mais aussi à enrichir le stock d'humus à travers l'apport de matières végétales à C/N élevé. Des exemples d'évolution de la teneur en matière organique sur plusieurs années sont fournis. En milieu tropical ou subtropical, les teneurs en matière organique des situations initiales de jachère ou de défriche forestière sont à nouveau atteintes après quelques années de culture sous couverture végétale vivante (SCV). Ces systèmes apparaissent comme les plus performants parmi les systèmes cultivés (Capillon et Seguy 2002).

**En marge de ces questions sur l'évolution du stock de matière organique et du stockage de carbone, d'autres enjeux sont déterminants pour la protection des sols et leur fertilité : l'érosion et la perte de biodiversité des sols.**

## II.2 Erosion : principale menace pour les sols européens

L'érosion est un phénomène géologique naturel résultant de l'élimination des particules du sol transportées par l'eau ou le vent. Cependant, certaines activités humaines peuvent considérablement augmenter les taux d'érosion. L'érosion grave est généralement irréversible.

Les processus érosifs dépendent d'une multiplicité de facteurs interagissant entre eux. Les facteurs de l'érosion pris en compte pour étudier les phénomènes érosifs font l'objet d'un consensus et regroupent : le sol (texture, teneur en matières organiques), l'occupation du sol (type de couverture végétale), la topographie et le climat (fortes dénivellations, période de sécheresse) (Le Bissonnais et al. 2002).

Entre 1991 et 2005, l'érosion hydrique mesurée par la perte directe de sol, est passée de 90 millions d'hectares à 115 millions d'hectares en Europe soit 12 % de l'ensemble de la

superficie de l'Europe (Robert et Cheverry 2009, Robert 2005). Au niveau français l'aléa porte sur 5 millions d'hectares soit 10% de la superficie totale. La moitié est constituée de sols en pente (sud de la France, Champagne) avec des cultures telles que la vigne ; et l'autre moitié sur terre limoneuses (Ouest, Sud-Ouest et Nord).

#### **En chiffres - Dossier Sol (INRA 2009)**

- la vitesse moyenne de formation d'un sol est de 0.1 à 0.02 mm/an alors que l'érosion moyenne exporte 1 mm de sol par an
- 18% de la surface du territoire français concerné par un aléa d'érosion moyen à très fort
- principale menace pesant sur les sols pour la Commission Européenne, l'érosion concerne 17 % de la surface du territoire européen

Le modèle d'érosion utilisé en France, transposé et adapté au niveau européen, permet de constater que la France est affectée à la fois par une érosion de type méditerranéen et une érosion plus diffuse qui affecte les grandes plaines agricoles du nord de l'Europe (Ifen 2005<sub>a</sub>). Dans plus d'un tiers du total des terres du bassin méditerranéen, les pertes annuelles moyennes en sol dépassent 15 tonnes/ha (UNEP 2001).

En France, c'est l'érosion hydrique causée par la pluie et le ruissellement qui est la cause la plus préoccupante, avec 1/5 de la surface du territoire concernée en aléa moyen à fort et des taux d'érosion qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de millions de tonnes par hectare et par an dans les secteurs les plus touchés. Conséquences locales: ravinements, recouvrement des cultures, coulées de boue<sup>6</sup>, entraînement des particules fines et impact sur la qualité de l'eau...etc. (Léonard et al 2009). De façon moins visible, et sur le plus long terme, l'érosion entraîne une perte durable de la fertilité et un déclin de la biodiversité des sols (Ifen 2005<sub>a</sub>)

**Du fait des manifestations d'érosion de plus en plus préoccupantes, liées pour partie à la nature des sols et à l'intensification agricole (remembrement, régression des prairies, mécanisation), le choix d'occupation de sols est à long terme la solution la plus intégrative. Il s'agit de recréer ou d'entretenir une mosaïque paysagère et de végétation : distribution spatiale des cultures, organisation du parcellaire, configuration des zones intermédiaires (bocage, zones boisées, dispositifs enherbés...) (Le Bissonais et al 2005). La place de l'arbre au sein de ces dispositifs est donc légitime et l'on pourrait compléter ces recommandations en termes d'aménagements par les structures arborées telles que les haies ou les alignements agroforestiers...**

**Cette hétérogénéité spatiale – composition, structure des aménagements et occupations de sols – contribuerait également à diminuer une autre forme d'érosion, celle de la biodiversité des sols.**

<sup>6</sup> Le terme de coulée de boue est entendu ici comme un « écoulement fortement chargé en sédiments, provenant des surfaces cultivées et entraînant des particules de sol ». En règle générale, cet écoulement n'est ni visqueux ni épais. Ce terme peut prêter à confusion, notamment en région de montagne où il désigne aussi certaines formes de mouvements de masses.

## II.3 Biodiversité des sols : une richesse biologique presque invisible, un enjeu bien réel

La Convention sur la Diversité Biologique (1992) a inscrit la biodiversité des sols parmi les domaines qui requièrent une attention particulière. Une «Initiative internationale pour la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique des sols» a été mise en place (CCE 2006). Pourtant, sur la liste rouge de l'IUCN, moins de 100 espèces d'habitants du sol sont considérées comme menacées à un quelconque degré, et les organismes du sol représentent environ 1% du nombre total des espèces reconnues en danger.

Les connaissances sont insuffisantes en ce qui concerne la diversité biologique des sols. Le problème sera abordé dans le septième programme-cadre de l'UE (2007-2013) afin de mieux comprendre la contribution de la biodiversité à l'environnement. Cet approfondissement des connaissances bénéficiera aussi du soutien des initiatives en cours dans le cadre de la Convention sur la Diversité Biologique et du programme « Forest Focus »<sup>7</sup> (CCE 2006).

### En chiffres - CCE (2002)

- Dans un pâturage, on peut associer à chaque 1-1,5 tonne de biomasse vivant sur le sol (bétail et herbe) environ 25 tonnes de biomasse (bactéries, vers de terre, etc.) vivant dans les 30 premiers centimètres de sol sous-jacents
- Un gramme de sol en bon état peut contenir jusqu'à 600 millions de bactéries appartenant à 15 000 à 20 000 espèces différentes

Les bactéries, champignons, protozoaires et autres organismes du sol jouent un rôle essentiel dans le maintien des propriétés physiques et biochimiques nécessaires pour la fertilité des sols ainsi que la régulation du cycle hydrologique (Lévêque and Mounolou 2001). La fertilité biologique a été négligée par l'évolution récente de l'agriculture, qui souvent n'assure pas l'entretien de la matière organique des sols et a plutôt conduit à une perte de biodiversité de fait des pratiques aratoires et de l'utilisation des pesticides (Robert 2005).

Dans le cas des grandes cultures, l'usage des produits phytosanitaires de synthèse et les labours profonds et répétés, mais aussi la fertilisation, apparaissent comme des facteurs majeurs du déclin de la richesse spécifique et de l'abondance de nombreux organismes dont les microorganismes du sol et la faune du sol (Le Roux et al. 2008).

Les réductions de la biodiversité du sol rendent les sols plus vulnérables à d'autres processus de dégradation. Par conséquent, la biodiversité du sol est souvent utilisée comme indicateur global de l'état de santé du sol (CCE 2002).

**Séquestration de carbone, fertilité biologique et production alimentaire, régulation du cycle hydrologique, les services écosystémiques rendus par le sol sont-ils un levier pour une meilleure prise en compte de cet écosystème ?**

<sup>7</sup> L'action communautaire Forest Focus, développée entre 2003 et 2007, vise à surveiller de manière harmonisée, étendue, globale et à long terme l'état des écosystèmes forestiers européens. Elle se concentre notamment sur la protection contre la pollution atmosphérique et la prévention des incendies.

En savoir plus : [http://europa.eu/legislation\\_summaries/agriculture/environment/l28125\\_fr.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/agriculture/environment/l28125_fr.htm)

## II.4 Enjeux socio-économiques : vers une évaluation des services écologiques rendus

Une approche classique, l'analyse d'impact, effectuée conformément aux orientations de la Commission Européenne et sur la base des données disponibles, montre que la dégradation des sols pourrait coûter jusqu'à 38 milliards d'euros par an (Le Roux et al. 2008).

Par exemple, pour l'érosion, Léonard et al. (2009) estiment à 1 mm par an la quantité de sol perdue, soit environ 13 t/ha. Le coût de remplacement conduirait à une valeur moyenne de ce service d'environ 150 €/ha x an. Ce chiffre est cohérent avec celui cité par Le Bissonais et al. (2002) pour la viticulture alsacienne, à savoir un coût de 114 à 380 €/ha x an pour remonter régulièrement la terre en haut des pentes.

Une classification en trois catégories distingue 3 types de services écologiques et sociaux que rendent les agroécosystèmes (**Figure 3**).

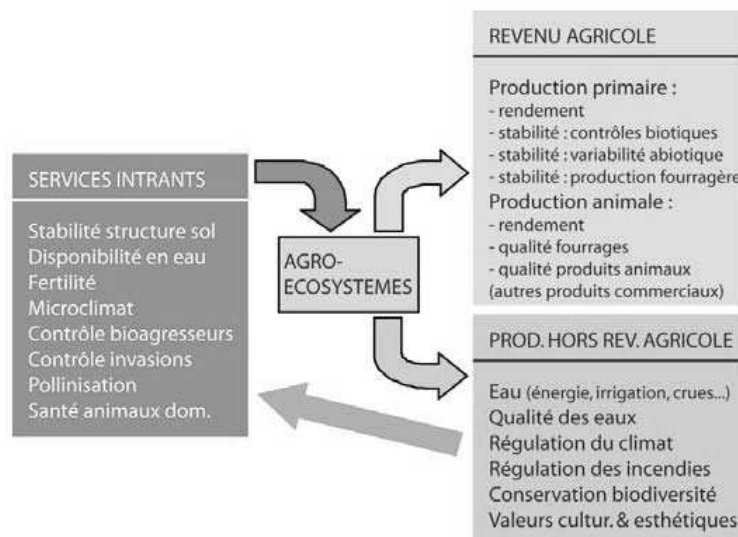


Figure 3: Schéma conceptuel de l'organisation des services des agroécosystèmes adopté pour ce chapitre (modifié d'après Zhang et al., 2007 in Le Roux et al. 2008).

1. Les services intrants : fourniture de ressources et maintien des supports physico-chimiques de la production agricole. Ils assurent la régulation biotique (polonisation, fertilité des sols...)
2. Les services de production : contribuent au revenu agricole
3. Les services produits hors revenu agricole direct tels que la séquestration de carbone ou la qualité des eaux.

La démarche d'analyse adoptée par l'ESCO (2008) consiste à examiner, pour chaque service écologique, les fonctions écologiques clés dont le service dépend, puis à évaluer les différentes composantes de la biodiversité dont ces fonctions dépendent (**Figure 4**).

Dans le cas du service de maintien de la fertilité des sols, les fonctions écologiques clés sont notamment la décomposition et la minéralisation de la matière organique du sol, et *in fine* la fourniture d'éléments minéraux aux plantes. Les composantes de la biodiversité impliquées sont les plantes et une majorité des organismes du sol (pédofaune, microorganismes).

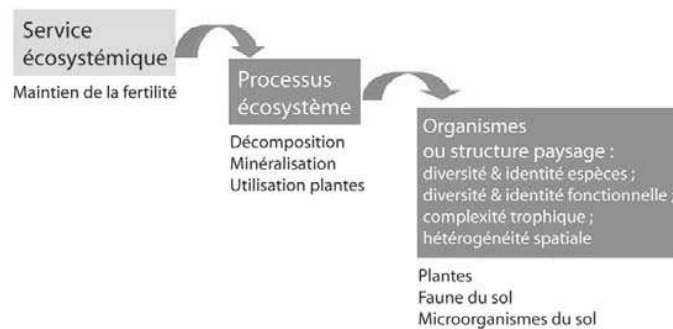


Figure 4 : Démarche d'évaluation d'un service rendu reliant services, fonctions et composantes de la biodiversité. Source : Le Roux et al. 2008

Dans notre synthèse une approche similaire pourrait être proposée pour évaluer le service écologique de séquestration de carbone par les systèmes agroforestiers par exemple.

**Extrait du Rapport Chevassus-au-Louis et al. 2009 – Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes**

« Par ailleurs, les sols, leur dynamique et leur biodiversité, sont longtemps restés le parent pauvre des recherches alors qu'ils sont nécessairement au carrefour de tous les flux environnementaux, et supports de fonctions, services et productions très importants et divers. Les changements d'affectation des sols sont un facteur très important de modification des fonctionnements naturels. Ils sont concernés par nombre de décisions liées aux activités économiques et entraînant des conséquences sur le long terme ».

Les différents services sont à considérer à des échelles très diverses : certains sont d'usage essentiellement local (ex : la qualité biologique des sols et son rôle dans la production agricole), d'autres sont d'usage régional (valeurs récréatives, qualité des eaux), d'autres sont à considérer au niveau global, comme la fixation du CO<sub>2</sub> (Chevassus-au-Louis et al. 2009). Costanza et al. (1997) rapportent une valeur comprise entre 1 et 3 fois le produit brut mondial pour la valeur des principaux services rendus<sup>8</sup> par l'ensemble des écosystèmes.

**Le sol est en effet un écosystème complexe est multifonctionnel.**

**Afin de faire le lien entre les enjeux de la protection et de l'aggradation des sols et l'évaluation de l'impact des systèmes agroforestiers, nous proposons ci-après une rapide description des constituants, propriétés et le cas échéant des indicateurs d'état du sol.**

<sup>8</sup> Les services pris en compte dans cette étude sont : la production de nourriture, de matières premières diverses, les usages récréatifs, l'approvisionnement en eau, mais aussi la régulation des climats, des gaz atmosphériques, du cycle de l'eau, la formation et le contrôle de l'érosion des sols, le recyclage des nutriments et la purification des effluents.

## LE SOL, UNE MATRICE VIVANTE

« La vitesse à laquelle le sol évolue en milieu cultivé est sans commune mesure avec l'échelle de temps de la pédogenèse. Les caractéristiques du sol (surtout des premiers décimètres) varient chaque année selon la nature des opérations culturales » (Bruand 2009).

Mais de quelles caractéristiques et propriétés parlons-nous exactement ?

### III.1 A la découverte du système sol

Le sol est un des compartiments essentiels de l'écosystème. Multifonctionnel, il est au carrefour de la lithosphère (roche mère), de l'hydrosphère et de l'atmosphère, sans oublier le monde du vivant, la biosphère. Dans tous les cas le sol est un système écologique et dynamique, qui présente une organisation interne (différents niveaux d'organisation spatiale) et externe (multiples fonctions) complexe (Figure 5) (Gobat et al. 2003).

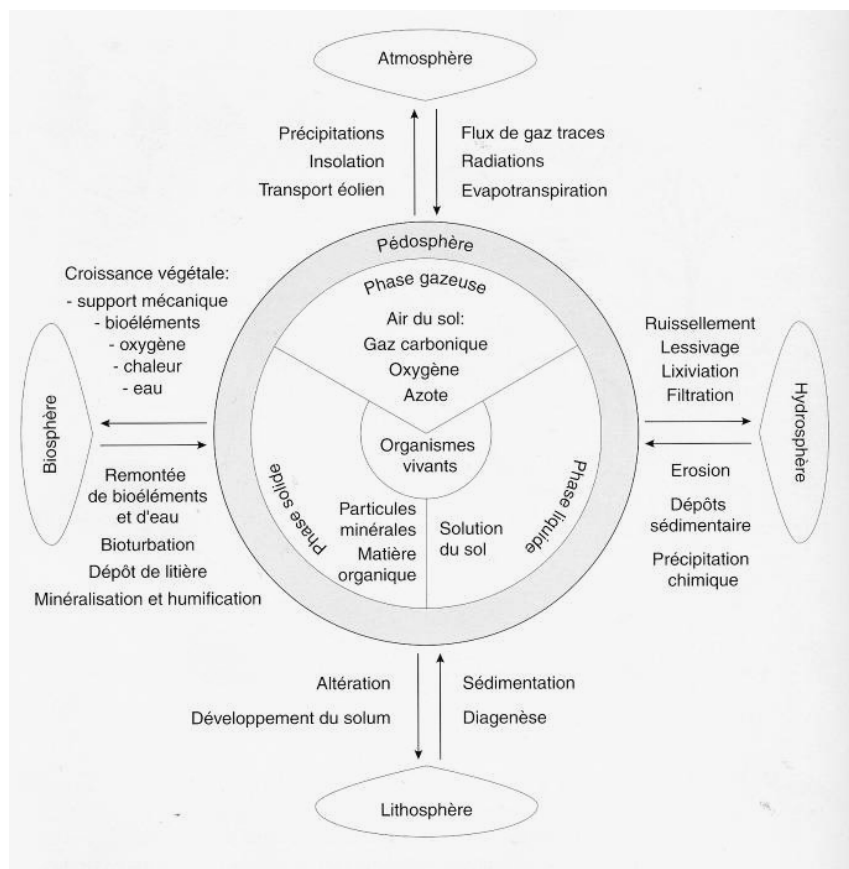


Figure 5: La complexité externe et interne du sol. Source : Gobat et al. 2003

Le sol s'organise à différentes échelles. La couverture pédologique résulte de la distribution de différentes couches ou horizons, eux-mêmes formés de fragments ou d'agrégats provenant de l'action conjuguée des cycles géochimiques et de l'activité des organismes vivants du sol. Sous nos climats tempérés, l'épaisseur du sol (de la roche mère jusqu'à la surface) s'étend de quelques décimètres à quelques mètres. En moyenne épais de 1 à 2 mètres, le sol est plus fertile dans sa partie superficielle appelé l'épisolum humifère (Gobat et al. 2003).

La couverture pédologique terrestre a mis plusieurs millénaires à se former, à partir des roches. La fragmentation, l'altération, les déplacements des minéraux de la roche conduit à la formation de minéraux secondaires (altérites) qui vont se lier intimement avec les matières organiques d'origine végétale et animale. Ensuite, l'activité biologique fait le reste :

concentration, migration, dissolution... elle est au cœur de la formation, de l'enrichissement et de l'évolution de sols (Bruand 2009).

Et c'est là l'originalité du système sol, cette propriété hybride : ni géologique, ni biologique.

#### **Notions – Définitions des termes 'sol' et 'fertilité'**

##### **Sol**

C'est le produit de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie, de l'atmosphère et des échanges d'énergie qui s'y manifestent » (Aubert & Boulaine 1980).

##### **Fertilité**

D'une définition réductrice de la fertilité dans les années 1960 -1970, se limitant à la dimension productrice du sol, on regroupe aujourd'hui sous le terme la fertilité, une approche chimique (fertilité minérale), mais aussi physique (état de structure) et biologique (activité microbienne par exemple). Soltner en 1996, la définit comme « l'aptitude d'un sol à produire toute la chaîne alimentaire allant des micro-organismes à l'homme, en passant par la plante et l'animal, et ceci pendant des générations ».

### **III.2 Des constituants élémentaires aux propriétés du sol**

#### **• Les constituants du sol**

Le sol est un milieu poreux constitué de trois phases : solide, liquide et gazeuse ; dont les proportions varient au cours du temps (Soltner 1996).

- Les constituants liquides qui représentent l'eau et les substances dissoutes
- Les constituants gazeux. On retrouve les même gaz que dans l'atmosphère (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>...) mais en proportions et concentrations différentes.
- Les constituants solides minéraux et organiques. Les premiers issus de la roches mère peuvent être de taille et de qualité minéralogique diverses et sont classés selon leur granulométrie. Les seconds, sont issus de la décomposition d'êtres vivants et constituent les matières organiques du sol.

#### **↳ Phase solide – Les constituants minéraux et organiques**

La désagrégation physique et l'altération biogéochimique des roches, sous l'influence de la température et des qualités des roches, forment les constituants minéraux. Cette phase solide occupe entre 40 et 70% du volume total du sol (Calvet 2003).

Les 93-95 % du poids total du sol proviennent de la fragmentation de la roche mère originelle en éléments grossiers (blocs, pierres, cailloux, graviers) et en terre fine (sables grossiers et fins, limons et argiles) (Davet 1996). Les argiles, produits d'altération des roches par hydrolyse de minéraux silicatés, ont de part leurs propriétés (notamment leur électronégativité et leur capacité de floculation/dispersion) un rôle central dans le sol et influence sa structure, sa porosité et sa capacité d'échange (Gobat et al. 2003)

De la litière à la matière organique humifiée (macromolécules organiques complexes), les déjections animales, exsudats racinaires, polysaccharides microbiens, débris végétaux morts, cadavres animaux, cellules microbiennes lysées...etc ; apportent au sol sa matière organique, qualifiée de « fraîche » par certains auteurs (Gobat et al. 2003) avant qu'elle ne se transforme en humus.

## Notions - Propriétés du complexe argilo-humique et de l'humus

### Humus

On regroupe sous le terme d'humus l'ensemble des constituants organiques du sol résultant de l'humification *i-e* du processus de transformation des matières organiques « fraîches » en composants organiques amorphes. Les matières organiques humifiées (acides fulviques, acides humiques...) partagent de nombreuses propriétés des argiles (dispersion/floculation, électronégativité, composés hydrophiles) et peuvent s'associer pour former des complexes argilo-humiques.

### Complexe argilo-humique

Une grande partie de la matière organique inerte du sol est associée à l'argile pour former des complexes très stables : les complexes argilo-humique (CAH). Rencontre intime entre le minéral et l'organique, le CAH est défini comme l'ensemble des constituants du sol constitués par l'association des molécules organiques humifiées et des argiles (Jabiol et al. 1995). De couleur brunâtre aux teintes noires, le complexe argilo-humique contribue à la fertilité des sols (stockage hydrique, capacité d'échange, ralentissement de la minéralisation de la matière organique humifiée, structure aérée et résistance à la compaction).

Les Matières Organiques du Sol (MOS) sont reconnues de longue date pour leur contribution à la fertilité chimique, physique et biologique des sols (Balesdent et al. 2005). L'appréciation du fractionnement des matières organiques en fonction de leurs liaisons aux constituants minéraux (MOS libre facilement minéralisable ou MOS liée stabilisée à évolution lente) ainsi que la cinétique de leur minéralisation, sont des paramètres importants dans l'étude de la fertilité des sols. Par ailleurs les MOS sont sources d'énergie et de nutriment pour les organismes hétérotrophes, il y a donc une relation étroite entre les teneurs en matières organiques et l'activité biologique des sols.

La création et la transformation de la matière organique fait intervenir tous les organismes présents à la surface ou à l'intérieur du sol. Cependant la litière souterraine (mortalité des racines, turn-over des racelles) est souvent majoritaire dans les apports de matières organiques au sol par rapport à la litière aérienne (feuilles, fruits, brindilles et autres débris végétaux). En effet, la production racinaire peut atteindre 10t/ha.an dans les forêts, soit 40-70% de la production primaire nette (Gobat et al. 2003).

**Dans un système agroforestier, ces caractéristiques (importance du pool de matière organique, fractionnement et cinétique de minéralisation) peuvent donc être des indicateurs d'état importants pour évaluer l'impact des arbres sur la fertilité organique du sol.**

### ↘ Phase liquide - Solution du sol

Le sol occupe une place centrale dans le cycle de l'eau, et inversement l'eau influe sur l'écosystème sol : dissolution de substances, activité biologique, nutrition des végétaux. On appelle solution du sol, l'ensemble constitué de l'eau et des substances qui y sont dissoutes. Elle constitue avec les gaz 30 à 60 % du volume total du sol (Lafolie 2009).

L'eau de gravité occupe de manière temporaire les pores les plus grands du sol. Elle circule au travers des compartiments sous l'effet de la pesanteur, des tensions superficielles...etc. La teneur en eau globale est soumise à des changements très rapides en fonction des précipitations.

### ↘ Phase gazeuse - Atmosphère du sol

L'air occupe dans le sol, les pores abandonnés par l'eau lors de son retrait. Sa quantité dépend donc d'une combinaison entre la texture, la structure et le taux d'humidité (Gobat et al. 2003). Cependant, à l'inverse de la phase liquide, les gaz du sol proviennent soit de l'extérieur (diffusion) soit du milieu lui-même. Bien que le rôle de l'atmosphère du sol soit

essentiel, notamment dans la régulation des échanges sol-atmosphère, son étude reste difficile en raison des variations saisonnières (activité biologique plus ou moins intense), de l'hétérogénéité du sol, des variations climatiques...etc.

On retiendra que la concentration en oxygène est bien moins importante que celle de l'air, au profit d'une concentration en gaz carbonique plus élevée (10 à 1 000 fois supérieure suivant les zones). (**Tableau 2**). La production moyenne de CO<sub>2</sub> dans les sols est de l'ordre de 15 t/ha/an, essentiellement due à l'activité microbienne.

Constituants	Air du sol (%)	Atmosphère extérieure (%)
Oxygène	18 à 20.5 en sol bien aéré 10 après une pluie 2 en structure compacte 0 dans les horizons réduits	21
Azote	78.5 à 80	78
Gaz carbonique	0.2 à 3.5 5 à 10 dans la rhizosphère	0.03
Vapeur d'eau	Généralement saturé	Variable
Gaz divers	Traces de H <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, Ar En anoxie : NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, CH <sub>4</sub>	1 (surtout Ar, autres traces)

Tableau 2 : Composition de l'air du sol et de l'atmosphère extérieure. *Source : Gobat et al. 2003*

- **Propriétés physiques : la texture et la structure du sol**

La texture est une propriété intrinsèque du sol qui reflète la part respective des constituants minéraux de la terre fine (< 2 mm) en fonction de leur taille. On parle de composition granulométrique. La texture est une propriété stable (évolution seulement à long terme) mais influence directement la structure du sol (Gobat et al. 2003) et donc son fonctionnement hydro-structural.

La structure, résultant de l'assemblage des micro- et macro-agrégats du sol, de l'activité biologique et des variations climatiques, varie quant à elle à court terme. Les agrégats sont un assemblage de constituants solides, minéraux et/ou organiques. La structure détermine d'abord la porosité et la circulation de l'eau dans les sols.

On peut étudier l'évolution de la structure et l'organisation des différentes couches de manière verticale et horizontale en étudiant le « profil cultural » d'une parcelle cultivée (Gautronneau et Manichon 1987). Cet outil vise à effectuer le lien entre les pratiques culturales et l'état de la structure du sol. D'autres tests, moins lourds en temps et en moyen, existent pour appréhender uniquement la structure d'un sol indépendamment des causes de sa formation : le « test bêche » (Ball et al. 2007) et le « drop test » (Sheperd 2000).

#### **Notion – Fonctionnement hydro-structural**

Le réseau des « vides » du sol, définit une architecture poreuse qui évolue et se déforme au cours du temps (Bruand 2009). Les pores du sol ont de multiples origines (structurales ou texturales) et sont classés en fonction de leur taille (de 0.2 µm à plus de 50 µm). La porosité nous renseigne sur les capacités hydriques ou atmosphériques d'un sol et s'exprime en pourcentage du volume total du sol. Elle varie de 30% dans des sols à texture très fine à 80 % dans les tourbes (Gobat et al. 2003).

Le régime hydrique est donc fonction de la texture (forces de rétention), de la structure (circulation de l'eau) et de la porosité (réservoir hydrique du sol).

D'autres paramètres peuvent être utilisés pour caractériser l'état d'un sol (pH, capacité d'échanges cationiques, échanges ioniques, potentiel d'oxydoréduction), mais regardons plutôt du côté des organismes vivants du sol : la microflore, la faune et leur rôle sur le fonctionnement biologique des sols.

### III.3 Les êtres vivants et leurs actions sur le fonctionnement du sol

Le sol n'est pas seulement un substrat physico-chimique, c'est aussi un support de vie, créatrice de matière organique.

« La notion de fonctionnement biologique du sol correspond à un système d'interactions entre différents compartiments de la couverture pédologique qui font intervenir un acteur biologique (faune ou micro-organismes ou racine), ces interactions induisant un certain nombre de fonctions écologiques, agronomiques ou environnementales de la couverture pédologique » (Cluzeau et al. 2005).

- **Les organismes du sol : de la mirco- à la macro-faune**

L'activité biologique du sol est étroitement liée à la biomasse, c'est-à-dire à la quantité de matière vivante présente dans le sol (Davet 1996). La composition qualitative et quantitative de cette biomasse et elle-même en étroite relation avec la nature physico-chimique et contribue à définir un sol. Il est possible de classer la faune et la flore du sol selon la taille des organismes (**Figure 6**).

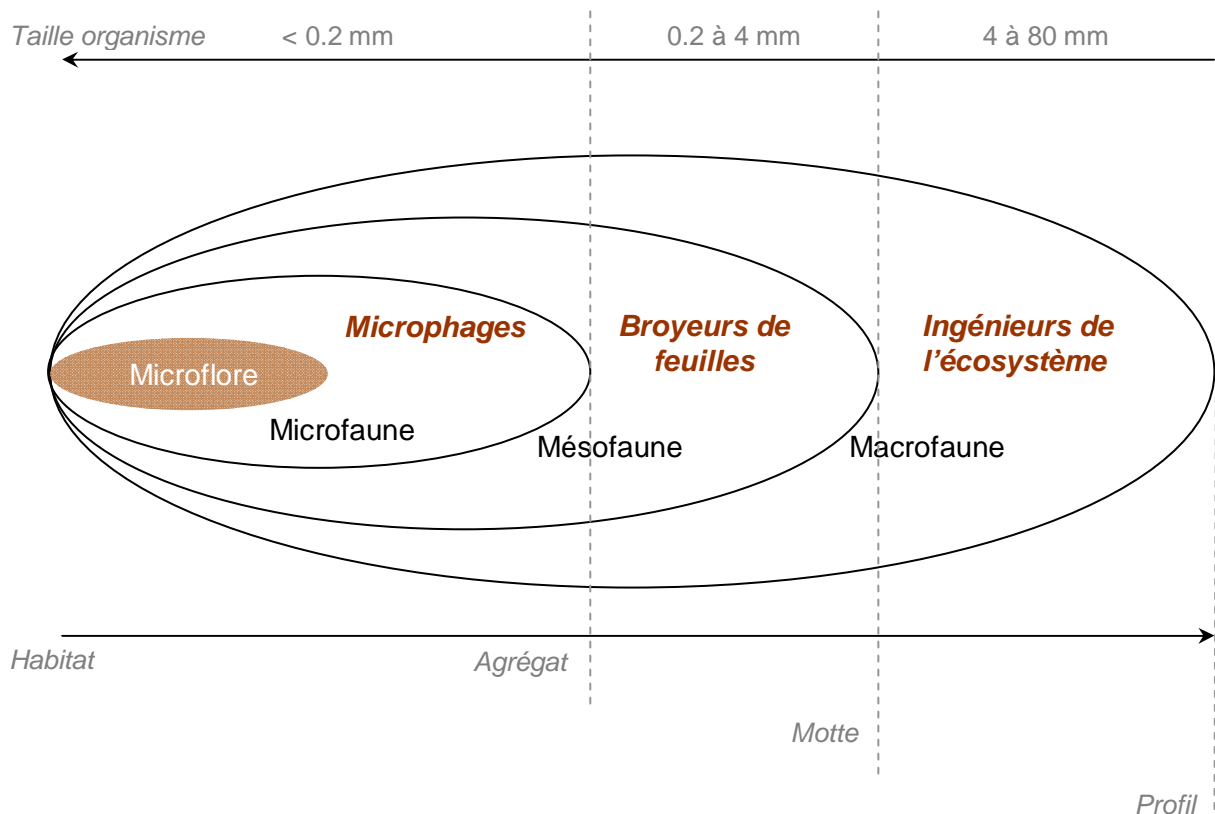


Figure 6 : Classification et rôle des organismes vivants dans le sol selon leur taille, leur habitat et leur fonction. Source : adapté de Girard et al. 2005

Chaque groupe évolue dans un habitat spécifique et a des impacts fonctionnels différents et complémentaires dans le recyclage et la transformation de la matière organique. La mésafaune et la macrofaune fragmentent et broient les matières organiques mortes fournissant de l'énergie sous forme de déjections à la microfaune saprophyte, elle-même

également microphage. La capacité d'un sol à biodégrader une grande diversité de molécules est directement reliée à la diversité de micro-organismes.

- **Microflore : bactéries, champignons et algues**

Le terme de microflore est « élastique » mais on retiendra qu'il nécessite 2 principales caractéristiques : des organismes de petite taille et un manque d'expression morphologique. L'étude de la microflore passe par des méthodes culturales ou moléculaires.

La diversité des micro-organismes du sol est immense : on compte par gramme de sol jusqu'à 10 000 souches différentes, dont 90 % sont encore inconnues (Girard et al 2005). Sans limitation des facteurs écologiques, comme la nutrition ou la prédation, les bactéries occuperaient le volume de notre galaxie (Gobat et al. 2003).

Les **bactéries** sont des êtres unicellulaires dont la taille est proche du micromètre mais dont la diversité et l'activité métabolique sont inimaginables. Les cellules bactériennes ont besoin de matériaux de base pour construire leur molécules organiques : du carbone, de l'azote, du phosphore, du soufre et d'autres éléments minéraux et facteurs de croissance. Dans les sols, la biomasse bactérienne est estimée à  $10^9$  germes vivants par gramme de sol soit 500  $\mu\text{g/g}$  pour une surface active de  $50\text{cm}^2$  (Gobet et al. 2003). Malgré une extraordinaire aptitude à coloniser tout les milieux, une espèce particulière de bactéries a ses propres exigences écologiques (température, pH). Dans le sol, on retrouve surtout des bactéries mésophiles (température optimale comprise entre 20 et  $40^\circ\text{C}$ ) et des pH neutres ou légèrement alcalins (Davet 1996).

Leur action sur la formation et l'évolution du sol est avant tout biogéochimique : minéralisation de la matière organique, solubilisation/précipitation de minéraux...etc ; mais agissent également sur la structure du sol de part leur contribution à la formation de micro-agrégat. Les bactéries sécrètent des composés organiques qu'on appelle « humine bactérienne », constituant à part entière de la matière organique humifiée (Gobat et al. 2003).

#### **Point méthodologique - Evaluation de la biomasse et activité microbienne**

Si la contribution de la flore tellurique à la qualité des sols est reconnue, l'étude des micro-organismes et de leur environnement, appelée l'écologie microbienne, est encore une science jeune et les méthodes de recherches sur la métagénomique<sup>9</sup> des communautés microbiennes tentent de contourner l'obstacle majeure à leur étude : 99% des bactéries sont récalcitrantes à la culture in vitro (Lemanceau et al. 2009).

Une approche conventionnelle pour l'étude de ce pool microbien du sol consiste à doser le carbone et l'azote organique après fumigation et d'évaluer le potentiel minéralisable d'un échantillon de sol (Wu et al 1990, Chaussod 1996). Les niveaux de biomasse microbienne et de son activité représentent ainsi des composantes majeures de la notion de fertilité.

*« La réduction expérimentale de la diversité microbienne d'un sol n'affecte pas sa fertilité (évaluée par la mesure de fonctions telles que la minéralisation et la nitrification) ; ce sont l'abondance ou la biomasse des microorganismes qui semblent constituer le facteur majeur pour la fertilité du sol »* (Leroux et al. 2008).

Girofles, bolets, cèpes, truffes, un régal d'automne ... Mais les **champignons** du sol ne se limitent pas à ces champignons comestibles. La grande diversité taxonomique et fonctionnelle de ces eucaryotes reflète leur importance dans l'écologie du sol. Les champignons sont des organismes hétérotrophes filamenteux (ou hyphes) et immobiles. Les hyphes sont des tuyaux plus ou moins larges (2 à 15 microns) formant un réseau mycélien

<sup>9</sup> Le métagénome est l'ensemble des génomes des populations bactériennes d'un milieu donné. La méthode utilisée pour l'analyser — la métagénomique — consiste à étudier collectivement les gènes, sans les détailler individu par individu.

dans le sol. On peut dénombrer jusqu'à 1 000 m d'hyphes par gramme de sol ! (Davet, 1996). Les champignons ont des modes de reproduction sexuée (fusion de noyaux haploïdes et formation d'un zygote) ou asexuée (formation de spores). Beaucoup de champignons du sol ont recours à ce dernier mode de propagation. La dissémination est alors assurée par la microfaune et les eaux de pluies.

Les champignons participent à la dégradation de la litière et à sa transformation en humus, participent à la stabilité structurale du sol à travers leur structure mycélienne ramifiée qui assure une cohésion particulière dans les couches superficielles du sol (Gobat et al. 2003).

### *Zoom sur ...*

#### *Les symbioses mycorhiziennes : un jeu gagnant-gagnant*

Le terme "mycorhize", composé du Grec "mykos" (= champignon) et du Latin « rhize » (= racine) désigne l'association symbiotique entre un champignon et une racine. Tous les Gymnospermes terrestres, près de 85% des Angiospermes et une partie des Ptéridophytes (Fougères, Prêles) sont mycorhizés, ce qui représente 95% des plantes vascularisées (Davet 1996). Les champignons impliqués dans de telles associations sont telluriques et appartiennent aux Basidiomycètes (Bolets, Lactaires...), aux Ascomycètes (Truffes) et aux Gloméromycètes (Lemanceau et al. 2005). Le champignon fournit des substances difficilement accessibles par la plante (translocation de sels minéraux) en contrepartie la plante-hôte fournit le « gîte et le couvert » (développement sur les racines et apport de matières carbonées). Les 2 principales formes de symbioses mycorhiziennes sont les ectomycorhizes (cas de l'association chêne-truffe par exemple) et les endomycorhizes. Ces dernières se forment chez 80 % des espèces végétales (Girard et al. 2005), on les retrouve chez la majorité des arbres fruitiers et la plupart des essences forestières non ectomycorhiziennes comme le merisier, le noyer, l'érable, le frêne.

Les endomycorhizes à arbuscules et vésicules (VAM) sont les plus communes et les plus anciennes. Les Champignons impliqués sont des Zygomycètes (Ordre des Glomales). Après germination des spores, l'hyphes infectante pénètre dans les assises corticales de la racine et forme des ramifications à l'intérieur même des cellules : les arbuscules. Des vésicules volumineuses et riches en lipides et en calcium se différencient le long des hyphes. La présence de VAM se traduit par une ramification plus abondante de racines. Alors que la longueur moyenne d'un poil absorbant est de l'ordre du millimètre, le réseau mycélien s'étend jusqu'à 8 cm de la racine voire plus (Davet 1996).

L'étude de la caractérisation des spores endomycorhiziens par morphotypage et comptage après extraction du sol (Trouvelot et al. 1986) nous renseigne sur le potentiel endomycorhizien du sol et donc sa capacité à former des associations symbiotiques bénéfiques pour la plante, que ce soit sur des grandes cultures ou des plantes ligneuses (Plenchette et al. 1981 and 1983, Letacon et al. 1997).

Bleues, vertes, jaunes-vertes les **algues**, organismes vivants unicellulaires, sont souvent abondantes dans le sol, généralement localisées en surface ou dans de larges fissures. Photosynthétiques, elles colonisent rapidement les surfaces minérales et participent à leur altération. On estime que 40 à 50 % des algues du sol sont ainsi des hétérotrophes facultatives, et donc capables d'utiliser des sources organiques de carbone. A l'instar des bactéries, les algues participent à la cohésion des particules du sol à travers la production de polysaccharides. Malgré des écarts surprenant, on compte entre 100 et 10<sup>9</sup> individus par gramme de sol (Davet 1996).

- **La pédofaune : catégories, rôles et habitats**

- ↳ **Macrofaune et mégafaune**

La macrofaune regroupe les animaux d'une longueur allant de 4 à 80 mm, au-delà on parle de mégafaune (mammifères, reptiles ou certains lombrics géants). Premier compartiment de la chaîne de décomposition, leur rôle dans le sol se situe à l'échelle d'un profil. On retrouve dans ce groupe des Annélides (ex : lombrics), des Mollusques (ex : limaces), l'embranchement des Arthropodes comme les cloportes (Crustacés isopodes), des opilions

(Arachnides) et les Hexapodes (ou Insectes) : fourmis (Hyménoptères), carabes – Coléoptères), courtilières (Orthoptères)... etc. Ces 2 catégories d'animaux ont une action physique directe sur la structure du sol : brassage, aération, fragmentation et formation d'agrégats.

#### **Zoom sur ...**

##### **Les Lombriciens : ingénieurs de l'écosystème sol**

Les Lombriciens (Annélides oligochètes) ont une taille variant de quelques centimètres à 2 ou 3 mètres, la plupart mesurant 5 à 15 cm. Les vers de terre dominent en biomasse la macrofaune du sol. Leur densité peut atteindre  $10^6$  / ha et leur biomasse 4 t/ha (Cluzeau et al. 2005). Les Lombriciens parcourent les différents horizons selon un mode de progression spécifique dit « tunnelier ». Ils forent des galeries en passant dans les interstices ou en ingérant la terre et en l'évacuant sous forme d'excréments. L'influence des vers de terre n'est pas la même selon les espèces. On distingue 3 catégories selon des critères morphologiques, physiologiques et écologiques (Bouché 1972), représentant d'ailleurs 3 pôles évolutifs (Capowiez 2009) :

- vers épigés qui vivent dans la litière et induisent une dégradation rapide de celle-ci.
- vers endogés qui vivent dans le sol se nourrissent de matières organiques et construisent et communiquent par galeries (0-20 premiers cm)
- vers anéciques qui se nourrissent de matières organiques à la surface et participent à son enfouissement en creusant des galeries verticales profondes (plusieurs mètres) utiles à l'infiltration de l'eau.

Les Lombriciens agissent sur certains phénomènes physiques, chimiques et biologiques dans le sol. Par ses activités de bioturbation les vers de terre influencent à la fois la porosité du sol et donc l'écoulement de l'eau et les transferts de gaz (Bouma 1991) mais aussi les activités microbiennes (Jégou et al. 2001). De récentes études (Bastardie et al. 2002) sur la modélisation en 3 dimensions des bioporosités et leur effet sur le fonctionnement hydraulique du sol devraient nous permettre de mieux comprendre les facteurs explicatifs de la perméabilité des sols due à l'activité de bioturbation des Lombriciens.

Les peuplements de vers de terre varient en qualité et en quantité selon la nature des sols (Gobat et al. 2003). Les vers sont considérés comme des bio-indicateurs écologiques et de perturbations mais aussi comme outils de gestion des agrosystèmes (Cluzeau et al. 1999) car ils reflètent l'impact des pratiques agricoles de part leur sensibilité aux changements du milieu : quantité, type et localisation de la matière organique dans le sol, fonctionnement hydro-structural du sol, travail du sol. Ce sont des ingénieurs de l'écosystème sol. Ils modifient les habitats de la microflore et des racines et accroissent la disponibilité et l'accessibilité des ressources à différentes profondeurs du solum (Jones et al. 1994). Plusieurs études montrent que l'apport de matières organiques a un effet sur l'abondance et la diversité des populations lombriciennes, notamment en sols viticoles (Cluzeau et al. 1994, Peres et al. 1998).

#### **↳ Mésofaune**

Acariens, némathelminthes, collembolés et autres insectes aptérygotes appartiennent quant à eux à la mésofaune du sol, une catégorie d'animaux dont la taille est intermédiaire, comprise entre 0.2 et 4mm. Leur niche écologique se situe plutôt à l'échelle de la motte (Girard et al. 2005). Acariens et Collembolés sont les plus abondants des microarthropodes du sol même si leur biomasse (quelques grammes/m<sup>2</sup>) n'est pas à la hauteur de leur abondance qui peut atteindre un million par mètre carré dans un sol brun (Deprince 2003). Microphage, saprophage ou carnivore la mésofaune du sol joue un rôle essentiel dans la fragmentation des litières et la transformation de la matière organique du sol, préparant le terrain pour la microflore et notamment les champignons.

#### **↳ Microfaune**

Majoritairement microphages (consommateurs de matières organiques, algues, bactéries, spores de champignons), ces animaux sont de très petites tailles (< 0.2mm ou de diamètre <

0.1mm) et se rencontrent généralement à l'échelle de l'agrégat (Gobat et al. 2003). Plutôt aquatiques on les retrouve, comme les Nématodes (vers ronds), dans les pellicules d'eau retenues par le complexe argilo-humique (eau interstitielle), surtout présent dans les 10 à 20 cm supérieurs du sol (Davet 1996). Les Protozoaires dans le sol se comptent en centaines de millions par mètre carré (Deprince 2003). Si les protozoaires se nourrissent exclusivement de bactéries et régulent donc leur pullulation, les nématodes ont des régimes alimentaires plus variés et peuvent s'attaquer aux végétaux supérieurs et occasionner des dégâts aux niveaux des racines.

#### Zoom sur ...

##### Les Cloportes

De 5 à 20 mm, le corps ovale et aplati, le cloporte est un fragmenteur et un transformateur de litière de première classe. Ils sont phyto-saprophages (feuille, bois mort) et appartiennent au premier compartiment de la chaîne de détritux (Gobat et al. 2003). Ils vivent dans la litière et les annexes du sol (bois mort, cadavres, bouses, tas de cailloux). En zone tempérée, dans un sol brun non cultivé on en trouve en moyenne une centaine/m<sup>2</sup> (Deprince 2003). La consommation de la litière (feuilles sèches) par les cloportes a été estimée, par le laboratoire Ecologie, Evolution, Symbiose de Poitiers, à 210 kg/ha/an, dont 160 kg retournent au sol sous l'état de boulettes fécales. L'importance de la participation des cloportes au recyclage de la matière organique fait de cette espèce un acteur principal de la faune du sol et donc un bio-indicateur écologique intéressant dans l'étude du fonctionnement biologique des sols (Paoletti and Hassall 1999, Souty-Grousset et al. 2005).

## 4

## L'ARBRE ET LE SOL : QUELLES INTERACTIONS ?

Dans de nombreux agro-écosystèmes traditionnels, que ce soit en milieu tropical, méditerranéen ou tempéré, la composante arborée, qu'elle soit sous forme de haie, d'alignements, de haie brise vent, d'arbres isolés, et même de forêt cultivée ; fait partie intégrante du système de production (fourniture de bois, de fruits et d'autres produits ou services) mais participe aussi sa stabilité. A travers de nombreuses interactions biophysiques, l'arbre agit sur le sol, directement à travers son enracinement, mais aussi indirectement à travers la litière et l'ombrage que procurent sa canopée, les habitats et les cortèges d'insectes qui lui sont spécifiques.

### IV.1 Les systèmes agroforestiers

En agroforesterie, tout se complique. Le sol, objet d'étude complexe en soi, va être modifié par la présence d'arbres. De nombreuses études traitent des effets de l'agroforesterie sur le cycle des nutriments, principal thème de recherche développé depuis les années 1980 et le début de la recherche internationale coordonnée en agroforesterie. Mais au-delà des aspects physico-chimiques, la fertilité du sol est, comme nous l'avons vu précédemment, déterminée par d'autres facteurs, tels que la biodiversité ou l'apport de matières organiques fraîches.

S'inspirant des expériences en milieu tropical, nous aborderons plusieurs thèmes dans ce chapitre :

- la séquestration du carbone dans la biomasse et le sol
- la biodiversité des sols agroforestiers
- et l'évaluation des services rendus

- Enseignements des expériences tropicales

Malgré l'augmentation de la démographie, la composante arborée reste dans de nombreux paysages agricoles tropicaux un élément crucial et naturel des paysages agricoles. Les utilisations de l'arbre sont multiples. Ils produisent un panel de produits directement utiles (bois de construction, de chauffage, fourrage, fruits, graines, produits médicinaux.. etc.) mais fournissent aussi des services non « visibles », non moins importants, tels que le maintien et la régénération de la fertilité du sol à travers l'action des litières aériennes et racinaires et donc des niveaux de matière organique dans le sol (Figure 7) (Young 1995).

La recherche internationale en agroforesterie, à travers l'ICRAF<sup>10</sup> (International Centre for Research in Agroforestry), s'est investie dans cette thématique de recherche, pour essayer de comprendre les mécanismes de conservation et d'amélioration de la fertilité des sols par les arbres. Même si certains processus sont difficiles à quantifier, l'agroforesterie tropicale est reconnue pour son action sur les composantes physiques (structure du sol, capacité d'infiltration et de rétention), chimiques (cycle des nutriments et en particulier celui de l'azote en lien avec l'intégration d'arbres légumineux) (voir notamment Nair et al. 1999 et Dommergues et al. 1999) et biologiques des sols (production et transformation de la matière organique) (Schroth and Sinclair 2003, Buck et al. 1999).

De multiples techniques agroforestières ont été expérimenté, et notamment l'utilisation d'arbres fixateurs d'azote (comme le désormais célèbre *Leucaena leucocephala*), dont la vigueur et la productivité de biomasse ont parfois fortement impacté les productions intercalaires et augmenté les temps de travaux requis (de 30 à 120 jours/an/ha) pour la taille et l'entretien de ces haies (ICRAF 1996).

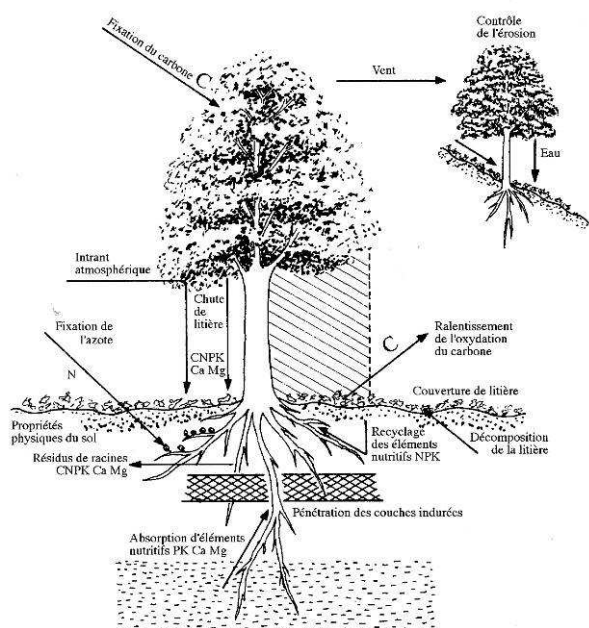


Figure 7: Amélioration du sol par les ligneux.  
Source : Young 1995

façon traditionnelle. Des résultats similaires ont été rapportés par Roose (1994) en pays Bamileke au Sud –Ouest Cameroun pour des temps de travaux « raisonnables » (10 à 30 jours par an d'entretien).

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 (Sanchez et al.1999). Elle a un grand potentiel de restauration de terres dégradées, de séquestration de carbone et pourrait être une opportunité de développement et de création de ressources économiques pour les pays du Sud dans la

Ces techniques, largement développées par les organismes de conseil et de développement en Asie, n'ont eu que peu d'échos auprès des populations paysannes en dépit de résultats intéressants expérimentaux en station en termes de production de biomasse, de fixation/restitution d'azote et de gains de rendements (Van Noordwijk and Verbist 2004). D'autres techniques, employées en tant que stratégies antiérosives, ont cependant fait leur preuve au sein d'agroécosystèmes tropicaux humides. König (2007) dans un essai à long terme au Rwanda (1985 – 2007) rapporte que grâce au développement rapide des haies vives, l'érosion a été réduite à moins de 12 tonnes par hectare et par an depuis la deuxième saison après plantation et à moins de 3 t/ha/an depuis la cinquième année après la plantation, c'est-à-dire à moins de 1,5% des pertes sur la parcelle témoin cultivée de

<sup>10</sup> Site internet : [www.worldagroforestry.org](http://www.worldagroforestry.org)

lutte contre le changement climatique (Nair et al. 2009<sub>a</sub>). Ces pays sont en effet capables, grâce à leurs vastes ressources agricoles et leur pratiques agroforestières, de vendre ce carbone séquestré aux pays industrialisés ((Voir la Synthèse « L'agroforesterie : Outils de Séquestration de Carbone en Agriculture »<sup>11</sup>).

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*<sup>12</sup>) qui sont définies dans le LULUCF des accords de Marrakesh.

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.

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<sub>b</sub>, suggèrent des valeurs de séquestration de carbone dans le compartiment du sol<sup>13</sup> 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.

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.

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

**Les systèmes agroforestiers tropicaux pourraient donc contribuer à la production de biomasse, à l'amélioration de la fertilité des sols tout en piégeant du carbone dans le sol. Mais qu'en est-il des systèmes agroforestiers tempérés ? Sont-ils aussi efficaces ?**

<sup>11</sup> Pour plus d'information sur le marché du carbone et l'utilisation de l'agroforesterie comme outils de séquestration du carbone en France, consultez la synthèse complète à l'adresse suivante : <http://www.agroforesterie.fr/CASDAR/20092011/casdar0911.html>

<sup>12</sup> 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).

<sup>13</sup> Potentiel de séquestration de carbone jusqu'à 1 m de profondeur

- **Séquestration de carbone dans la biomasse et le sol en système agroforestier tempéré**

Quelle part de carbone est piégée dans la biomasse de l'arbre (carbone remis à disposition à moyen long terme) et dans le sol (carbone stocké à long terme) ? Ce potentiel moyen est encore à préciser mais nous pouvons aujourd'hui proposer les premières estimations (*Voir la Synthèse « L'agroforesterie : Outils de Séquestration de Carbone en Agriculture »*)

Le rapport de l'expérience collective de l'INRA sur le stockage de carbone dans les sols français faisait déjà état de ce manque de connaissance concernant l'agroforesterie. Si l'agroforesterie fait partie des questions auxquelles l'expertise devaient répondre, les estimations de ce potentiel de stockage pour les parcelles agroforestières à sont encore aujourd'hui inexistantes en France. Dans cette étude, seules les données (flux net annuel pour un scénario à 20 ans) pour les haies (0.1 tC/ha/an) et le boisement de terres cultivées (0.44 tC/ha/an) sont disponibles (Arrouays et al. 2002).

**Extrait – Expertise Scientifique Collective Sol (2002)**

« Nous devons en particulier examiner les potentiels de stockage liés à des changements d'usage ou de pratique généralement réputés favoriser le stockage du carbone : l'augmentation de la surface forestière, qu'elle soit volontaire ou issue des accrus en zone de déprise agricole ; l'agroforesterie ; l'augmentation de la surface toujours en herbe par conversion de terres cultivées ; la mise en place de haies ; les techniques simplifiées de travail du sol et le semis direct ; l'utilisation d'amendements organiques de diverses origines... »

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 3**).

Pratique agroforestière	Surface estimée (en millions d'hectares) <sup>14</sup>	<sup>15</sup> 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 <sup>16</sup>	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
<b>TOTAL</b>		<b>90.3</b>

**Tableau 3: Estimations du stockage potentiel de carbone grâce aux pratiques agroforestières aux USA d'ici 2025. Source : 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

<sup>14</sup> Surface actuellement ou potentiellement converties

<sup>15</sup> 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.

<sup>16</sup> Surface cultivée exposée, dont 5 % à planter en haies brise-vent

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 Ressources<sup>17</sup>).

Outre Atlantique, 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 épicea-orge comparé à un flux négatif de - 2.9 tC/ha/an pour l'orge en culture pure.

<sup>17</sup> Consultable en ligne : [www.unl.edu/nac](http://www.unl.edu/nac)

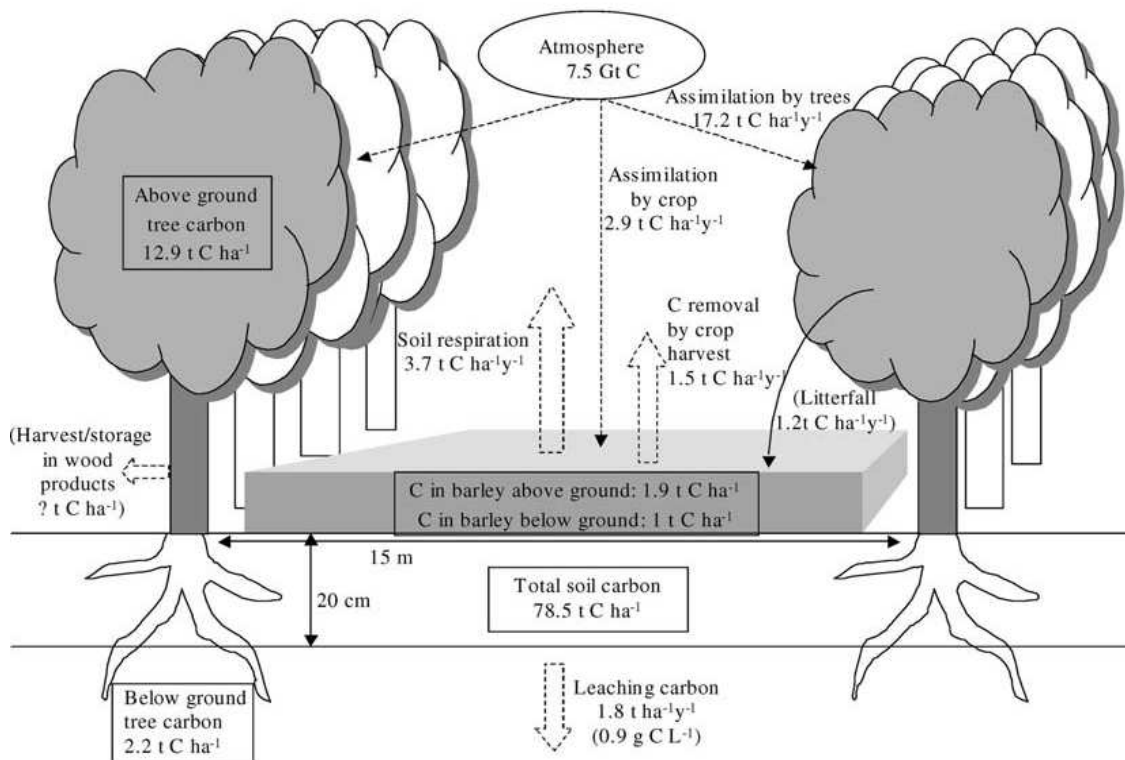


Figure 7 : Modèle de tous les pools et flux de carbone dans une parcelle agroforestière de peuplier âgée de 13 ans – Station expérimentale de Guelph, Ontario (Canada). Source : Peichl et al. 2006

### 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.

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 8 : 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 2008<sup>18</sup>) 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.

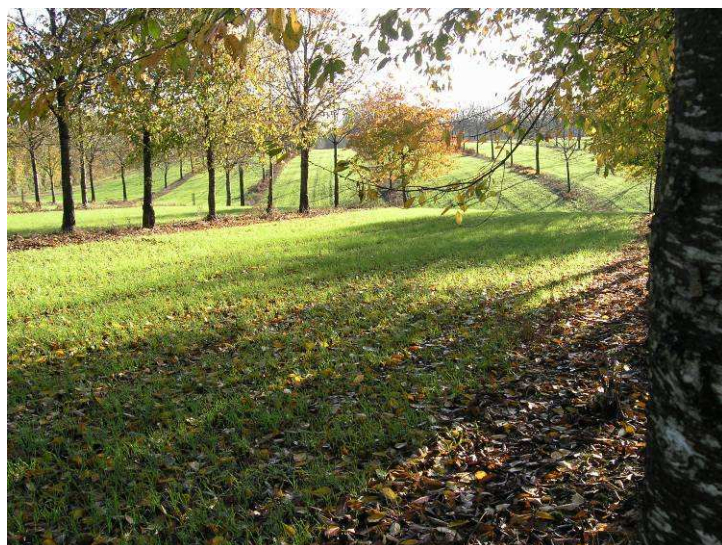


Figure 9 : Parcelle agroforestière de noyers et merisiers de 30 ans (Charente Maritime). *Crédit photo : F. Liagre*

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

<sup>18</sup> Disponible en ligne à l'adresse : <http://agroforesterie.fr/CASDAR/20062008/casdar0608.html>

et al. 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.

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 10 : 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 4 : 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 et al. 2009) et entre 5 et 10 fois plus que les Techniques Culturelles Simplifiées (0.3 tC/ha/an) (TCS 2009).**

- **Biodiversité des sols agroforestiers : quelles différences ?**

Les racines des arbres agroforestiers ont un enracinement plus profond (Mulia and Dupraz 2006) et un effet décompactant (meilleure circulation de l'air et de l'eau) favorisant le stockage de carbone du sol et alimentant également toute la chaîne biologique du sol (Cadisch et al. 2004; Dougherty et al. 2007; Duchemin 2007). D'autre part, la combinaison des arbres et des cultures fournit à la fois une plus grande richesse et une plus grande complexité de niches écologiques, dans le temps et l'espace, que les cultures annuelles (Stamps and Linit 1998, Jose et al. 2004). L'agroforesterie contribue à la connectivité des habitats (dispersés ou dégradés) par la création de corridors biologiques participant ainsi à la conservation faunistique et floristique des espaces sensibles (Jose 2009). On pourrait aussi espérer obtenir plus de diversité d'auxiliaires et réduire ainsi les problèmes phytosanitaires des cultures.

L'expertise collective de l'INRA sur la biodiversité mentionne l'agroforesterie moderne (**Tableau 5**) comme système agricole permettant l'accroissement de la diversité végétale mais reconnaît le manque de recherche sur la biodiversité (Le Roux et al. 2008). Cette recherche est encore moins « poussée » si l'on considère uniquement la microflore du sol et la pédofaune.

<b>Choix de techniques d'aménagements et systèmes</b>	<b>Agroforesterie moderne</b>
<b>Objectifs affichés</b>  <i>(de biodiversité / environnement et agronomiques)</i>	Augmenter la productivité totale de la parcelle (biomasse) en combinant arbres et cultures tout en créant des bénéfices environnementaux dont biodiversité
<b>Réussites rapportées</b>	Systèmes agroforestiers traditionnels (Dehesas, vergers traditionnels...) reconnus pour leur valeur paysagère et biodiversité ; mais l'agroforesterie moderne est au stade expérimental (agriculteurs novateurs) : effets environnementaux établis (réduction des nitrates, de l'érosion), moins de recherches sur la biodiversité
<b>Freins majeurs identifiés</b>	Régulations et subventions mal adaptées à de tels systèmes ; investissement à long terme nécessaire de la part des agriculteurs ; itinéraires techniques encore mal connus
<b>Démarche d'adoption paraissant pertinente</b>  <i>(techniques à promouvoir, mesures incitatives ou d'accompagnement)</i>	Nécessaire vulgarisation afin de promouvoir ces systèmes, adapter les régulations et mécanismes de soutien (ne pas défavoriser l'agroforesterie par rapport à l'agriculture en monoculture),

**Tableau 5: Exemple de techniques agricole et ou d'aménagements des espaces agricoles favorables à la biodiversité – Partie « Accroissement de la diversité végétale intra-parcellaire ». Source : Le Roux et al. 2008.**

**Extrait - Expertise Scientifique Collective Biodiversité (2008)**

« Les éléments non productifs inclus dans ou jouxtant les parcelles jouent un rôle clé pour la biodiversité dans les paysages agricoles en tant qu'habitat, corridor pour les mouvements, et/ou refuge saisonnier pour de nombreuses espèces. Ils augmentent la diversité végétale et la diversité des insectes auxiliaires. Leur rôle a été moins étudié pour la faune du sol, mais il semblerait qu'ils soient des refuges pour certaines espèces comme des collemboles et des vers de terre. Les bords de champs jouent un rôle particulièrement important dans la dynamique de population de nombreux auxiliaires et participent à maintenir l'abondance et la richesse spécifique de ces espèces ».

La recherche Canadienne a étudié l'abondance et la diversité des arthropodes sur le site de Guelph (Ontario) pendant plusieurs années (Thevasthasan and Gordon 2004). Les études montrent que certains taxons comme les Opilions, les Carabidae ou certains détritivores sont

plus abondants en agroforesterie comparé au témoin agricole sans arbres (Figure 11). Les auteurs expliquent ces effectifs plus importants par des niveaux de matières organiques plus élevés et la présence de zones ombragées en agroforesterie.

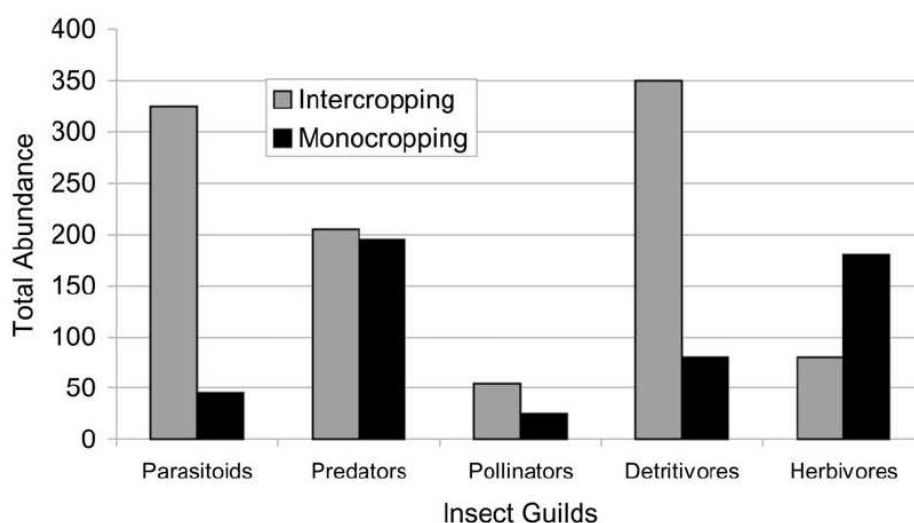


Figure 11 : Abondance totale des arthropodes en juin 1999 dans le témoin agroforestier (arbres âgés de 12 ans) et dans le témoin sans arbre. Site de Guelph, Ontario, Canada. Source : Middleton 2001

D'autre part, on remarquera que même si l'abondance de parasitoïdes est plus élevée en agroforesterie, celle-ci est compensée par un meilleur ratio parasitoïdes/herbivores, laissant supposé une meilleure régulation par lutte biologique (Middleton 2001). Au Royaume Uni, des résultats similaires ont été rapportés : l'abondance et la diversité des arthropodes terrestres sont plus élevées en système agroforestier (à la fois dans la bande d'arbres et dans l'allée cultivée) que dans le témoin agricole (Peng et al. 1993, Burgess 1999).

A une échelle plus fine, aux Etats Unis, les recherches sur la diversité fonctionnelle des populations microbiennes indiquent qu'il existe une distribution spatiale des propriétés microbiennes, dans les systèmes agroforestiers en couloir âgés de 21 et 12 ans (parcelles de Noyer de Pécan et d'Erable respectivement), qui serait due au type de litière et au microclimat (Mungai et al. 2005). La microflore est différente aux pieds des arbres comparée à celle au milieu de l'allée cultivée, ce qui influence le cycle des nutriments et nécessiterait une gestion appropriée des nutriments pour maximiser la productivité des parcelles. Lacombe et al. (2009) ont trouvé que la diversité microbienne ( $\beta$ -diversité<sup>19</sup>) était significativement supérieure dans le témoin agroforestier que dans le témoin sans arbres, sur le site de St Rémi au Québec (plantations de Peupliers hybrides, Noyers noirs et Frênes d'Amérique âgées de 9 ans).

Les populations de champignons mycorhiziens varient elles aussi en agroforesterie. D'après de récentes études (Chiffot et al. 2009), la diversité des champignons mycorhiziens à arbuscules seraient plus importante sur les peupliers agroforestiers (intercalés avec une culture de soja) que sur des peupliers forestiers. La répartition des spores dans le sol varie également en fonction du système étudié : en agroforesterie l'abondance des spores augmente en s'éloignant de la ligne d'arbres alors qu'elle reste relativement constante dans le témoin agricole. L'agroforesterie pourrait donc améliorer la richesse des champignons mycorhiziens à arbuscules comparé à une monoculture. D'autres expériences, sur ce thème de recherche sont menées par le Centre de recherche d'agrosylviculture de l'Université de Guelph<sup>20</sup> (Canada). L'analyse préliminaire des données indique une abondance et des

<sup>19</sup> La diversité  $\beta$  compare le nombre de taxons qui sont unique à chacun des écosystèmes étudiés

<sup>20</sup> Résultats de recherche du projet « Bénéfices environnementaux et économiques des systèmes agroforestiers avec cultures intercalaires ». Ce projet a été financé par une subvention de Projet Stratégique du CRSNG pendant une période de trois ans (2006 à 2009). Voir le rapport de transfert technologique 2009 disponible en ligne :

variations plus importantes des communautés de champignons mycorhiziens à arbuscules dans un système agroforestier comparativement à une monoculture. Lee and Jose (2003) rapportent également une biomasse microbienne et des taux de matières organiques supérieurs dans le témoin agroforestier comparé à la monoculture de coton, dans le sud des Etats-Unis.

### *Zoom sur ...*

#### *Les Lombriciens en Agroforesterie*

L'hypothèse de base en agroforesterie est que l'apport de matières organiques fraîches (résidus des cultures annuelles, litières aérienne et souterraine), ainsi que la modification du microclimat due à l'ombrage des arbres, pourraient modifier l'abondance, la biomasse, la diversité et l'activité des vers de terres.

Price and Gordon (1999) ont évalué la répartition et l'abondance des vers de terres dans une parcelle agroforestière composée de 3 espèces différentes (peupliers, érables et frênes blancs) au cours de l'année 1997. Les auteurs indiquent des différences significatives de biomasse et de densité lombriciennes entre les trois essences. Ils observent également un gradient décroissant d'abondance partant de la ligne d'arbres (182 individus/m<sup>2</sup>) et allant vers le milieu de l'allée : 117 et 95 ind./m<sup>2</sup> pour une distance de 2 et 6 mètres respectivement. Ce résultat s'explique par une forte corrélation entre les taux de matières organiques et l'activité des vers de terre, notamment mise en évidence dans des plantations de peupliers (Park et al. 1994). Bien que le nombre de vers de terre soit moins important en été qu'au printemps, les populations lombriciennes sont significativement supérieures à celle d'une parcelle agricole (Thevathasan and Gordon 2004).

En France, les récents travaux du CASDAR<sup>21</sup> Agroforesterie, ont fourni quelques éléments concernant la pédofaune et la fertilité des sols agroforestiers. Ces résultats, sont issus d'une étude menée sur une année (2007) sur 2 sites en France (Charente Maritime et Gard) (CASDAR 2007).

Pour les vers de terre, il semblerait que la structure du peuplement soit orientée vers une communauté épigée plus importante en milieu agroforestier, peut être en raison de l'abondance relative de résidus végétaux (litière des arbres).

Le suivi des détritivores a montré des effectifs plus importants en milieu agroforestier, bien qu'une grande disparité en terme d'abondance apparaissent entre les 2 sites. Les niveaux de matières organiques sont à corrélés avec l'abondance des détritivores.

Pour les organismes prédateurs, si la structure (composition en espèces ou en familles) diffère suivant le milieu, aucune différence significative n'a pu être mise en évidence entre le milieu agricole et le milieu agroforestier. Il semblerait que les Carabidae soient plus abondants en milieu agricole, alors que les aranéides sont plus présents dans le système agroforestier.

**Ces quelques études mettent en avant le besoin d'un suivi dans le temps, d'avoir plus de répétitions et d'approfondir le niveau de détermination (notamment pour les coléoptères et les vers de terre). Il faut donc de se focaliser sur certaines espèces bio-indicatrices. Nous avons fait le choix de nous focaliser sur 3 bio-indicateurs :**

- **Coléoptères carabidae (prédateurs / mésofaune épigée)**
- **Lombriciens (ingénieurs / macrofaune)**

[http://www.agrireseau.gc.ca/Agroforesterie/documents/Agroforestry%20technology%20transfer%20report\\_french.pdf](http://www.agrireseau.gc.ca/Agroforesterie/documents/Agroforestry%20technology%20transfer%20report_french.pdf)

<sup>21</sup> Programme de recherche et développement en agroforesterie financé par le Compte d'Affectation Spécial pour le Développement Agricole et Rural (CASDAR)

- Cloportes (détritivores / crustacées)

Au niveau « micro », nous étudierons parallèlement :

- la biomasse et l'activité microbiennes
- ainsi que les champignons mycorhiziens (potentiel infectieux et morphotypage de souches).

- Services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers

L'agroforesterie est de plus en plus prise en compte dans les politiques agricoles et d'aménagement pour ses bénéfices environnementaux et la fourniture de services écosystémiques tels que la séquestration de carbone, la conservation de la biodiversité, l'amélioration de la fertilité des sols, de la qualité de l'air et de l'eau (Jose 2009, Nair et al. 2009, Schroth and Sinclair 2003). En effet, les enjeux économiques sont de taille. Un récent rapport du Centre d'Analyse Stratégique estime, par exemple, que l'évaluation de l'ensemble des services rendus par la forêt française serait comprise entre 500 et 2 000 €/ha/an (**Annexes**) (Chevassus-au-Louis et al. 2009).

Ecosystem Services	Spatial Scale		
	Farm/Local	Landscape/Regional	Global
Net Primary Production			
Pest Control			
Pollination/Seed Dispersal			
Soil Enrichment			
Soil Stabilization/Erosion Control			
Clean Water			
Flood Mitigation			
Clean Air			
Carbon Sequestration			
Biodiversity			
Aesthetics/Cultural			

Figure 12: Echelles spatiales de différents services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers. Source : adapté de Izac 2003 et Kremen 2005.

Ces aménités (« externalités positives »), si elles sont reconnues, agissent à différentes échelles (Figure 12) et l'évaluation économique de ces services rendus n'est pas bien documentée. De plus, si l'opinion publique consent à payer pour la séquestration de carbone, on peut se demander si la société est prête à payer pour d'autres services.

Les services écosystémiques rendus par l'agroforesterie sont semblables à ceux des forêts, hormis peut être les aspects récréatifs. Dans l'attente d'études approfondies sur le sujet, nous pouvons d'ores et déjà proposer une estimation de la valeur économique des services rendus annuellement par un hectare agroforestier. Si l'on se base sur le **Tableau 6**, adapté du rapport du Centre d'Analyse Stratégique, on peut donner une valeur d'environ 634€/ha/an pour une parcelle agroforestière moderne.

Services	Valeurs proposées	Remarques
Services de prélèvement - bois	75 €	Valeur sous estimée comparée à la VAN d'un projet AF classique

Service de régulation		
- fixation de carbone	115€	1 tC/ha/an soit 3.6 t equiv-CO <sub>2</sub> à 32€/t
- stockage de carbone	414 €	Capital de carbone stocké (90tC/ha) rémunéré au taux d'actualisation de 4%
- eau (quantité annuelle)	0 €	
- eau (régulation des débits)	NE	
- eau (qualité)	90 €	
- protection (érosion, crues)	NE	
- biodiversité	NE	Évaluée via les autres services
<i>Services culturels</i>		
- promenades (hors cueillette et chasse)	0 €	Hypothèse d'absence d'aspects récréatifs
- chasse	55 €	Valeur minimale équivalente
- autres	NE	
<b>TOTAL</b>	<b>634 € /ha/an</b>	

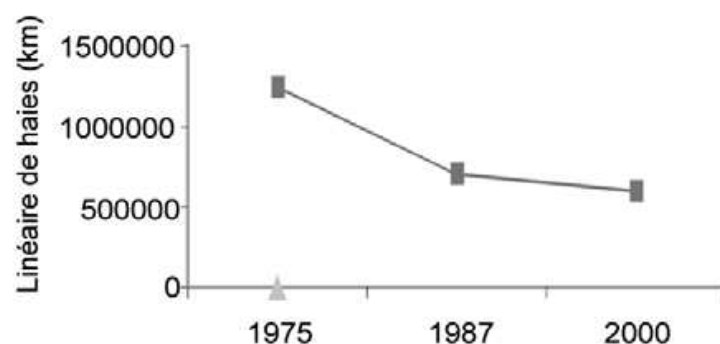
**Tableau 6 : Estimations économiques des services écosystémiques rendus par l'agroforesterie ; VAN : valeur actualisée nette. Source : adapté de Chevassus-au-Louis et al. 2009.**

En climat méditerranéen, les estimations du MEEDAT (2008) pour la valeur du bois et des autres services écosystémiques de la forêt, sont respectivement de 25 et 215 €/ha/an.

## IV.2 Les Haies, les Trognons et le Bocage : quelle production de biomasse arborée ?

- **Evolution du linéaire de haie**

Au-delà de leur caractère identitaire et patrimonial important en France et en Europe (Touret 2002), l'organisation « en mailles » du système bocager lui confère une fonction multiple de protection des sols contre l'érosion, de rétention des eaux de ruissellement, de préservation contre les pollutions diffuses et d'habitats propices à la diversité de la faune et de la flore (Baudry and Jouin 2003). Leur régression au profit de sols « dénudés » ou artificialisés constitue un facteur aggravant de l'érosion ou des inondations ainsi qu'une perte en capital naturel (Ifen 2005). Massivement supprimées lors des remembrements (**Figure 13**), les haies sont maintenant reconsidérées pour leur intérêt environnemental mais les coûts d'implantation et d'entretien limitent toutefois leur développement (Arrouays et al. 2002).



**Figure 13 : Réduction des linéaires de haies en France entre les années 1975 et 2000. Source IFN**

Le rythme de régression des haies s'est stabilisé depuis la dernière décennie, grâce notamment aux campagnes de plantation et au travail des associations, entreprises et collectivités investies dans la sensibilisation et l'action pour la réhabilitation des haies champêtres et du bocage. En 2004, il restait en France environ 617.000 ha de haies

représentant 2,1% de la surface agricole utilisée et 302.000 ha d'arbres épars (hors haies) représentant 1% de la surface agricole utilisée (Pointereau 2006). Mais d'autres structures arborées sont toujours en régression comme les près-vergers, les arbres isolés ou les bosquets (**Tableau 7**).

	1982	1990	Evolution en %	1993	2004	Evolution en %
<i>Arbres épars</i>	437	341	- 22%	423	302	- 29%
<i>Haies</i>	376	359	- 5%	596	617	+ 4%
<i>Arbres épars + haies</i>	813	699	- 14 %	1021	919	- 10%
<i>Bosquets</i>	610	590	- 3%	674	572	- 15%
<i>Près-vergers</i>	259	209	- 19%	194	149	- 23%

**Tableau 7 : Evolution des surfaces de différentes structures arborées en France entre 1982 et 2004 - (en milliers d'hectares). Source SCEES**

Cependant, dans le contexte économique et énergétique actuel, le regain d'intérêts pour les énergies renouvelables (besoins de chauffage) et pour l'utilisation durable des ressources naturelles comme les bois raméaux fragmentés (amendement des sols), la production de biomasse arborée issue des haies et des systèmes agroforestiers pourrait s'avérer rentable (Liagre 2006). Mais quelle biomasse peut-on produire en agroforesterie ? Quel volume utilisable de bois peut-on espérer produire pour les besoins en chauffage (plaquettes) ou pour l'aggradation des sols (BRF) ?

- **Production de bois énergie – quelques repères**

La synthèse du Groupe de Travail sur la Biomasse (GT4 du CASDAR Agroforesterie 2009-2011) apportera des précisions quant aux ressources mobilisables et à leur utilisation.

On retiendra que la productivité d'une haie est fonction de sa structure, de son homogénéité, des essences qui la composent, de la technique de coupe et d'entretien et bien évidemment de son âge. Pour une haie relativement dense de 5m x 1km, on estime que sa production de bois est l'équivalent d'un taillis forestier pur d'un demi-hectare soit 15 à 150 tonnes de matière sèche (ou 400 à 600 MAP<sup>22</sup>) au bout de 15 ans (Liagre 2006).

Le potentiel de production de bois déchiqueté est élevé pour certaines régions, et notamment en Bretagne en raison de son réseau bocager. La Chambre d'Agriculture de la Manche engagé dans la réhabilitation et l'utilisation durable des haies du réseau bocager rapporte des productions moyennes annuelles de 22 m<sup>3</sup> de plaquettes pour 100 ml et souligne la progression de ce marché ces dernières années notamment grâce à des prix de revient compétitifs et l'organisation d'une filière énergie (Cleran 2004 ; Cleran 2009a).

<sup>22</sup> MAP : Mètre Cube Apparent

Type de haie	Production potentielle	Caractéristiques
Haie Arbustive	5 à 20 MAP / 100 ml	Haie basse arbustive traitée en cépées et en taille. Rendement selon essences (arbustes bas ou hauts)
Haie de taillis	20 à 80 MAP / 100 ml	Haie moyenne composée d'arbres qui rejettent de souche traité en taillis et en têtards. Rendement selon densité
Les arbres	2 à 3 MAP / arbre	Arbres émondés ou en futaie. Rendement selon essence et densité des arbres et de la haie.

**Tableau 8 : Production de bois énergie par différents types de haies dans la Manche (Source : adapté de Cleran 2009b)**

### Zoom sur ...

#### Les arbres têtards...

On dit qu'un arbre est « têtard » parce qu'il a une grosse tête : les branches sont toutes coupées au même niveau du tronc et les cicatrises successives provoquent un gonflement du tronc au niveau de la coupe. Traditionnellement façonnée par la main de l'homme, la queule, la ragosse, la tronche - l'arbre têtard possède autant de formes qu'il a de nom, souvent locaux - cette pratique, emblématique des paysages bocagers, était très répandue jusqu'au début du XXème siècle, mais elle est aujourd'hui menacée. Si elle a un temps perdu son intérêt économique (dans les années 1950), la production de bois de trogne (bois de chauffe, fagots, loupe pour l'artisanat et bois d'œuvre pour la construction) pourrait à son tour faire peau neuve.

Les forêts de têtards du Pays basque ont longtemps concilié production de bois, pâturage, et production de fruits. Les chênes étaient plantés à une densité de 150 par hectare et étêtés tous les 10 ou 15 ans. Ainsi chaque hectare produisait 10 stères de bois par an soit environ 15 MAP (Maison Botanique 2009).

L'Association Aile estime qu'une haie de 15 ragosses sur 100 mètres en Bretagne, produit 9 MAP (mètre cube apparent) en 10 ans soit 13 Kg par arbre et par an (Lotfi 2008).

L'utilisation et l'entretien de des arbres têtards pourraient donc s'avérer une option technique intéressante dans le cas des plantations d'alignements agroforestiers pour la production de bois énergie.

*Crédit illustration : Maison Botanique 2009*

- **Production de Bois Raméal Fragmenté : un besoin de recherche**

Pour l'heure, aucune étude ne s'est focalisée sur la production de BRF par les arbres agroforestiers. Liagre (2006) propose des estimations de linéaires de haies nécessaires à la production de BRF pour des épandages initial et d'entretien – 200 m<sup>3</sup>/ha et 100m<sup>3</sup>/ha tous les 3-4 ans – qui s'avèrent irréalisables à l'échelle d'une exploitation.

La production de BRF pourrait être envisagée à travers l'utilisation des rémanents de taille des arbres adultes (taille au lamier et broyage au sol) ou à travers l'exploitation complète des arbres d'éclaircies. En séparant les branches de diamètres inférieures à 7 cm, une première étude menée sur des noyers de 25 ans (Godard 2009), non-éclaircies à temps, montre un potentiel de 2.8 Kg MS/arbre/an de BRF soit 1.12 t MS/ha pour une éclaircie de 50 arbres à 8 ans. En utilisant un ratio de 200 Kg MS/m<sup>3</sup> (Noël comm. pers.) on obtiendrait alors un volume de BRF d'environ 5.6 m<sup>3</sup>.

Cependant les arbres sélectionnés dans l'étude auraient dus être éclaircis bien avant et l'on peut penser que la biomasse de leur houppier ne s'est que très peu développée ces dernières années, voire pendant cette dernière décennie, en raison de la forte compétition

sur le rang d'arbres. Le poids de BRF potentiellement récoltable serait donc largement sous-estimé.

### IV.3 Le Bois Raméal Fragmenté : intérêt agronomique

- **Définition – concept et enjeux**

Originaire de l'Université de Laval au Québec<sup>23</sup> (Lemieux 1990), l'utilisation de bois raméaux fragmentés (produit ligneux) est une technique de restructuration et d'entretien des sols cultivés, inspirée de la fertilité et de la stabilité des écosystèmes forestiers (Stevanovic 2007). Les enjeux sont clairs : contribuer à l'aggradation des sols *i-e* à stimuler l'activité biologique des sols et la formation d'humus pour améliorer la fertilité et la stabilité des sols agricoles. Le matériau provient des branches, brindilles et feuilles, riches en nutriments, protéines, tissus lignifiés et polyphénols, qui contribuent ainsi à la constitution de l'humus. Concrètement le BRF se matérialise sous la forme de copeaux de bois de 5 à 10 cm de longueur) provenant de branches de section inférieure à 7 cm. Les feuillus doivent constituer la majorité du broyat, mais un taux de 15 % à 20 % de conifères en mélange reste acceptable (Lemieux et Germain 2002).

En Europe, cette technique fait surface dans les années 1990, au Centre de Technologies Agronomiques<sup>24</sup> (CTA) en Belgique sous l'initiative de Benoit Noël, ainsi qu'au sein d'exploitations et d'associations pionnières en France (Jardins de BRF, AVEBRF, BASE...)<sup>25</sup>. Les BRF font leur bonhomme de chemin, gagnant en popularité au sein des collectivités et des services espaces verts de grandes villes de par la valorisation des « déchets » d'élagage et leur rentabilité économique d'exploitation comparée à d'autres matériaux de paillage (Champenois 2009). Cette étude montre que pour la ville de Grenoble, le paillage BRF revient à 1.09 € TTC/m<sup>2</sup> pour une application de 5 cm comparée à 2.17 ; 2.19 ; ou 3.26 € TTC/m<sup>2</sup> pour des paillages en écorce de pin, copeaux de chanvre et copeaux de lin respectivement. Hormis ce gain de rentabilité économique dans le cadre de l'utilisation en ville, quels sont les avantages et les inconvénients agronomiques des BRF en agriculture ? (**Tableau 9**)

Quelques avantages	Quelques inconvénients
Stimulation biologique du sol et notamment des populations de champignons.	L'approvisionnement en BRF en l'absence de filière organisée
Augmentation des taux de matières organiques et en particulier en humus stable	La ressource limitée en biomasse arborée et son inégale répartition sur le territoire
Amélioration de la structure du sol	La qualité des BRF (mélange avec d'autres déchets lors du broyage)
Séquestration de carbone	La faim d'azote due à l'immobilisation de cet élément les premières années
Augmentation de la réserve en eau grâce à un fort effet paillage et une régulation de l'humidité du sol par l'activité biologique	Faune non désirée (limaces, sangliers) à contrôler
Contrôle herbostatique	Tassements éventuels des sols lors des épandages

**Tableau 9 : Liste non-exhaustive des avantages et inconvénients des bois raméaux fragmentés et de leur utilisation en agriculture. Source : adapté de Asselineau & Dommenech 2007**

<sup>23</sup> Le Groupe de Coordination des BRF sous la direction de Gilles Lemieux a activement participé à la promotion et à la création de références sur l'apport de matériaux ligneux aux sols. Voir notamment : [www.sbf.ulaval.ca/brf](http://www.sbf.ulaval.ca/brf)

<sup>24</sup> Site internet : <http://www.aggra.org/reportagesbrf/58-ctabrf.html>

<sup>25</sup> Voir notamment les sites internet des Jardins de BRF (<http://www.lesjardinsdebrf.com/>) et celui de la ferme de J. Dupety (<http://fermedupouzat.free.fr/>).

- **Bois raméal fragmenté et vie biologique du sol**

La fraction en lignine du bois, et notamment certains polyphénols (gàiacyl et syringyl), et les tannins condensés (proanthocyanidines), protègent les cellules du bois et jouent un rôle crucial dans la formation du sol. En effet, ces molécules sont résistantes à la microflore et sont préférentiellement dégradées sous l'action des champignons (fongi Basidiomycètes ou *pourriture blanche*) qui libèrent des enzymes (Lemieux 1996, Lemieux et Germain 2002). Ces Basidiomycètes deviennent à leur tour une source alimentaire pour la microfaune fongivore d'arthropodes qui se nourrissent du mycélium. Un réseau trophique se met en place. Par synergie entre la microbiologie du sol et la pédofaune, le processus d'humification s'enclenche.

Si l'action des champignons basidiomycètes lignivores est connue et bien documentée, celle des champignons mycorrhiziens reste à explorer (Dommenech 2007). En effet, ces champignons symbiotiques pourraient être stimulés par l'apport de BRF et avoir un rôle dans la stabilité des agrégats (effet agrégeant du mycélium et sécrétion de glomaline) et dans la réduction des maladies fongiques. Mais ces hypothèses de recherche demandent à être testées.

Par ailleurs, Bourguignon et al. (2007) ont étudié l'effet de l'application de BRF sur l'activité biologique (activité enzymatique) et la faune épigée du sol et rapportent une nette augmentation de l'activité biologique pour des rangs de vignes avec BRF sur sol schisteux, avec une augmentation plus marquée quand le BRF recouvre tout l'inter-rang.

- **Bois raméal fragmenté, carbone et aggradation des sols**

L'apport de matières organiques et l'activité biologique du sol, grâce au processus d'humification, semblent être particulièrement efficaces pour la constitution des sols et l'augmentation du taux d'humus (Noël 2005). N'dayegamiye and Angers (1992) montrent qu'après 10 ans de traitements au BRF, une fraction importante (30%) du carbone se retrouve sous forme liée (forme humifiée liée aux agriles), possédant des temps de résidence dans le sol de l'ordre de 40 à 1000 ans.

Le Centre de Technologies Agronomiques a compilé et comparé les données de plusieurs études sur l'apport de différentes sources de carbone (**Tableau 10**). Si les résultats en termes d'apport d'humus au sol et de vitesse d'amélioration du sol sont à l'avantage du BRF, les quantités apportées de BRF restent assez importantes. Ce qui soulève une fois de plus le problème – surmontable – de la ressource en biomasse arborée.

Mesure	Dose maxi/an	Apport annuel net d'humus t/ha	Temps pour +1% d'humus sur 30 cm
Fumier de ferme	21 t MF/ha	0,6	67 ans
Compost de déchets végétaux	9 t MF/ha	1.4	28 ans
Engrais vert intercalaire	4 t MS/ha	0.4	100 ans
<b>BRF</b>	<b>23 t MF/ha</b>	<b>4</b>	<b>10 ans</b>
Travail simplifié	/	0.4	100 ans

Tableau 10 : Contribution à la formation d'humus par différentes sources de carbone. *Source : Noël 2005.*

Néanmoins, d'autres études le confirment, la structure du sol s'en trouve améliorée : la stabilité structurale est plus importante et les agrégats plus gros (Lalande et al. 1998). L'action de la pédofaune quant à elle, permet une meilleure infiltration de l'eau, diminuant ainsi le ruissellement de surface et donc l'érosion.

Souvent pointé du doigt pour son manque de transposabilité sur des grandes surfaces agricoles, la technique des BRF reste une approche agronomique ou « sylvagaire » intéressante pour l'aggradation des sols. Cette technique se lie par 2 aspects à notre problématique agroforestière. D'une part, les arbres agroforestiers sont d'excellents producteurs de biomasse et pourraient subvenir – dans une certaine mesure- à la production de BRF pour un usage en filière organisée. Les arbres d'éclaircie pourraient alors être utilisés à la fois pour le BRF et le bois énergie. Une autre solution serait de prévoir entre 2 arbres de haut-jet, des arbres à vocation de production de biomasse. Des expériences sont en cours pour évaluer la productivité de tels systèmes agroforestiers à vocation biomasse dans l'ouest et le nord de la France. D'autre part, les rémanents de tailles annuelles peuvent être épandus directement sur la parcelle et broyés au sol, ajoutant ainsi à la litière aérienne et souterraine un autre type de matière organique pour la vie biologique du sol.

Le programme CASDAR à travers ses actions de terrain, évaluera :

- la productivité en biomasse arborée potentiellement transformable en BRF dans divers type de haies, sur un parc de trognons et au sein d'une parcelle agroforestière âgée
- la faisabilité technico-économique à l'échelle d'une exploitation de la production et de l'utilisation de BRF
- ainsi que la mise en place et la rentabilité d'une filière dédiée au BRF

## AXES ET METHODES DE RECHERCHE

### V.1 Définition des axes de recherche

Cette synthèse bibliographique met en exergue les enjeux de la conservation et de l'amélioration des sols et l'intérêt des arbres hors forêts dans le maintien de plusieurs services écologiques. La question centrale qui est posée à ce groupe de travail est la suivante : comment les arbres agroforestiers peuvent-ils améliorer la fertilité biologique et organique des sols agricoles ? Cette question peut être développée en 3 axes de recherche :

- i. Quel est l'impact d'alignements agroforestiers sur la fertilité organique et l'activité microbologique des sols comparé à un champ sans arbre ou une parcelle forestière ?
- ii. Quel est l'influence d'alignements agroforestiers sur la biodiversité du sol ?
- iii. Au travers de l'utilisation des BRF, les arbres agroforestiers représentent-ils un moyen rentable et efficace d'améliorer les sols agricoles ?

### V.2 Présentation des sites d'études

- **Site de Restinclières, Hérault (34) – Figure 14**

Principales caractéristiques : Domaine de Restinclières, commune de Prades le Lez (Hérault). La parcelle retenue pour l'étude est la parcelle A2. Située au sud du domaine cette parcelle présente l'intérêt de comporter un témoin agricole, un témoin forestier et un témoin agroforestier (14m entre les lignes, 80 arbres/ha). Les parcelles sont âgées de 14 ans (plantation en 1995) et le modèle de culture étudié est une association noyers hybrides en rotation avec du blé dur, des protéagineux (pois, pois chiche) et oléagineux (colza).

Climat : méditerranéen frais subhumide

Sols : alluviaux profonds limono-argileux

- **Site des Eduts, Charente Maritime (17) – Figure 15**

Caractéristiques : Situées au Paradis (lieu dit), chez Mr Jollet, commune des Eduts (Charente Maritime), les parcelles retenues pour l'étude sont situées au sud du domaine et comporte un témoin agricole, un témoin agroforestier (14 m entre les lignes), un témoin forestier et un le taillis forestier d'origine. En effet tous les témoins mentionnés dérivent de ce taillis originel (défrichage dans les années 1970 et ultérieures). Les arbres sont donc ici âgés d'une trentaine d'année. Le modèle de culture est une association de noyers (*Juglans nigra*, *regia*, *et hybride*) avec une rotation de cultures céréalières (orge, blé).

Climat : océanique tempéré

Sols : Grois, argilo-limoneux.

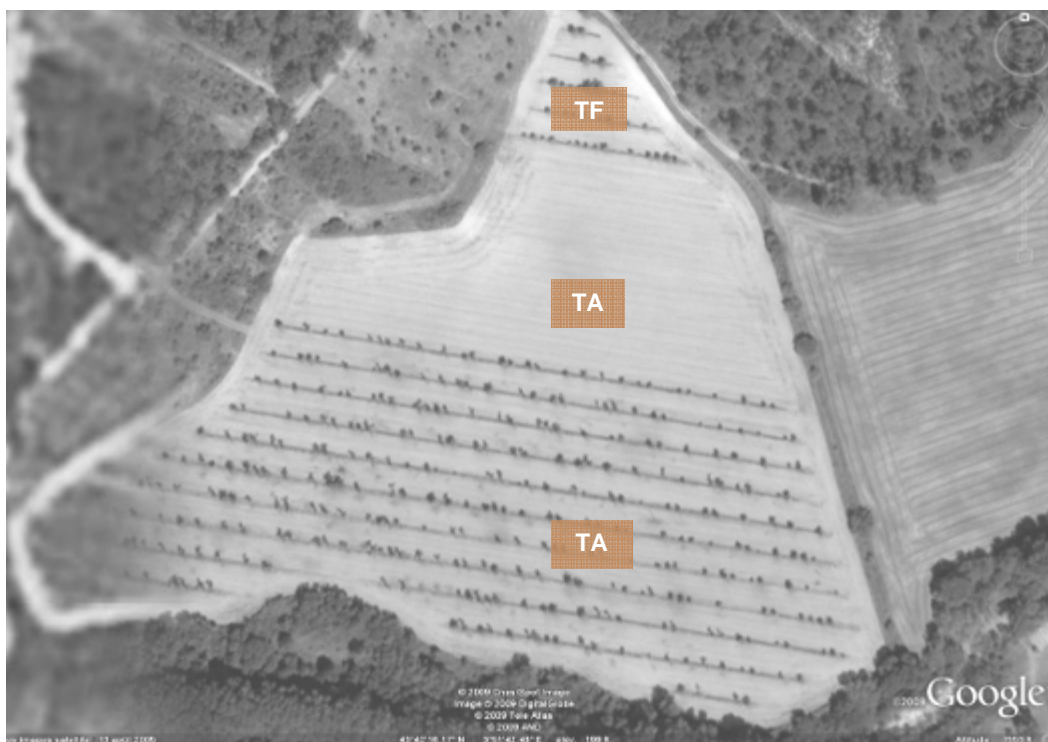


Figure 14 : Images satellites de la parcelle A2 (Août 2005) sur le domaine de Restinchières.  
Source : Google®



Figure 15 : Images satellites des parcelles concernées sur le site des Eduts (Août 2005).  
Source : Google®

### V.3 Méthodologie d'évaluation comparée de la fertilité organique et microbiologique

Cette approche a été développée en partenariat étroit avec l'équipe de Valorhiz<sup>26</sup> de Montpellier SupAgro.

Le but de cette approche (**Figure 16 et 17**) est de faire un bilan et un suivi de la fertilité microbiologique et organique des parcelles agroforestières (modèle de culture : noyers/blé) comparées aux témoins agricole (sans arbres) et forestier (boisement). Cette approche sera identique sur les deux sites présentés auparavant.

- 1 Les parcelles expérimentales seront dans un premier temps caractérisées à travers un diagnostic pédologique sur site, afin de délimiter les zones pédologiques homogènes.
- 2 Des échantillons de sol seront ensuite prélevés pour effectuer les analyses physiques et la caractérisation du fonctionnement hydrique, nécessaires pour compléter la description pédologique in situ.

Ces deux premières étapes seront réalisées une seule fois en début d'étude

- 3 Des échantillons de sol seront ensuite prélevés à intervalles de temps réguliers et en fonction des saisons de cultures afin de suivre :
  - ↘ leur humidité : courbes pF et potentiel hydrique
  - ↘ leur biomasse microbienne : taille et activité
  - ↘ leur potentiel endomycorhizien : potentiel infectieux et morphotypage de souches
  - ↘ leur teneur en matières organiques : fractionnement et cinétique de minéralisation

Les données climatiques seront aussi recueillies sur site ou à proximité et seront utilisées, en compléments des données pédologiques et culturales (modèle agricole, forestier, agroforestier) pour analyser les variations de la fraction biologique des sols (taille, activité).

### V.4 Méthodologie d'évaluation comparée de la biodiversité des sols agroforestiers

Cette approche a été élaborée en étroite collaboration avec l'UMR Ecobio de Rennes pour le protocole d'étude des lombriciens.

Pour les raisons évoquées dans la synthèse bibliographique, nous allons nous focaliser sur 2 groupes fonctionnels :

- ↘ les lombriciens, ingénieurs du sol et représentant de la macro- et méga-faune
- ↘ les cloportes, décomposeurs, représentant de la méso-faune

---

<sup>26</sup> Site internet : <http://www.valorhiz.com/>

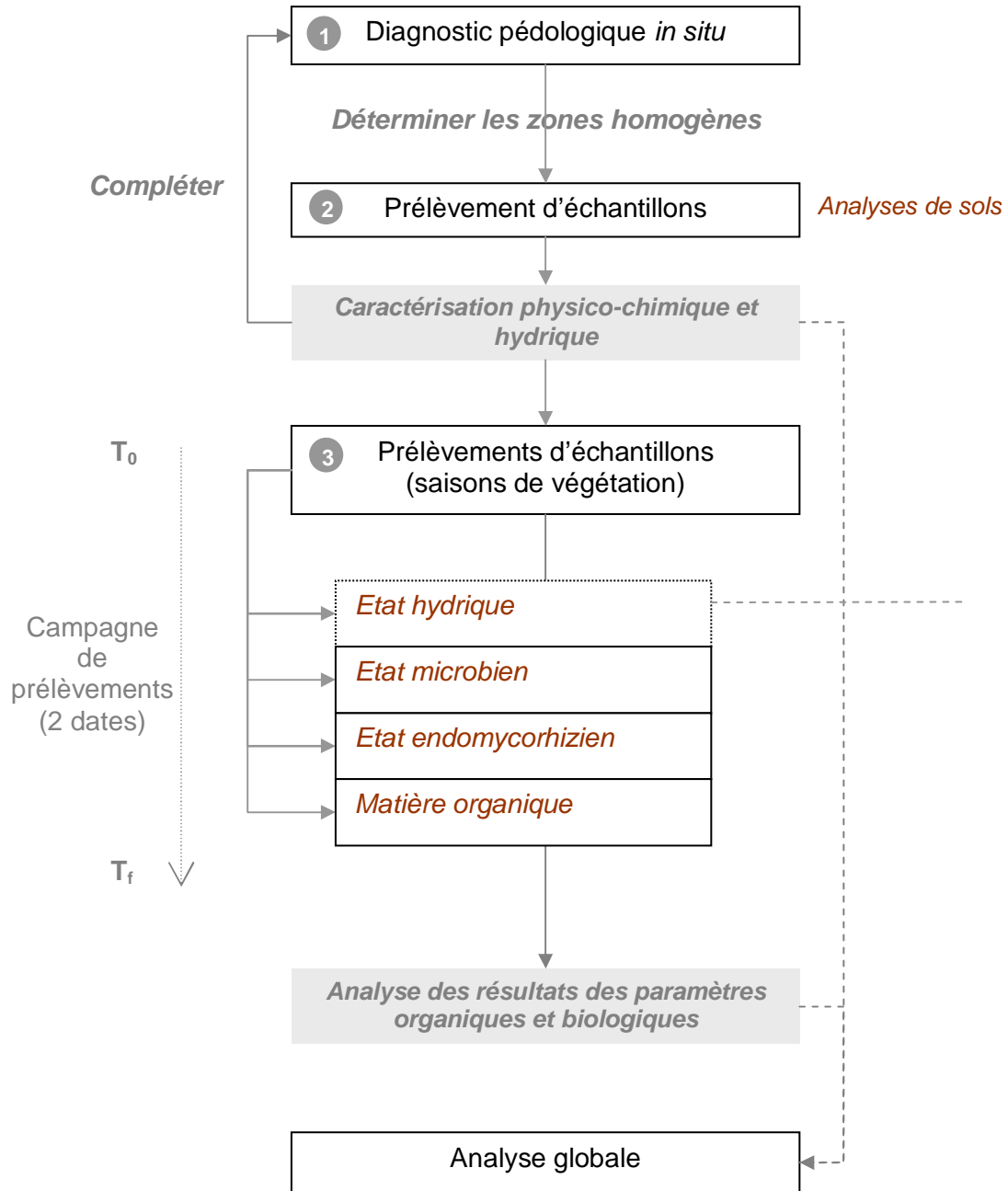


Figure 16 : Schématisation de l'approche méthodologique pour l'évaluation de la fertilité biologique et organique des sols.

	<b>Paramètres</b>	<b>Méthode d'analyse</b>	<b>Période</b>	<b>Références</b>
<b>Caractérisation physique et hydrique</b>	Caractérisation de la structure  Texture (granulométrie)  Fonctionnement hydrique (courbes pF)	Analyses de sol	T0	
<b>Fertilité minérale et chimique</b>	pH, N, P, K, CEC...	Analyses de sol	T0	
<b>Biomasse microbienne</b>	Taille  Activité	Doasage du C et N orga après fumigation  C et N potentiellement minéralisable	T0-T1-T2	<i>WU et al (1990)</i> <i>CHAUSSOD (1996)</i>
<b>Potentiel endomycorhizien</b>			T0-T1-T2	<i>PLENCHETTE et al., 1989)</i>
<b>Densité sporale</b>	Caractérisation des spores endomycorhyziennes	Morphotypage et comptage des spores après extraction du sol		<i>TROUVELOT et al, 1986</i>
<b>Matières organiques</b>	totale, libre et liée (fractionnement) Cinétique de minéralisation	Minéralisation	T0-T1-T2	

**Figure 17 : Détails des paramètres pris en compte dans l'évaluation de la fertilité microbiologique et organique des sites étudiés**

- **Protocole d'étude des lombriciens**

Le but de l'étude est d'évaluer sur les 2 sites d'études l'état des populations de lombriciens au sein des parcelles agroforestières, en comparaison avec un témoin agricole. En agroforesterie, l'apport de matières organiques fraîches (résidus des cultures annuelles, litières aérienne et souterraine des arbres) ainsi que la modification du microclimat dû à l'ombre des arbres, pourraient modifier l'abondance, la diversité ainsi que l'activité des lombriciens.

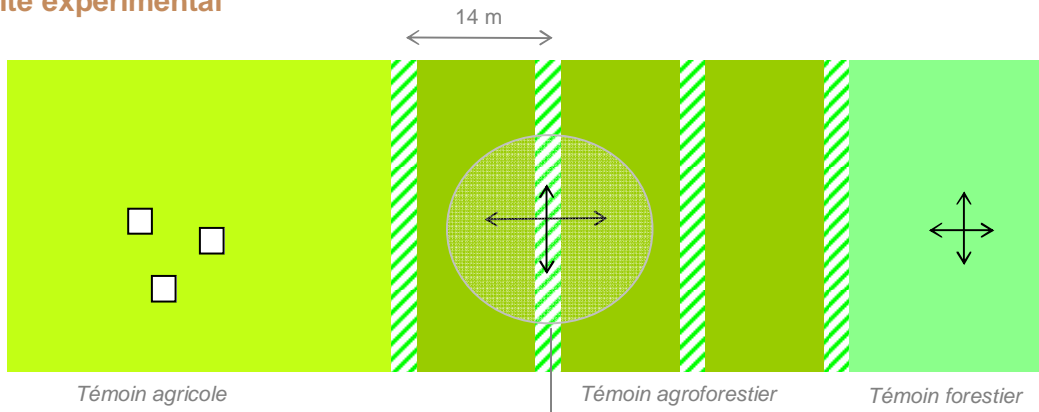
Les mesures se dérouleront à la fin de l'hiver – début de printemps au sein des modalités du dispositif (témoin agroforestier, agricole et forestier), avec une attention particulière dans la parcelle agroforestière en fonction de l'éloignement à la bande d'arbres. Afin de suivre 3 aspects de cette macrofaune :

- l'abondance et la biomasse : prélèvement et comptage des individus en surface (extraction au formol)
- la diversité fonctionnelle : identification à l'espèce et répartition en groupes fonctionnels (épigés, endogés, anéciques).
- leur activité : comptage des zones bioturbées par les lombriciens dans le profil

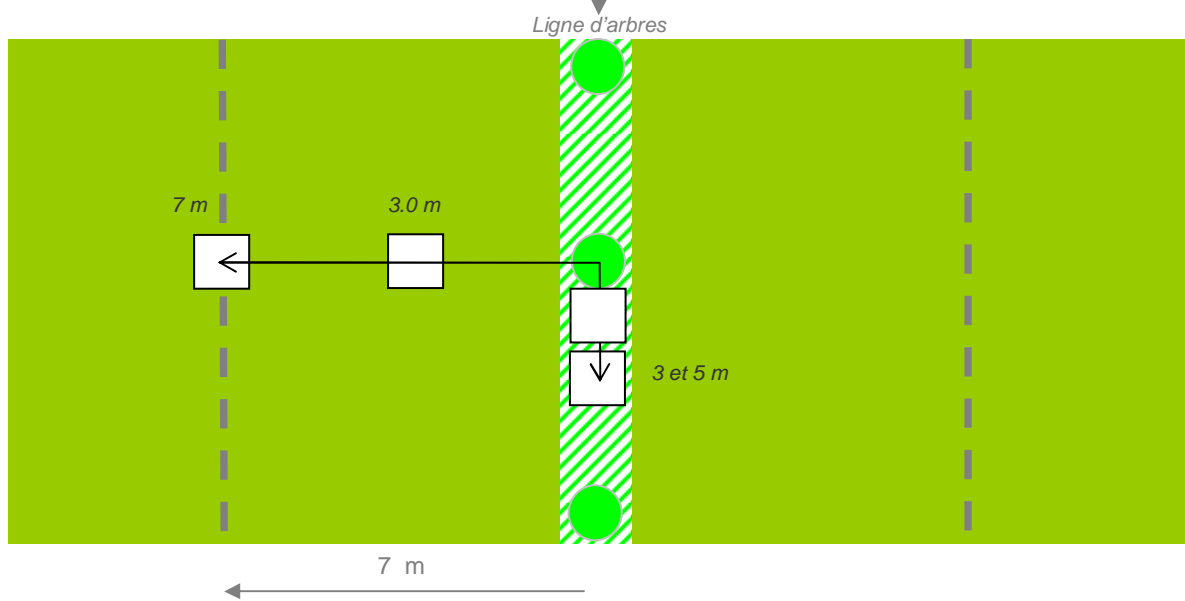
Occupation du sol	Zone pédologique	Transect (nb de quadrats)	Nb de répétitions de transects
Agricole (blé seul)	1 bloc	3 x 1 m <sup>2</sup>	<u>Minimum = 3 répétitions</u>
Forestier (arbres seuls)	1 bloc	4 x 1m <sup>2</sup>	
Agroforesterie : Allée cultivée	1 bloc	2 x 1m <sup>2</sup>	
Agroforesterie : Arbres agroforestiers	1 bloc	2 x m <sup>2</sup>	

**Tableau 11 : Plan d'échantillonnage pour les prélèvements dans les différents témoins des sites d'études**

- **Site expérimental**



- **Témoign Agroforestier**



- **Témoign Forestier**

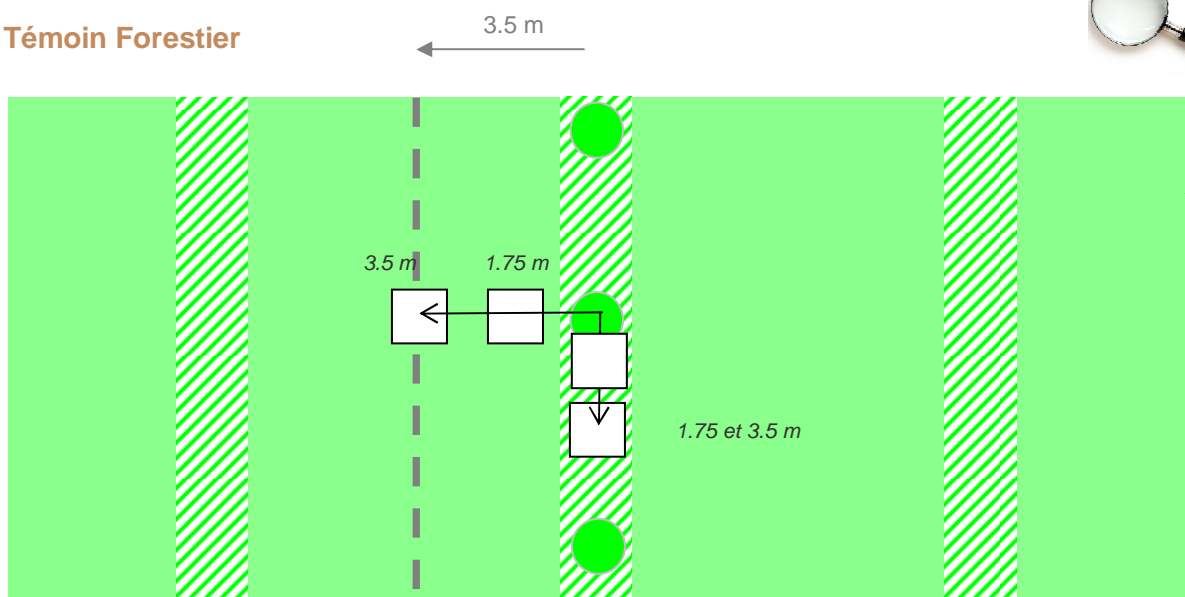


Figure 18 : Représentation des lieux d'échantillonnages dans les différents témoins, sur les 2 sites étudiés.

Pour l'occupation du sol « agroforesterie » et « forestier », on disposera les quadrats en croix comme le présente dans la **Figure 18** :

- Agroforesterie : 2 quadrats au sein de l'allée cultivée. Un au milieu de l'allée (à 7m de la ligne d'arbres) et un entre le milieu de l'allée cultivée et la ligne d'arbres (à 3 m de la ligne d'arbres). 2 quadrats supplémentaires seront disposés sur la ligne d'arbres, entre 2 arbres (à 3 et 5 m)
- Forestier : le dispositif en croix sera similaire mais adapté aux écartements de 7 x 7 m pour les noyers noirs forestiers. Donc on disposera 2 quadrats dans l'allée : un à 3,5 m et l'autre à 1.75 m de la ligne d'arbres. Enfin, 2 quadrats sur la ligne d'arbres entre 2 arbres (à 1.75 et 3,5m)

- **Protocole d'étude des Cloportes**

L'étude des populations de cloportes est envisagée sur les sites anciens mais pourrait contribuer à dresser l'état initial de la biodiversité de la pédofaune détritivores des parcelles agroforestières plus jeunes.

Le suivi des populations de cloportes se fait par piégeage passif (piège Barber), dispositif similaire à celui des suivis de coléoptères carabidés. Les individus tombent dans un pot pièges et sont ensuite dénombrés et éventuellement identifiés en fonction des moyens. Le piégeage pourra donc se faire sur la période de piégeage des carabidés avec le même dispositif (*Pour plus d'informations sur les méthodes de suivi des Coléoptères carabidae consultez le rapport du Groupe de Travail Biodiversité – GT1*).

## **V.5 Méthodologie d'évaluation comparée de la biomasse des arbres hors-forêt**

La méthode développée pour l'évaluation de la biomasse des arbres agroforestiers est basée sur la comparaison d'une approche destructive (évaluation de la biomasse récoltée) et d'une approche théorique (estimation des volumes sur pieds).

Cette approche comparative sera aussi menée à bien sur des arbres têtards ainsi que sur des haies, bien que l'approche théorique soit plus délicate dans le cas des haies. Dans ce dernier cas, on pourra estimer la biomasse à travers les dimensions de la haie (hauteur, largeur, longueur), de sa composition et de sa structure ou utilisée une typologie régionale.

Dans tous les cas, des paramètres d'état (âge, essences, structure) de gestion (taille, entretien, forme) et économiques (temps de travail, matériel) seront identifiés et permettront de calculer la rentabilité d'un chantier d'exploitation du BRF ou de bois-énergie dans différentes situations (haies, arbres agroforestiers ou arbres têtards).

Cette synthèse bibliographique sur les enjeux de la protection du sol et l'apport des systèmes agroforestiers au maintien de la fertilité, d'un bon état écologique et biologique n'est pas exhaustive. Elle est centrée sur notre problématique d'étude au sein de ce CASDAR Agroforesterie, et devrait apporter des éléments de compréhension aux partenaires impliqués et aux personnes extérieures sur les objectifs et les méthodes d'étude que nous nous sommes fixés dans ce Groupe de Travail.

Le sol est un objet d'étude complexe et ce groupe de travail n'a pas vocation à étudier toutes les fonctions de cet écosystème. Nous nous focalisons ici sur la fonction de fertilité biologique et organique du sol. La compréhension du fonctionnement hydro-structural du sol n'est pas abordé dans ce travail. Certains paramètres et indicateurs nous ont paru pertinents à l'étude de la fertilité biologique et organique :

- la composante organique et chimique
- la composante microbiologique (champignons micorhyziens et biomasse microbienne du sol)
- la macrofaune (lombriciens, ingénieurs du sol)
- la mésofaune (cloportes, détritivores)

Cette étude se focalise principalement sur 2 sites d'études anciens :

- le site des Eduts (Charente Maritime, 17) sur des parcelles agroforestières céréalières de 25 à 30 ans en sols de grois (argilo-limoneux) sous climat océanique.
- le site de Restinclières (INRA, Prades le Lez, 34) sur des parcelles agroforestières céréalières de 14 ans, en sols alluviaux (limono-argileux) sous climat méditerranéen.

Par la suite le Groupe de Travail Sol, envisage d'élargir l'étude des sols aux sites du réseau de parcelles de références (parcelle jeunes et dans d'autres conditions pédoclimatiques). Dans ce cadre, une réflexion sur des protocoles « simplifiés » sera menée au sein du groupe. Ces protocoles d'étude devront être utilisables par des équipes de développement, faciles à mettre en œuvre et économes en moyens. Cette prochaine étape donnera lieu à un autre document de synthèse du Groupe de Travail Sol du CASDAR Agroforesterie 2009-2011.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARROUAYS D., 2009. Le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol, p174 in STENGEL P., BRUCKLER L., BALESDENT J., 2009. Le Sol, Dossier INRA, Edition Quae, Versailles, 180 p
- ARROUAYS D., BALESDENT 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
- ARROUAYS D., SABY N., WALTER C., LEMERCIER B., SCHVARTZ C., 2006. Relationships between particle-size distribution and organic carbon in French arable topsoils, *Soil Use and Management*, 22, 48-51.
- ARROUYAIS 2003, Agriculture contre effet de serre, Environnement Magazine, n°1616
- ASSELIN E. & DOMENECH G., 2007. De l'arbre au sol : les bois rameaux fragmentés, Rodez, Ed. du Rouergue, 190 p.
- AUBERT G. et BOULAIN J., 1980. La pédologie. Presse Universitaires de France, Paris, 127 p.
- 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*.
- BALESDENT 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
- BALESENT J., CHENU C., 2009. Le Sol et le recyclage de la matière vivante, pp. 38-41 in STENGEL P., BRUCKLER L., BALESDENT J., 2009. Le Sol, Dossier INRA, Edition Quae, Versailles, 180 p.
- BALL B. C., BATEY T. & MUNKHOLM L. J., 2007. Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test. *Soil Use and Management*, 23, pp. 329–337
- BASTARDIE F., CANNAVACCIUOLO M., CAPOWIEZ Y., De DREUZY J.-R., BELLIDO A., CLUZEAU D., 2002. A new simulation for modelling the topology of earthworm burrow systems and their effects on macropore flow in experimental soils, *Biol Fertil Soils*, 36, pp. 161–169
- BATJES, N. H., 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil Sci.* 47, pp. 51-163
- BAUDRY J. et JOUIN A., 2003. De la Haie aux Bocages : Organisation, dynamique et gestion. INRA Paris, 435 p.
- BELLAMY P.H, LOVELAND P.J., BRADLEY R.I., 2005. Carbon losses from soils across England and Wales, *Nature*, 437, pp. 245-248.
- BOUGHRIET R., 2008. La Commission européenne souhaite relancer la directive cadre sur les sols, *Actu Environnement*, du 13/06/08
- BOUHE M.B, 1972. Lombriciens de France. Ecologie et Systématique. INRA (Ann. Zool. Ecol. Anim numéro hors série 72/2), Paris 671p.
- BOUMA J., 1991. Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in Agronomy*, 46, pp. 1–37
- BOURGUIGNON C., BOURGUIGNON L., LAPREVOTE S., 2007. Effet de l'application du bois raméal fragmenté sur l'activité biologique et sur la faune épigée de trois sols de vignes – In : Dodelin B., Eynard-Machet R.; Athanaze P. et André J., 2007. Les rémanents en foresterie et agriculture - Les branches, matériau d'avenir - Tec & Doc Lavoisier, 389p.
- BRUAND A., 2009. Qu'est ce que le sol, pp. 12-17 in STENGEL P., BRUCKLER L., BALESDENT J., 2009. Le Sol, Dossier INRA, Edition Quae, Versailles, 180 p
- BRUCKLER L., BALESDENT J., 2009. Le Sol, Dossier INRA, Edition Quae, Versailles, 180 p.
- BUCK L.E., LASSOIE J.P., FERNANDEZ E.C.M., 1998. Agroforestry in sustainable agricultural systems (advances in agroecology). CRC Press, Boca Raton, FL, p 416
- BURGESS, P.J., 1999. Effects of agroforestry on farm biodiversity in the UK. *Scottish Forestry* 53(1): 24-27.
- CADISCH G., ROWE E., SUPRAYOGO D., VAN NOORDWIJK M., 2004. Safety-nets and filter functions of tropical agroforestry systems. In *Controlling Nitrogen Flows and Losses*, (D.J. Hatch D.R.C., S.C. Jarvis and J.A. Roker, ed.): 406-414.
- CALVET R., 2003. Le sol : Propriétés et fonction I et II. France Agricole (Ed) 455p
- CAPILLON A., SEGUY L., 2002. Ecosystèmes cultivés et stockage du carbone. Cas des systèmes cultures en semis direct avec couverture. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 88, pp. 63-70
- CAPOWIEZ Y., 2009. Macrofaune du sol : des ingénieurs » de l'écosystème, pp 78-80 in STENGEL P., BRUCKLER L., BALESDENT J., 2009. Le Sol, Dossier INRA, Edition Quae, Versailles, 180 p
- CASDAR., 2007. Etude de la diversité de la pédofaune dans les systèmes agroforestiers, 64p.

Disponible en ligne:  
<http://agroforesterie.fr/CASDAR/20062008/gt6.html>.

CHAMPENOIS Y., 2009. Paillis de bois sec et bois raméal fragmenté : des économies réelles ? PHM Revue Horticole, 516, pp. 28 – 30

CHAUSSOD R., 1996. La qualité biologique des sols Evaluation et implications. Etude et Gestion des Sols 4, 261-276

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.

CHIFFLOT V., RIVEST D., OLIVIER A., COGLIASTRO A., KHASA D., 2009. Molecular analysis of arbuscular mycorrhizal community structure and spores distribution in tree-based intercropping and forest systems, Agriculture Ecosystems and Environment, 131, pp.32-39

CLERAN E., 2004. Gérons le bocage, valorisons nos haies – La production de plaquettes de bois. Chambre d'Agriculture de la Manche, 2p. Disponible en ligne : <http://www.manche.chambagri.fr/ntboisement.asp#>

CLERAN E., 2009a. Les repères de la production de bois déchiqueté des haies. l'Agriculteur Normand - l'Eure Agricole, Mars 2009

CLERAN E., 2009b. Sylviculture de la haie pour la production de bois énergie. Chambre d'Agriculture de la Manche, 1p. Disponible en ligne : [http://www.manche.chambagri.fr/iso\\_album/090331\\_syviculture\\_de\\_la\\_haie.pdf](http://www.manche.chambagri.fr/iso_album/090331_syviculture_de_la_haie.pdf)

CLUZEAU D., CANNAVACCIULO M., PERES G., 1999 - Indicateurs microbiologiques des sols : les lombriciens - Méthode d'échantillonnage dans les agrosystèmes en zone tempérée. In 12ème Colloque Viticole et Oenologique Ed. ITV Paris, p 25-35.

CLUZEAU D., GARNIER-ZARLY E., LAVELLE P., BLANCHART E., PERES G., ABLAIN F., CUENDET G., FAYOLLE L., 2005 - Chapitre 17 Faune du sol et Lombriciens dans les sols tempérés agricoles. In GIRARD M.C., WALTER C., REMY J.C., BERTHELIN J., MOREL J.L., 2005. Sols et Environnement. Dunod (Ed.) 816p

CLUZEAU D., GUO Z.T., CHAUSSOD D., FEDOROFF N., NORMAND M., PERRAUD A., 1994 - Interaction between soil, biological activities and organic matter enrichments in Champagne soils. In: Etchevers J.D. and Aguilar A. (Eds). Transactions of the XV World Congress of Soil Sc. INEG and CNA publishing, Mexico, Mex. Vol 4b, pp. 149-150.

COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES, 2002. Vers une stratégie

thématique pour la protection des sols - COM(2002) 179 final. Bruxelles le 16.4.2002, 39 p.

COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES, 2006. Vers une stratégie thématique pour la protection des sols - COM(2006) 231 final. Bruxelles le 22.9.2006, 13 p.

COSTANZA R., D'ARGE R., de GROOT R. et al., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital, Nature, 387, pp. 253-260.

COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2009. Interinstitutional File 2006/0086 (COD). Brussels, 16 June 2009

DAVET P. 1996. Vie microbienne du sol et production végétale. INRA, Editions, 383 p.

DEPRINCE A., 2003. La faune du sol : diversité, méthodes d'étude, fonctions et perspectives, Le Courrier de l'environnement n°49, pp. 123-138

DODELIN B., EYNARD-MACHET R.; ATHANAZE P. et ANDRE J., 2007. Les rémanents en foresterie et agriculture - Les branches, matériau d'avenir - Tec & Doc Lavoisier, 389p.

DOMMENECH G., 2007. Mycorhizes et bois raméal fragmenté : quels liens peut-on proposer ? In : DODELIN B., EYNARD-MACHET R.; ATHANAZE P. et ANDRE J., 2007. Les rémanents en foresterie et agriculture - Les branches, matériau d'avenir - Tec & Doc Lavoisier, 389p.

DOMMERMES Y., DUHOUX E., H G. DIEM, 1999. Les arbres fixateurs d'azote : caractéristiques fondamentales et rôle dans l'aménagement des écosystèmes méditerranéens et tropicaux, avec référence particulière aux zones, Montpellier, CIRAD, 499 p.

DOUGHERTY M.C., THEVATHASAN N.V., GORDON A.M., Lee H., Kort J., 2007. Nitrate and E. Coli NAR analysis in tile drain effluent from a mixed tree intercrop and monocrop system, When Trees and Crops Get Together. Proceedings of the 10th North American Agroforestry Conference, Québec City, Canada, Campeau A.O.a.S., ed.

DUCHEMIN M. 2007. Réduction de la pollution diffuse d'origine agricole à l'aide de bandes enherbées et arborées, When Trees and Crops Get Together. Proceedings of the 10th North American Agroforestry Conference, Québec City, Canada, Campeau A.O.a.S., ed. Edition Quae, Versailles, 180 p

FAO 2002, La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres - Rapport sur les ressources en sols du monde 96, Rome, 70p

FILSER J., FROMM H., NAGEL R.F., WINTER K. (1995). Effects of Previous Intensive Agricultural Management on Microorganisms and the Biodiversity of Soil Fauna. *Plant and Soil* 170(1): 123-129.

- 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
- GAUTRONNEAU Y. et MANICHON H., 1987. Etats internes gamma (G), delta (D), et phi (F). Guide méthodique du profil cultural. GEARA-CEREF, Paris-Lyon.
- GAVALAND A. and BURNEL L., 2005. Croissance et biomasse aérienne de noyers noirs, *Chambres d'agriculture* n°945, pp. 20-21
- GERMON J-C., CELLIER P., GABRIELLE B., HENAULT C., LAVILLE P., 2009. Sol et changement climatique, pp 42-47 in STENGEL P., BRUCKLER L. , BALESSENT J., 2009. *Le Sol*, Dossier INRA, Edition Quae, Versailles, 180 p.
- 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 pages.
- GIRARD M.C., WALTER C., REMY J.C., BERTHELIN J., MOREL J.L., 2005. *Sols et Environnement*. Dunod (Ed.) 816p
- GOBAT J.M. ; ARAGNO M. ; MATTHEY W. (2003) - *Le sol vivant : Bases de pédologie, Biologie des sols*. Presses polytechniques et universitaires romandes (Ed), 528p
- GODARD C., 2009. Production de biomasse de l'arbre hors-forêt : évaluation du potentiel d'un système agroforestier et comparaison avec un système de taillis et de haies champêtres. MSc Thesis, ENITA de Bordeaux, 127 p.
- GORDON AM, Naresh RPF and Thevathasn V., 2005. How much carbon can be stored in Canadian agro-ecosystems using a silvopastoral approach? In: Mosquera-Losada MR, McAdam JH and Riguerio-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
- ICRAF, 1996. Annual Report for 1995. International Centre for Research in Agroforestry, Nairobi, Kenya, 288p.
- IFEN 1998, *Le sol, un patrimoine à ménager*, Le 4 pages de l'Ifen, n°38, juillet - août 1998
- IFEN 2005a, *L'Erosion des sols, un phénomène à surveiller*, Les données de l'Environnement, n°106, 4p
- IFEN 2005b, *Les changements d'occupation des sols de 1990 à 2000 : plus d'artificial, moins de prairies et de bocages*, Les Données de l'environnement, n°101, 4p
- IFEN 2007, *Le stock de carbone dans les sols agricoles diminue*, Les données de l'environnement, n°121, 4p.
- IFEN, 2005c, « Les multiples valeurs de la forêt française », Les données de l'environnement, n° 105, août 2005, 4 p.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007. The physical science basis*. Cambridge University Press, UK 1009 p.
- IPCC. 2000. *Land use, land-use change, and forestry special report*. Cambridge University Press 377 pp.
- IZAC A.M.N., 2003. Economic aspects of soil fertility management and agroforestry practices. In: SCHROTH, G. and SINCLAIR, F. L. 2003. *Trees, crops and soil fertility: concepts and research methods*. CABI, Wallingford, Cambridge, UK, 464 p.
- JABIOL B., BRETHERS A., PONGE J6F., TOUTAIN F., BRUN J-J., 1995. *L'humus sous toutes ses formes*. ENGREF, Nancy, 64p.
- JÉGOU D., SCHRADER S., DIESTEL H., CLUZEAU D., 2001. Morphological, physical and biochemical characteristics of burrow walls formed by earthworms, *Applied Soil Ecology*, 17, pp. 165–174
- JOLIVET C., 2009. Mesurer l'état et l'évolution de la qualité des sols en France, p173 in STENGEL P., BRUCKLER L. , BALESSENT J., 2009. *Le Sol*, Dossier INRA, Edition Quae, Versailles, 180 p.
- JONES C.G, LAWTON J.H, SHACHACK M., 1994. Organisms as ecosystems engineers. *Oikos*, 69, 373-386.
- JOSE S, GILLESPIE AR, PALLARDY S.G., 2004. Interspecific interactions in temperate agroforestry. *Agrofor Syst* 61:237–255
- JOSE S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 76, pp. 1-10
- KING D., 2009. L'Europe met en chantier une directive européenne pour la protection des sols, Pourquoi une politique européenne sur ce thème ? pp.146-149 in STENGEL P., BRUCKLER L. , BALESSENT J., 2009. *Le Sol*, Dossier INRA, Edition Quae, Versailles, 180 p.
- KÖNIG D., 2007. Contribution de l'agroforesterie à la conservation de la fertilité des sols et à la lutte contre le réchauffement climatique au Rwanda, Actes des JSIRAUF, Hanoi, 6-9 novembre 2007

- KÖNIG, D., 1992. The potential of Agroforestry methods for erosion control in Rwanda. *Soil Technology*, 5, p130-139.
- KREMEN C., 2005. Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecology Letters*, 8, pp. 468-479
- LACOMBE S., BRADLEY R. L., HAMEL C., BEAULIEU C., 2009. Do tree-based intercropping systems increase the diversity and stability of soil microbial communities?, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 131, pp. 25-31
- LAFOLIE F., 2009. Le Sol et la ressource en eau, pp. 22-33. In STENGEL P., BRUCKLER L. , BALESSENT J., 2009. Le Sol, Dossier INRA, Edition Quae, Versailles, 180 p
- LAL, R., 2000. Soil conservation and restoration to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. III International Congress European Society for Soil Conservation, Valence.
- LALANDE R., FURLAN V., ANGERS D.A., LEMIEUX G., 1998. Soil improvement following addition of chipped wood from twigs. *American Journal of Alternative Agriculture* 13: 132-137.
- LE BISSONNAIS Y., THORETTE J., BARDET C., DAROUSSIN J., 2002. L'érosion hydrique des sols en France, INRA Orléans, IFEN 108 p.
- LE BISSONNAIS, Y.; CERDAN, O.; FOX, D.; GASCUEL-ODOUX, C.; MARTIN, P.; PLANCHON, O.; RAJOT, J.L.; REVEL, J.C. 2005. L'érosion des sols. In GIRARD M.C., WALTER C., REMY J.C., BERTHELIN J., MOREL J.L., 2005. Sols et Environnement. Dunod (Ed.) 816p
- LE ROUX X., BARBAULT R., BAUDRY J., BUREL F., DOUSSAN I., GARNIER E., HERZOG F., LAVOREL S., LIFRAN R., ROGER-ESTRADE J., SARTHOU J.P., TROMMETTER M. (éditeurs), 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), 116p.
- LEE K.H. and JOSE S., 2003. Soil respiration and microbial biomass in a pecan-cotton alley cropping system in southern USA. *Agrofor Syst* 58:45-54
- LEMANCEAU P., ALABOUVETTE Cl., COURNOYER B., LAURENT F., GIANINAZZI S., GOLOTTE A., HARTMANN A., MAZURIER S., SARNIGUET A., STEINBERG Ch., 2005. Chapitre 20 : Microflore des sols : intérêts et dangers pour les plantes, les animaux et l'homme, 446-466 In GIRARD M.C., WALTER C., REMY J.C., BERTHELIN J., MOREL J.L. (2005) Sols et Environnement. Dunod (Ed.) 816p
- LEMANCEAU P., LE ROUX X., MARTIN F., 2009. L'écologie microbienne du sol. Vers une approche intégrée, pp. 68-73 In STENGEL P., BRUCKLER L. , BALESSENT J., 2009. Le Sol, Dossier INRA,
- LEMIEUX G. 1996. Cet univers caché qui nous nourrit : le sol vivant, Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Université Laval, Québec, 36p.
- LEMIEUX G. and GERMAIN D., 2002. Le Bois Raméal Fragmenté : la clé de la fertilité durable du sol, Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Université de Laval, 2ème Ed., Québec, 26p.
- LEMIEUX G., 1990. Le bois raméal et la pédogenèse: une influence agricole et forestière directe, Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Université de Laval, Québec, 36p.
- LEONARD J., LE BISSONNAIS Y., ANDRIEUX P., DARBOUX F., 2009. L'érosion, un acteur majeur de la dégradation des sols et de l'environnement, pp. 128-131 in STENGEL P., BRUCKLER L. , BALESSENT J., 2009. Le Sol, Dossier INRA, Edition Quae, Versailles, 180 p.
- LETACON F., MOUSAIN D., GARBAYE J., BOUCHARD D., CHURIN J.L., ARGILLIER C., AMIRAULT J.M., GENERE B., 1997 Mycorhizes, pépinières et plantations forestières en France. *RFF*, 49, pp. 131-154.
- LEVEQUE C., MOUNOLOU J.C., 2001. Biodiversité. Dynamique biologique et conservation, Masson Sciences, Dunod, 248 p.
- LIAGRE F., 2006. Les Haies Rurales – Rôle, Création, Entretien. Ed. France Agricole, Paris, 320 p.
- LOTFI A., 2008. Durabilité écologique des paysages agricoles et production de bois, bocage et néobocage. PhD Thesis, Université de Rennes I, 241 p.
- LOZET J. & MATHIEU C., 1997. Dictionnaire de science du sol. Coll. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- MAISON BOTANIQUE, 2009. Les trognes, Brochure du Centre Européen de la trogne, sous presse
- MAP 2009, Objectif Terres 2020 – Pour un nouveau model agricole français, février 2009, 45p
- MEEDAT (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire), 2008. La valeur économique de la forêt méditerranéenne en France, Lettre Évaluation, n° 17, juin.
- MIDDLETON H. 2001. Agroforestry and its effects on ecological guilds and arthropod diversity. M.Sc.F. Thesis. Faculty of Forestry, University of Toronto. Toronto, Ontario, Canada, 108 pp.
- MONTAGNINI F. and NAIR P. K. R., 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 61, pp. 281-295

- MONTANRELLA L., 2004. La stratégie européenne de protection des sols : Un nouveau cadre. *Étude et Gestion des Sols*, Volume 11, 3, pp. 349-352.
- 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
- MUNGAI N. W., MOTAVALLI P.P, KREMER R. J., NELSON K. A., 2005. Spatial variation of soil enzyme activities and microbial functional diversity in temperate alley cropping systems, *Biol Fertil Soils*,42, pp. 129-136
- N'DAYEGAMIYE A. and ANGERS D.A., 1992. organic matter characteristics and water-stable aggregation of a sandy loam soil after 9 years of wood-residue applications, *Canadian Journal of Soil Science*, 73, pp. 115-122
- NAIR P.K.R., BURESH R.J., MUGENDI D.N., LATT C.R., 1999. Nutrient Cycling in Tropical Agroforestry Systems: Myths and Science. Chapter 1, pp. 1-31 in BUCK et al. 1999.
- 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.
- NOËL, B. 2005 Le Bois Raméal Fragmenté - Plus de carbone pour nos sols. CTA de Strée
- 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
- PAOLETTI M.G. and HASSALL M., 1999. Woodlice (Isopoda: Oniscidea): their potential for assessing sustainability and use as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74 (1999) 157–165
- PARK J., NEWMAN S.M. and COUSINS S.H. 1994. The effects of poplar (*P. trichocarpa* x *P. deltoids*) on soil biological properties in a silvoarable system. *Agroforest Syst* 25: 111–118.
- 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
- PENG, R. K., INCOLL, L. D., SUTTON, S. L., WRIGHT, C., and CHADWICK, A., 1993. Diversity of airborne arthropods in a silvoarable agroforestry system. *Journal of Applied Ecology* 30 : 551-562.
- PERES G., CLUZEAU D., CURMI P., HALLAIRE V., 1998. Earthworm activity and soil structure changes due to organic enrichments in vineyard systems, *Biol Fertil Soils*, 27, pp. 417– 424
- PLENCHETTE C., FORTIN J.A., FURLAN V., 1983 Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P-fertility. I. Mycorrhizal dependency under field conditions. *Plant and Soil* 70:199–209
- PLENCHETTE C., FURLAN V., FORTIN J.A., 1981 Growth stimulation of apple trees in unsterilized soil under field conditions by endomycorrhizal inoculation. *Can J Bot* 59:2003–2008
- POINTEREAU P., 2006. La haie en France et en Europe : évolution ou régression, au travers des politiques agricoles. *Premières Rencontres Nationales de la Haie Champêtre*, Auch, 9 p.
- PRICE G. W. and GORDON A. M. 1999. Spatial and temporal distribution of earthworms in a temperate intercropping system in southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 44; pp.141-149,
- ROBERT M, 2005. Chapitre 35 : La ressource en sols : menaces, nouveaux enjeux et mesures de protection, In GIRARD M.C., WALTER C., REMY J.C., BERTHELIN J., MOREL J.L., 2005. *Sols et Environnement*. Dunod (Ed.) 816p
- ROBERT M. and CHEVERRY C., 2009. Le sol: une contrainte pour la sécurité alimentaire mondiale pp. 122 -125 in STENGEL P., BRUCKLER L. , BALESSENT J., 2009. *Le Sol*, Dossier INRA, Edition Quae, Versailles, 180 p.
- ROBERT M. and RICHARD G., 2009. Enjeux environnementaux des techniques sans labour, pp. 138-141 in STENGEL P., BRUCKLER L. , BALESSENT J., 2009. *Le Sol*, Dossier INRA, Edition Quae, Versailles, 180 p
- ROOSE, E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédologique FAO Rome*,70, 420 p. Disponible en ligne: <http://www.fao.org/docrep/t1765f/t1765f00.htm>
- ROUSSEL F., 2009. Vers une reprise des négociations, *Actu Environnement* du 21/10/2009.
- SANCHEZ, P.A., BURESH, R.J., LEAKEY, R.R.B. 1999. Trees, soils and food security. *Philosophical Transactions Biological Sciences*,352, pp. 949-961
- SCEES (2004). L'utilisation du territoire en 2004. *Nouvelles séries de 1991 à 2003*, Agreste – Agriculture
- SCHROTH, G. and SINCLAIR, F. L. 2003. *Trees, crops and soil fertility: concepts and research methods*. CABI, Wallingford, Cambridge, UK, 464 p
- SCHROTH, G. and SINCLAIR, F. L. 2003. *Trees, crops and soil fertility: concepts and research methods*. CABI, Wallingford, Cambridge, UK, 464 p.

SEGHIER C., 2007. Le Parlement Européen approuve la directive sur la protection des sols, Actu Environnement du 11/10/2007.

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

SHEPERD T.G., 2000. Visual soil assessment – Volume I. Field guide for cropping and pastoral on flat to rolling country. Horizons.mw/Landcare Research; Palmerston North, 84 p.

SOLTNER D., 1996. Les Bases de la production végétale - Phytotechnie générale – Tome 1 Le Sol. Angers, Collection Sciences et Techniques Agricoles, 18ème Edition,

SOUTY-GROSSET C., BADENHAUSSER I., REYNOLDS J.D., MOREL A., 2005. Investigations on the potential of woodlice as bioindicators of grassland habitat quality. *European Journal of Soil Biology* 41, pp.109–116

STAMPS W. T. and LINIT M. J., 1998. Plant diversity and arthropod communities: Implications for temperate Agroforestry, *Agroforestry Systems*, 39, 73-89

STENGEL P., BRUCKLER L. , BALESSENT J., 2009. Le Sol, Dossier INRA, Edition Quae, Versailles, 180 p.

STEVANOVIC T., 2007. Constituants chimiques du bois et utilisation agro-écologique des bois raméaux fragmentés – In : Dodelin B., Eynard-Machet R.; Athanaze P. et André J., 2007. Les rémanents en foresterie et agriculture - Les branches, matériau d'avenir - Tec & Doc Lavoisier

TESSIER D., 2009. Les sols de France sont-ils fatigués ou appauvris ? pp. 126-127 in STENGEL P., BRUCKLER L. , BALESSENT J., 2009. Le Sol, Dossier INRA, Edition Quae, Versailles, 180 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,

TOURET V., 2002. Les grands types de bocages en Europe et leurs fonctions. Journées d'études Europeennes Sur Les Bocages. Actes du colloque, Cerizay, 6p.

TROUVELOT A, KOUGH JL & GIANINAZZI-PEARSON V., 1986. Mesure du taux de mycorhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. In : Physiological and Genetical Aspects of Mycorrhizae, V. Gianinazzi-Pearson and S. Gianinazzi (eds.). INRA Press, Paris, pp. 217-221.

UNEP - European Commission, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2001. Guidelines for erosion and desertification control management with particular reference to Mediterranean coastal areas. Mediterranean Action Plan. Priority Actions Programme Regional Activity Centre (PAP/RAC)

VAN NOORDWIJK M. and VERBIST B., 2004. Soil and water conservation. Chapter pp.131-134 in ELEVITCH C.R., 2004. The Overstory Book – Cultivating Connections with Trees, 2<sup>nd</sup> Edition. Elevitch Editor, Permanent Agriculture Resources, USA, 526 p.

WU J., JOERGENSEN R.G., POMMERENING B., CHAUSSOD R. and BROOKES P.C., 1991. Measurement of soil microbial biomass C by Fumigation-Extraction. An automated procedure. *Soil BiolBiochem.*, 22, pp 1167-1169.

YOUNG A., 1995. L'agroforesterie pour la conservation du sol. Wageningen, Centre Technique de Coopération Agricole et rurale (CTA), 194p.

Services	Valeur proposée	Remarques
<b>Services de prélèvement</b> - bois  - autres produits forestiers (hors gibier)	75 € (75 à 160 €)  10 à 15 €	Selon méthode d'estimation (bois sur pied ou après exploitation)
<b>Services de régulation</b> - fixation carbone - stockage carbone - autres gaz atmosphériques	115 € 414 € (207 à 414 €) Non évaluée	360 € en 2030 650 à 1 300 € en 2030 Manque de bilans quantitatifs fiables
<b>Services de régulation (suite)</b> - eau (quantité annuelle)  - eau (régulation des débits) - eau (qualité) - protection (érosion, crues) - biodiversité - autres services de régulation (santé, etc.)	0 €  Non évaluée 90 € Non évaluée Non évaluée directement Non évaluée	Hypothèse d'absence d'effet majeur des forêts sur le bilan hydrologique annuel Manque d'études pertinentes  Manque d'études pertinentes Évaluée via les autres services Manque d'études pertinentes
<b>Services culturels</b> - promenades (hors cueillette et chasse) - chasse - autres services culturels	200 € (0 à 1 000 €)  55-69 € Non évaluée	Selon fréquentation  Externalités négatives à déduire Manque d'études pertinentes
<b>TOTAL*</b> (min.-max.)**	<b>env. 970 €</b> 500 à plus de 2 000 €	

\* En prenant la valeur indiquée ou la moyenne de la fourchette indiquée.

\*\* En additionnant simplement les valeurs minimales et maximales.

**Tableau : Valeurs de référence proposées pour les services écosystémiques de la forêt française (en euro par hectare et par an). Source : Chevassus-au-Louis 2009.**

## - LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX -

FIGURE 1: EVOLUTIONS DU STOCK DE CARBONE DANS LE SOL ASSOCIEES AUX PRATIQUES PROVOQUANT LES STOCKAGES (0,5 TC/HA/AN DURANT LES 20 PREMIERES ANNEES) OU LES DESTOCKAGES (1 TC/HA/AN) EXTREMES. ....	11
FIGURE 2 : SIMULATION DU STOCKAGE ADDITIONNEL DE C DANS LES TERRES ARABLES FRANÇAISES SOUS HYPOTHESE D'UNE CONVERSION PROGRESSIVE AU SEMIS DIRECT EN 20 ANS. HYPOTHESES DE CONVERSION AU SEMIS DIRECT DE 10, 20, 50 ET 70% DES TERRES ARABLES. SOURCE : ARROUAYS ET AL. 2002 .....	12
FIGURE 3: SCHEMA CONCEPTUEL DE L'ORGANISATION DES SERVICES DES AGROECOSYSTEMES ADOPTE POUR CE CHAPITRE (MODIFIE D'APRES ZHANG ET AL., 2007 IN LE ROUX ET AL. 2008). ....	15
FIGURE 6 : CLASSIFICATION ET ROLE DES ORGANISMES VIVANTS DANS LE SOL SELON LEUR TAILLE, LEUR HABITAT ET LEUR FONCTION (ADAPTE DE GIRARD ET AL. 2005). ....	21
FIGURE 7 : MODELE DE TOUS LES POOLS ET FLUX DE CARBONE DANS UNE PARCELLE AGROFORESTIERE DE PEUPLIER AGE DE 13 ANS – STATION EXPERIMENTALE DE GUELPH, ONTARIO (CANADA). SOURCE : PEICHL ET AL. 2006. ....	30
FIGURE 11 : ABONDANCE TOTALE DES ARTHROPODES EN JUIN 1999 DANS LE TEMOIN AGROFORESTIER (ARBRES AGES DE 12 ANS) ET LE TEMOIN SANS ARBRE. SITE DE GUELPH, ONTARIO, CANADA (SOURCE : MIDDLETON 2001) .....	34
FIGURE 12: ECHELLES SPATIALES DE DIFFERENTS SERVICES ECOSYSTEMIQUES FOURNIS PAR LES SYSTEMES AGROFORESTIERS. SOURCE : ADAPTE DE IZAC 2003 ET KREMEN 2005. ....	36
FIGURE 13 : REDUCTION DES LINEAIRES DE HAIES EN FRANCE ENTRE LES ANNEES 1975 ET 2000 (SOURCE IFN) .....	37
FIGURE 14 : IMAGES SATELLITES DE LA PARCELLE A2 (AOÛT 2005) SUR LE DOMAINE DE RESTINCLIERES. SOURCE : GOOGLE®. ....	44
FIGURE 15 : IMAGES SATELLITES DES PARCELLES CONCERNEES SUR LE SITE DES EDUTS (AOÛT 2005). SOURCE : GOOGLE®. ....	44
FIGURE 16 : SCHEMATISATION DE L'APPROCHE METHODOLOGIQUE POUR L'EVALUATION DE LA FERTILITE BIOLOGIQUE ET ORGANIQUE DES SOLS. ....	46
FIGURE 17 : DETAILS DES PARAMETRES PRIS EN COMPTE DANS L'EVALUATION DE LA FERTILITE MICROBIOLOGIQUE ET ORGANIQUE DES SITES ETUDIES .....	47
FIGURE 18 : REPRESENTATION DES LIEUX D'ECHANTILLONNAGES DANS LES DIFFERENTS TEMOINS, SUR LES 2 SITES ETUDIES. ....	49
<hr style="width: 30%; margin: 20px auto;"/>	
TABLEAU 1: STOCKS MOYENS DE CARBONE SELON LES MODES D'OCCUPATION ET LES TYPES DE SOL. SOURCE : ADAPTE DE ARROUAYS ET AL. 2002 .....	9
TABLEAU 2 : COMPOSITION DE L'AIR DU SOL ET DE L'ATMOSPHERE EXTERIEURE. SOURCE : GOBAT ET AL. 2003 .....	20
TABLEAU 3: ESTIMATIONS DU STOCKAGE POTENTIEL DE CARBONE GRACE AUX PRATIQUES AGROFORESTIERES AUX USA D'ICI 2025. ADAPTE DE MONTAGNINI AND NAIR 2004. ....	28
TABLEAU 4 : POTENTIEL DE STOCKAGE DES PRINCIPAUX SYSTEMES AGROFORESTIERS EN FONCTION DU TYPE D'ARBRES ET DE LA DENSITE. ....	32
TABLEAU 5: EXEMPLE DE TECHNIQUES AGRICOLE ET OU D'AMENAGEMENTS DES ESPACES AGRICOLES FAVORABLES A LA BIODIVERSITE – PARTIE « ACCROISSEMENT DE LA DIVERSITE VEGETALE INTRA-PARCELLAIRE ». SOURCE : LE ROUX ET AL. 2008. ....	33
TABLEAU 6 : ESTIMATIONS ECONOMIQUES DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES RENDUS PAR L'AGROFORESTERIE SOURCE : ADAPTE DE CHEVASSUS-AU-LOUIS ET AL. 2009. ....	37
TABLEAU 7 : EVOLUTION DES SURFACES DE DIFFERENTES STRUCTURES ARBOREES EN FRANCE ENTRE 1982 ET 2004 - (EN MILLIERS D'HECTARES) (SOURCE SCEES) .....	38
TABLEAU 8 : PRODUCTION DE BOIS ENERGIE PAR DIFFERENTS TYPES DE HAIES DANS LA MANCHE (SOURCE : ADAPTE DE CLERAN 2009B) .....	39

TABLEAU 9 : LISTE NON-EXHAUSITVE DES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES BOIS RAMEAUX FRAGMENTES ET DE LEUR UTILISATION EN AGRICULTURE (SOURCE : DOMMENECH ET ASSELINEAU 2007. REALISATION HAMON 2009) .....	40
TABLEAU 10 : CONTRIBUTION A LA FORMATION D'HUMUS PAR DIFFERENTES SOURCES DE CARBONE (SOURCE : NOËL 2005). .....	41
TABLEAU 11 : PLAN D'ECHANTILLONNAGE POUR LES PRELEVEMENTS DANS LES DIFFERENTS TEMOINS DES SITES D'ETUDES .....	48