

Action 5

Développer l'agroforesterie dans les parcelles cultivées et les prairies pour favoriser le stockage du carbone dans le sol et dans la biomasse végétale

Auteurs

Aurélié Metay (Montpellier Supagro)
Jean-Pierre Butault (INRA-SAE2)
Laure Bamière (INRA-SAE2)

Appui scientifique interne

Denis Angers (Agriculture et Agroalimentaire Canada)
Claire Chenu (AgroParisTech)
Katja Klumpp (INRA-EFPA)

Extraction et traitement de données

Nathalie Delame (INRA-SAE2)
Christine Le Bas (INRA-EA)

Relecteurs scientifiques externes

Christian Dupraz (Montpellier Supagro)
Sébastien Fontaine (INRA-EFPA)
Jean-Michel Harmand (CIRAD)

Relecteur technique externe

Yves Gabory (AFAC)

1. Introduction : cadrage et description succincte de l'action

L'action décrite ici examine l'agroforesterie, soit l'introduction d'arbres au sein ou en périphérie (haies) de parcelles agricoles cultivées ou de prairies. L'action concerne donc la surface agricole cultivée ou non de l'exploitation. Dans la présente étude, nous ne supposons pas d'évolution des pratiques culturales sur la culture d'intérêt ou la prairie, due à l'introduction des arbres. Toutefois, l'introduction des arbres engendrera une baisse de la surface cultivée ou en prairies et, du fait des interactions arbres et cultures entrainera une baisse supplémentaire de production agricole sur la surface cultivée restante.

Le principal gaz concerné par cette action est le CO₂. Par cette action, nous visons principalement un captage de CO₂ atmosphérique à travers une augmentation du stockage de carbone dans la matière organique des sols et la biomasse végétale pérenne des arbres.

“Agroforesterie” est un terme générique qui désigne un mode d'exploitation des terres agricoles associant des arbres et des cultures ou des pâturages (Dupraz and Capillon, 2005 ; Gordon and Newman, 1997). Autrefois courantes en Europe, ces pratiques ont été abandonnées progressivement au cours du XX^e siècle (Dupraz and Liagre, 2008 ; Dupraz and Newman, 1997 ; Eichhorn et al., 2006 ; Mosquera-Losada et al., 2012), essentiellement pour des raisons liées à l'intensification et la mécanisation de l'agriculture.

Une haie est une formation linéaire arborée comportant des arbres et des arbustes sur au moins 25 mètres de long, sans interruption de plus de 10 mètres, sur une largeur d'assise inférieure à 20 mètres et d'une hauteur potentielle supérieure à 2 mètres (y compris les haies taillées de main d'homme) avec une concentration de 80 % de la biomasse sur moins de 2 mètres de largeur (IFN, 2010). La sous-action « haie » correspond donc à l'introduction de lignes d'arbres (haie) en périphérie de parcelles cultivées en culture pure ou prairies. N'est pas considéré dans cette étude le développement de haies par régénération naturelle assistée, conduisant à des embroussailllements contrôlables et exploitables ensuite pour le bois de feu.

Dans notre étude, la sous-action « agroforesterie » correspond à l'introduction d'arbres au sein de parcelles cultivées ou prairies et la sous-action « haies » correspond à l'introduction d'arbres en périphérie des parcelles.

2. Description de l'action

2.a. Mécanismes en jeu et émissions de GES associées

Le mécanisme principal de réduction des émissions de GES associée à l'introduction d'arbres en bordure ou au sein des parcelles cultivées en grandes cultures ou de prairies est le stockage additionnel de C dans les parties ligneuses des arbres (biomasse aérienne et souterraine). Ce stockage additionnel de carbone constitue un retrait de CO₂ de l'atmosphère. De plus, ces arbres enrichissent les matières organiques (MO) du sol grâce aux apports en litière aérienne (chute des feuilles), mais également grâce aux restitutions en profondeur via le turnover des racines fines et la libération d'exsudats racinaires. Un autre effet peut être évoqué : l'ombre des arbres diminue la température du sol, et peut indirectement réduire la minéralisation, donc les émissions de CO₂. Il est à noter que dans le cadre de cette étude, les éventuels gains de carbone liés à la protection du sol contre l'érosion par les arbres ne seront pas pris en compte car en absence d'arbres, les pertes par érosion ne représentent pas forcément une émission de GES - il peut en effet y avoir redéposition et accumulation du C en aval de la parcelle (van Oost et al., 2007).

Selon le devenir du bois produit, le stockage dans la biomasse est plus ou moins long. Le carbone stocké dans du bois d'œuvre le sera pour plusieurs dizaines voire plusieurs centaines d'années. A l'inverse, le carbone stocké dans les branches pourra servir à produire de l'énergie (plaquettes), et ainsi contribuer à une moindre utilisation de C fossile (substitution). Les branches peuvent également être broyées et servir d'amendement au sol contribuant ainsi à l'amélioration de sa fertilité et de son stock en carbone. Dans cette étude, nous faisons par la suite des hypothèses sur le bois produit pour chacune des sous-actions.

2.b. Sous-actions et éventuelles options techniques instruites dans la fiche

Le Ministère de l'Agriculture a précisé les conditions que les parcelles doivent respecter pour être considérées comme des parcelles agroforestières :

- association de sylviculture et agriculture sur les mêmes superficies ;
- densité d'arbres comprise entre 30 et 200 arbres par hectare ;
- positionnement des arbres compatible avec l'exploitation agricole, notamment cohérentes avec les surfaces parcellaires.

Quant aux haies, leur définition recouvre en réalité une diversité très grande, plantées ou non, à végétation basse, arbustives ou arborées, élaguées ou non et pouvant être disposées à plat, sur des levées de terre ou encore sur des talus de pierre. Une autre caractéristique déterminante est la structure du réseau de haies, décrite par leur densité, leur orientation, leur connexité et leur position dans le versant (Walter et al., 2003) ou leur largeur (Falloon et al., 2004).

Les actions proposées dans le cadre de cette étude portent sur des choix techniques, sans remise en cause majeure des systèmes de production et des niveaux de production. En conséquence, si l'on considère les surfaces de culture ou de prairie réduites, seule l'introduction d'arbres en faible densité est acceptable dans le cadre du cahier des charges général de l'étude. Nous choisissons donc d'examiner deux sous-actions « agroforesterie : culture d'arbres au sein de parcelles agricoles ou prairies » et « haies ». La sous-action agroforesterie concerne l'introduction d'arbres au sein d'une parcelle cultivée ou d'une prairie avec une densité de 30 à 50 arbres par ha » et la sous action « haies » correspond à la mise en place de 60 et 100 mètres linéaire par ha suivant que les haies concernent des parcelles cultivées ou des prairies respectivement. Ces densités sont en effet considérées comme les plus réalistes et les plus documentées quant à leurs effets sur les flux de carbone, par rapport aux autres options existantes (Tableau 5-1). En effet, pour une densité de 30 à 50 arbres par hectare, on estime la perte de surface de culture ou de prairie de l'ordre de 5% et dans le cas des haies, 60 et 100 mètres linéaires par ha correspondent à 1,2% et 2% de surfaces en moins pour les cultures et les prairies respectivement.

Tableau 5-1 : Description de l'action, des sous-actions et des options techniques considérées

Action	Sous –action	Option technique étudiée	Surface de la parcelle occupée par des arbres
Développer l'agroforesterie dans les parcelles cultivées et les prairies	1- Développer l'agroforesterie (lignes d'arbres au cœur des parcelles)	à faible densité (30 à 50 arbres par ha)	5%
	2- Développer les haies (lignes d'arbres en périphérie des parcelles)	sur 100 mètres linéaires par ha de prairies ou pâturages sur 60 mètres linéaires par ha de cultures	2% pour les prairies 1,2% pour les parcelles cultivées

Il est important de noter que le choix des arbres et leur disposition des arbres utilisés en agroforesterie ou dans les haies sont des facteurs de diversité intra-action au-delà de la densité d'arbres.

Choix des arbres

Le projet européen Silvoarable Agroforestry For Europe SAFE (2001-2005) a examiné l'adaptation de 5 espèces au contexte européen sur un gradient méditerranéen-nordique : *Quercus ilex* (chêne vert), *Pinus pinea* (pin parasol), *Populus spp.* (peuplier), *Prunus avium* (merisier), *Juglans spp* (noyer) (Dupraz et al., 2005). Les critères de sélection des essences sont : (i) un houppier peu dense qui convient bien pour les cultures qui ont besoin d'une luminosité importante ; (ii) un débournement tardif qui laisse par exemple aux céréales d'hiver le temps de développer leur surface foliaire ; (iii) les arbres à croissance rapide ou les arbres supportant bien les élagages qui diminuent la compétition pour la lumière et sont rapidement hors d'atteinte des machines ; (iv) éventuellement les arbres qui fixent l'azote symbiotiquement. Le choix des arbres devra intégrer les caractéristiques du milieu (pH et risques d'hydromorphie en particulier) (Dupraz and Liagre, 2008). Le choix des arbres relève également d'une logique économique puisque la valorisation de la parcelle en dépendra fortement ; généralement les propriétaires sont plus sensibles à la productivité des essences et à la valeur économique du bois produit (C Dupraz and F. Liagre 2008). Dans notre cas, pour la sous-action agroforesterie, nous traiterons d'espèces d'arbres à valorisation bois d'œuvre et non d'espèces fruitières qui pourraient être introduites également dans ces parcelles et contribuer à séquestrer le carbone dans le sol et la biomasse permanente.

Position et orientation des arbres dans la parcelle

Toutes les configurations sont possibles : en ligne, en carré, en quinconces, en courbes de niveaux à condition de respecter certains principes quant à l'espacement entre les lignes et la largeur de la tournière. La littérature technique recommande une distance entre les lignes au moins égale à deux fois la hauteur de l'arbre. Mais cela peut être aussi la largeur de la rampe de pulvérisation ou de la rampe d'irrigation tractée qui détermine cet écartement. Dans la plupart des études, on note que sont évaluées des structures d'arbres en allées. Pour le passage des machines et ainsi éviter les blessures sur les arbres, on peut laisser une bande enherbée entre la ligne d'arbre et la culture. Entre les arbres sur une même ligne, on préconise un espacement de 4 à 10 mètres. L'orientation des lignes d'arbres peut également varier d'une situation agroforestière à l'autre : une orientation nord-sud peut être conseillée pour homogénéiser l'éclairage de la culture et réduire l'impact de l'ombre des arbres. Cette ligne peut servir de protection et peut donc être installée perpendiculairement aux vents dominants et le long des courbes de niveaux pour limiter les effets de ruissellement sur les parcelles pentues ou sensibles à l'érosion (<http://arbres.paysages.33.free.fr/agroforesterie.htm>).

2.c. Rapports et expertises majeurs ayant déjà examiné/évalué l'action

Plusieurs rapports et expertises présentent des études proches de la présente (Tableau 5-2):

1. Arrouays, D.; Balesdent, J.; Germon, J.C.; Jayet, P.A.; Soussana, J.F.; Stengel, P., 2002. *Contribution à la lutte contre l'effet de serre, Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Rapport d'expertise scientifique collective*. Paris: INRA, 334 p.
http://www5.paris.inra.fr/depe/content/download/3187/32268/version/2/file/rapport_carbone_inra.pdf
2. Eagle, A.J.; Olander, L.P.; Henry, L.R.; Haugen-Kozyra, K.; Millar, N.; Robertson, G.P., 2012. *Greenhouse Gas Mitigation Potential of Agricultural Land Management in the United States - A Synthesis of the Literature*. Durham (USA): Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, (Report NI R 10-04), 76 p.
http://nicholasinstitute.duke.edu/ecosystem/land/TAGGDLitRev/at_download/paper
3. Kumar, B.M.; Nair, P.K.R., 2011. *Sequestration potential of agroforestry systems: opportunities and challenges*. Dordrecht: Springer Science (*Advances in Agroforestry*, n°8), 326 p.
http://library.uniteddiversity.coop/Permaculture/Agroforestry/Carbon_Sequestration_Potential_of_Agroforestry_Systems-Opportunities_and_Challenges.pdf

Le rapport de (Hamon, Christian Dupraz, and Fabien Liagre 2009) étudie également la question de l'atténuation du bilan gaz à effet de serre des parcelles agricoles via le développement de l'agroforesterie et estime via la modélisation (HiSafe¹) le potentiel d'atténuation en agroforesterie (via le stockage de carbone dans le sol et la biomasse végétale) entre 5.55 et 14.8 Mg CO₂e ha⁻¹ an⁻¹ selon la densité de plantations, la durée de la rotation et la vitesse de croissance des arbres (Hamon et al., 2009). Ces valeurs sont reprises dans la récente étude à l'échelle de l'Europe mettant en avant la contribution potentielle très importante à la séquestration de carbone à l'échelle européenne (Aertsens et al., 2013).

Tableau 5-2 : Analyse comparative de rapports et expertises récentes sur le sujet, basées sur des expérimentations (pays ou zone géographique, sous-action concernée, assiette maximale, gamme de potentiel d'atténuation)

Etude	Pays	Sous-action concernée	Assiette maximale	Potentiel d'atténuation (taux de stockage annuel dans parties aérienne et racinaire des arbres et dans le sol) ²
1) Arrouays <i>et al.</i> , 2002	France	Haies	Non évaluée	³ pour 100 mètres linéaires de haies: Flux net annuel de stockage initial 0,4625 MgCO ₂ e/ha/an et 0,37 MgCO ₂ e/ha/an à 20 ans, pour le sol uniquement
2) Eagle <i>et al.</i> , 2012	USA	Agroforesterie	10 Mha	4.97 MgCO ₂ e/ha/an
3) Kumar and Nair, 2011	Monde	Agroforesterie et haies ⁴	Estimée sur les USA : 17.9 Mha (10% de la surface agricole) en agroforesterie ⁵ 78 Mha en sylvopastoralisme	10.286 MgCO ₂ e/ha/an pour les brise-vent et les zones tampons plantées en arbres 12.58 MgCO ₂ e/ha/an pour l'agroforesterie 22.57 MgCO ₂ e/ha/an pour le sylvopastoralisme

¹ Le modèle Hi-sAFE est un modèle biophysique de fonctionnement des systèmes agroforestiers tempérés, conçu dans le cadre du projet SAFE sous l'hypothèse que le partage des ressources (lumière, eau et azote) au sein d'un système agroforestier est le déterminant majeur de sa productivité. (Talbot, 2011).

² Les taux en C ont été convertis en taux CO₂ e (*44/12)

³ L'unité de surface choisie est l'hectare. Par convention, le calcul est fait pour 100 m linéaires de haie par hectare. Le stockage par kilomètre linéaire de haie est donc 10 fois le stockage par hectare. Il est considéré que la haie peut augmenter le stock de carbone de 5 kgC/m² sur 10 m de large.

⁴ au sens *riparian buffer* (ripisylve) et *windbreaks* (coupe-vent)

⁵ agroforesterie pour "*alley cropping*"

3. Etat des connaissances sur les phénomènes/mécanismes sous-jacents et leur quantification

La différence d'émissions entre systèmes agroforestiers et conventionnels peut provenir :

- du stockage additionnel de carbone dans la biomasse végétale pérenne (aérienne et souterraine),
- de la restitution de matière organique au sol via la litière et les racines fines, engendrant un stockage additionnel de carbone dans le sol.

Les deux sections suivantes examinent la littérature sur le stockage additionnel de carbone dans les arbres et dans le sol ; ils montrent la variabilité des stockages mesurés expérimentalement suivant le type de système agroforestier mis en place notamment.

Stockage de carbone dans les arbres (Tableau 5-3)

Les systèmes agroforestiers stockent du carbone dans la biomasse des arbres (Peichl et al., 2006) au niveau des parties aériennes et racinaires (Rasse et al., 2005). De nombreux travaux ont estimé le stockage de C dans les arbres en agroforesterie (Nair et al., 2010), surtout en milieu tropical. Les volumes de bois sur pied estimés par l'IFN sont les bois et branches supérieurs à 4 cm de diamètre. Pour estimer la masse "branches <4 cm + racines", on utilise un coefficient d'extension égal à 39% de la masse de bois récoltée. 1 m³ de biomasse forestière équivaut environ à 0,5 tonne de matière sèche qui contient 45% de carbone. Donc, chaque m³ de bois brut fournit $0,5 \times 0,45 = 0,225$ Mg de carbone /m³.

Tableau 5-3 : Valeurs de stockage de carbone dans la végétation (partie aérienne et souterraine) de systèmes agroforestiers en région tempérée ou méditerranéenne, d'après (Kumar and Nair, 2011).

Système agroforestier : type, pays	Age (ans)	Densité d'arbres (arbres par ha)	Stockage moyen de carbone dans la végétation ⁶ (MgCO ₂ e/ha/an)	Références
Association orge- peuplier, Canada	13	111	3.071	(Peichl et al., 2006)
Association Douglas et <i>Trifolium subterraneum</i> , Etats-Unis	11	570	4.107	(Sharrow and Ismail, 2004)
Introduction <i>P. radiata</i> dans une prairie, Galice, Espagne	11	833	13.69	(Fernández-Núñez et al., 2010)
	11	2500	34.41	

Devenir de la biomasse aérienne des arbres

Dans notre étude, sur l'horizon de temps de 20 ans pris en compte, nous faisons deux hypothèses contrastées de devenir des parties aériennes récoltées :

- dans le cas de l'agroforesterie, nous considérons que la récolte de bois au terme de la rotation correspond à un stockage durable de C dans le cas de plantations de bois d'œuvre (noyer...);
- dans le cas des haies, nous considérerons que les parties aériennes récoltées ne sont pas des formes de stockage durable de carbone car valorisées sous forme de plaquette et bois énergie.

Ces hypothèses sont discutables car les usages des produits récoltés ne sont en réalité pas systématiques : par exemple, le bois issu des récoltes de parcelles agroforestières est utilisé comme bois raméal fragmenté ou bois de chauffage donc finalement déstocké tandis que le bois des haies peut dans certains cas être vendus comme bois d'œuvre.

Stockage de carbone dans les sols (Tableau 5-4)

Au voisinage des arbres, le stockage additionnel de C dans les systèmes agroforestiers ou à base de haies peut s'expliquer de deux manières (i) en augmentant les restitutions de C au sol via notamment la biomasse racinaire et son exsudation et les chutes de feuilles et de branchage éventuellement incorporées au sol par le labour ou l'activité faunique (ii) en limitant les sorties de C par minéralisation car les rangées d'arbres ne sont pas labourées. Sur la ligne d'arbres, on peut raisonnablement attendre une augmentation des stocks par les deux voies : biomasse souterraine des arbres importante, absence de travail du sol et donc limitation de la minéralisation (Balesdent et al., 2000). Toutefois, un labour profond pourrait induire également une réaction de la minéralisation des matières organiques du sol des horizons profonds via un *priming effect* (Fontaine et al. 2007). De plus, sur la ligne d'arbres se développe une végétation spontanée bien souvent herbacée. Ainsi, cette bande enherbée (1 m de large au minimum), on a "l'équivalent d'une prairie permanente" or les systèmes prairiaux sont reconnus pour leur impact positif sur les stocks de carbone.

⁶ méthode proposée par (P. K. R. Nair et al. 2010)

Pour la zone cultivée entre les rangées d'arbres, les entrées de C pourraient être supérieures en agroforesterie ou en système intégrant des haies par rapport à une culture pure (C des racines des arbres explorant les horizons profonds du sol sous culture + exsudation de ces racines, feuilles et branchage), et ce C pourrait être préférentiellement stabilisé⁷ dans les horizons du sol sous l'horizon de labour. Peu de travaux ont estimé les stocks de C dans les sols dans ces systèmes. Nair *et al.* rapportent des stocks de 24-302 MgC/ha à 1 m de profondeur (9 estimations disponibles) (Nair *et al.*, 2010). La grande variabilité observée (Tableau 5-4) est liée à la diversité des contextes pédoclimatiques et des systèmes agroforestiers eux-mêmes, ainsi qu'à la diversité des méthodes d'estimation des stocks (profondeur considérée, localisation de l'échantillonnage par rapport aux arbres).

Cette synthèse et l'examen de la littérature amènent les constats suivants :

- la majorité des travaux portent sur des systèmes tropicaux. Très peu d'estimations sont disponibles en milieu tempéré (Bambrick *et al.*, 2010; Oelbermann *et al.*, 2006) ou méditerranéen (Howlett *et al.*, 2011) ;
- les stocks sont affectés d'une importante variabilité spatiale, structurée par les rangées d'arbres (p.ex. (Bambrick *et al.*, 2010), mais qui est peu explicitée dans les travaux ;
- des parcelles témoins (sans arbres) ne sont pas toujours disponibles. Si des valeurs de stocks sont proposées, le stockage additionnel par rapport à une parcelle cultivée ne peut donc être estimé ;
- la moitié des estimations de stocks rapportées par Nair *et al.* ne concernent que les 40 cm superficiels du sol alors que l'enracinement des arbres est profond (Nair *et al.*, 2010).

Tableau 5-4 : Valeurs de stockage de carbone dans les sols sous différents systèmes agroforestiers en climat tempéré ou méditerranéen (d'après Kumar and Nair, 2011)

Systèmes agroforestiers testés	Lieu	Âge (ans)	Profondeur du sol (cm)	Densité d'arbres /ha	Stockage additionnel dans les sols MgCO ₂ e/ha/an	Référence
<i>Dehesa (systèmes sylvo pastoraux)</i> ⁸	Espagne	13	0-100	833 et 2500	-14.8 à +12.52	(Howlett <i>et al.</i> , 2011)
<i>Douglas x Trifolium subterraneum, ray grass, Etats-Unis</i>	Oregon, Etats-Unis	11	0-45	570	1.92	(Sharrow and Ismail, 2004)
<i>Peuplier hybride x orge</i>	Ontario, Canada	13	0-20	111	3.7	(Peichl <i>et al.</i> , 2006)
<i>Peuplier hybride x blé/ soja/ maïs</i>	Ontario, Canada	13	0-20	555	1.14	(Oelbermann <i>et al.</i> , 2006)
<i>Peuplier hybride x blé/ soja/ maïs</i>	Ontario, Canada	13	0-40	555	1.41	(Oelbermann <i>et al.</i> , 2006)
<i>Peuplier hybride x rotation blé/ soja/ maïs</i>	Ontario, Canada	21	0-30	111	1.09	(Bambrick <i>et al.</i> , 2010)

On ne dispose donc pas aujourd'hui d'estimations du potentiel de stockage de C de systèmes agroforestiers tempérés et méditerranéens pour l'ensemble du profil de sol. Le projet AGroforesteRle pour la Protection des SOLs AGRIPSOL (décembre 2012 - novembre 2015) est en cours sur l'étude de l'impact des arbres agroforestiers sur le fonctionnement biogéochimique du sol. Par ailleurs, l'ampleur du potentiel de stockage dépend de l'importance du stock initial de carbone: par exemple, sur un sol cultivé, le stockage additionnel de carbone lié à la plantation d'arbres est supérieur à celui observé sur un sol de prairie, naturellement plus riche en matière organique (Laganière, Angers, and Paré⁸ 2010).

Les valeurs compilées dans les Tableaux 5-2, 5-3 et 5-4 font état de valeurs de stockage de CO₂ très variables dans le sol et la biomasse aérienne pour des situations agroforestières à fortes densités (entre 111 et 2500 arbres par ha) et pour des durées souvent inférieures à 20 ans, avec des méthodes d'estimation discutables (profondeur d'échantillonnage notamment). Par ailleurs, les arbres plantés moins densément poussent plus vite (C Dupraz and F. Liagre 2008). Nous ne pouvons donc pas aisément extrapoler ces valeurs de stockage obtenues sur des pas de temps plus courts et à plus forte densité au cadre de notre étude.

⁷ valable si on considère le sol dans son ensemble mais à nuancer peut-être sur l'horizon de surface travaillé (0-30cm). En effet, les rendements de la culture intercalaire vont diminuer à partir d'un certain stade de développement des arbres. Moindre biomasse donc moindres restitutions au sol de la culture. A voir si la litière aérienne des arbres compense cette perte (plus les quelques racines superficielles). En sachant que les C/N et les teneurs en lignine de la paille et des feuilles ne sont pas les mêmes et leur dégradabilité non plus.

⁸ Une *dehesa* est un domaine foncier formé d'une pâture en sous-bois clairsemé. Ce mode d'exploitation agro-sylvo-pastoral se rencontre dans la péninsule ibérique et au Maghreb. On y rencontre des densités de 5 à 20 arbres par ha ((Jean-Marc Boffa, 2000)

Dans le cadre de cette étude en situation agroforestière avec des densités d'arbres faibles (30 à 50 arbres par ha), nous retenons donc la valeur de 3,7 MgCO₂/ha/an pour le stockage de carbone dans la biomasse et dans le sol, sur une durée de 20 ans, correspondant à l'extrapolation de la situation agroforestière canadienne (Peichl et al. 2006) proche de la nôtre, en prenant en compte un stockage dans le sol plus profond (au-delà de 20 cm). Nous construisons la fourchette de potentiel de stockage de CO₂ à partir de la **valeur basse estimée** d'après (Sharrow and Ismail 2004) **autour de 0.4 MgCO₂/ha/an et la valeur haute de 4,97 MgCO₂/ha/an** à partir de celle de (Eagle et al. 2012). On note donc une **très forte incertitude associée au stockage de carbone en agroforesterie**

Cas des haies

Peu de travaux ont quantifié le stockage de carbone dans le sol en relation avec les haies en milieu tempéré (Hamon, Christian Dupraz, and Fabien Liagre 2009; Pointereau 2006). L'INRA a travaillé sur le carbone organique des sols dans le réseau de bocage français ((Baudry et al. 2000; Walter et al. 2003), Parmi les deux effets engendrés par l'installation de haies (accroissement local des stocks et stockage amont (Eagle et al. 2012)), seul le premier est considéré dans une optique d'augmentation du stockage de carbone dans les sols par installation de nouvelles haies. L'expertise scientifique collective (Arrouays et al. 2002) reprend ces travaux et suggère des estimations de flux annuels nets (pour un scénario à 20 ans) de 0.37 MgCO₂e/ha/an pour 100 mètres linéaires de haie par hectare. 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). Le guide des valeurs Dia'terre® (ADEME 2011) fournit une gamme de valeurs entre 0 et 1.628 MgCO₂e par ha et par an (source : Solagro, d'après IFN) sans préciser le devenir des parties aériennes récoltées de la haie.

Tableau 5-5 : Variation de stock de carbone dans les haies d'après le Guide des valeurs Dia'terre® (Ademe, 2011)

Source de variation de stock de carbone suivant le type de haies (IFN)	Variation annuelle de stock de carbone (Mg CO ₂ e ha ⁻¹ an ⁻¹) ⁹
Haie-taillis (linéaire continu arboré avec arbres régulièrement recépés (taillés au ras tous les 15-20 ans); présence d'au moins d'arbustes ou buissons en partie basse)	1.628
Haie-mixte (mélange de haie-taillis et de haie-futaie (arbres recépés et arbres avec tronc); présence d'au moins d'arbustes ou buissons en partie basse)	1.419
Haie-futaie (haie linéaire continue avec des arbres non coupés au pied (présences de tronc); présence d'au moins d'arbustes ou buissons en partie basse)	0.836
Haie arbustive productive (haie linéaire continue sans arbre de haut jet (hauteur<5 m)	0.711
Haie récemment plantée (<5ans)	0.0
Valeur moyenne	0.92
Valeur basse = valeur moyenne – écart-type	0.28
Valeur haute = valeur moyenne + écart-type	1.56

Dans notre cas, nous faisons l'hypothèse que les haies sont exploitées régulièrement par coupe (tous les 15 ans) ce qui suppose de considérer à la fois le stockage dans le sol et le stockage dans la biomasse permanente non récoltée. **Pour les haies**, nous retenons la **valeur globale de 0,92 MgCO₂e/ha/an (valeur haute : 1.56 et valeur basse 0.28) pour le stockage additionnel dans le sol et les parties végétales non récoltées des haies introduites sur 100 mètres linéaires en prairie**. Ces valeurs sont estimées d'après la moyenne et l'écart-type des valeurs du tableau 5-5 incluant la valeur nulle pour les haies récemment plantées puisque nous considérons l'effet des haies depuis leur plantation. Ces valeurs sont cohérentes avec celle de l'expertise INRA de 0,37 MgCO₂e/ha/an qui ne considérait que le stockage dans le sol. Ces valeurs sont toutefois basses par rapport à des références obtenues récemment notamment celle d'une étude dans le Pays des Mauges (1,517-3,293 MgCO₂e/ha/an pour 100 mètres linéaire, source : AFAC¹⁰) mais cohérente avec la possible valorisation des produits des haies pour le bois de chauffage qui conduit donc à considérer que seul le carbone des racines et du sol est durablement stocké. Dans le cas des haies implantées dans des parcelles cultivées, la valeur de stockage retenue tient compte de la moindre longueur de la haie soit **0,55 MgCO₂e/ha/an (valeur basse : 0,17 et valeur haute : 0,94) pour 60 mètres linéaires**. La valorisation des haies comme bois énergie conduit à introduire également une atténuation des émissions induites par substitution d'énergie fossile.

⁹ Les taux en C ont été convertis en taux CO₂ e (*44/12)

¹⁰ Association Française des Arbres et des Haies Champêtres

Emissions de N₂O

Aucune référence ne permet d'établir que l'agroforesterie modifie les flux de N₂O à partir des sols cultivés ou des prairies. Par contre, si la réduction de la surface à fertiliser est prise en compte, cela engendre de fait une moindre émission de N₂O due à la fertilisation. L'éventuelle diminution de fertilisation liée à une amélioration de la fertilité du sol en particulière agroforestière n'a pas été prise en compte dans notre étude car elle n'est pas établie de façon certaine dans la littérature scientifique pour l'instant. Sur ce sujet, des études récentes (C. Dupraz et al. 2011) ont par exemple montré par simulation une forte baisse de la lixiviation dans les parcelles agroforestières ; d'autres études à base d'expérimentation sont en cours sur le sujet (projet ANR INTENS&FIX¹¹).

4. Degré et mode de prise en compte des principaux postes d'émissions concernés par l'action dans le cadre de l'inventaire national 2010 et perspectives d'évolution

Dans l'inventaire national (CITEPA, 2012), en l'absence de changement d'usage des sols, les variations de stocks de C dans les sols (et la biomasse) liées aux pratiques (dont l'agroforesterie, les haies) ne sont pas comptabilisées. Les émissions des sols agricoles quant à elles sont calculées dans la sous-catégorie « Sols agricoles » (4D) de la catégorie « Agriculture » (CRF4). Les haies brise-vent, les rideaux-abris arborés et les couloirs d'arbres ayant une superficie supérieure à 0,5 ha et une largeur de plus de 20 m sont également inclus dans la définition de forêt. Les parcelles agroforestières sont incluses dans la catégorie cultures. Il n'y a donc pas de prise en compte explicite et spécifique, ni des haies, ni de l'agroforesterie.

Notons à titre d'information que l'analyse (CITEPA, 2012) renseigne la rubrique "*Land converted to Forest Land*" qui correspond à 4 376 Gg de CO₂ e. en 1990 et 276 Gg en 2010 d'après l'analyse Tier 1 avec une incertitude sur les émissions estimées à 58 % d'après l'analyse Tier 2.

Notons que le CITEPA considère que pour la partie ligneuse présente dans les haies, bosquets, vergers ou vignes, l'accroissement compense la récolte (CITEPA, 2012). Cette hypothèse simplificatrice permet de s'affranchir de données sur la durée de vie des produits bois. Toutefois, elle conduit à dire qu'il n'y a pas de séquestration du C atmosphérique si on considère que tout le bois est brûlé en une année. Nous convenons que ces hypothèses sont très simplificatrices, d'autant que, bien souvent, les arbres produits en agroforesterie sont des bois d'œuvre, donc destinés à être conservés très longtemps, contrairement aux bois de chauffage.

Les lignes directrices du GIEC 2006 mentionnent l'agroforesterie comme une pratique stockant du carbone dans le sol et la biomasse qui correspond à une conversion de terres cultivées ou prairies en terres boisées, mais elles ne fixent pas de méthode de calcul explicite pour estimer les effets de l'agroforesterie.

En conclusion, à notre connaissance, il n'y a pas de prise en compte explicite et spécifique, ni des haies, ni de l'agroforesterie dans l'inventaire national : dans cette étude, le potentiel d'atténuation lié à l'introduction à l'agroforesterie et aux haies sera donc estimé à partir d'une compilation effet par effet des valeurs disponibles dans la littérature et les coefficients des inventaires.

5. Calcul du potentiel d'atténuation et du coût de chaque sous-action

5.1. Potentiel d'atténuation et du coût de la sous-action Agroforesterie

5.1.a. Potentiel d'atténuation unitaire

- Inventaire des effets sur les émissions

La sous-action "Développer l'agroforesterie à faible densité d'arbres" a donc des conséquences sur les émissions directes sur l'exploitation agricole, sur les émissions indirectes en amont et en aval de l'exploitation agricole (Tableau 5-6) et sur les émissions induites.

¹¹ <http://intens-fix.cirad.fr/le-projet-intens-fix>

Tableau 5-6 : Inventaire qualitatif des émissions directes, indirectes et induites par la sous-action Agroforesterie

Emissions directes	- N ₂ O émis à partir des apports de fertilisants azotés ¹² - CO₂ stocké dans le sol et dans la biomasse des arbres - CO ₂ émis par le fioul consommé lors des travaux agricoles supplémentaires liés à la sous-action
Emissions indirectes	- lixiviation des nitrates à partir des sols - dépôt d'ammoniac
Emissions induites	- CO ₂ émis lors de la fabrication et au transport de fertilisants azotés minéraux - CO ₂ émis lors de la fabrication de fioul utilisé de façon supplémentaire avec les nouvelles pratiques

• Quantification de l'atténuation

Sur la base des synthèses bibliographiques réalisées en Tableaux 5-2, 5-3 et 5-4, nous avons fixé le niveau de stockage dans le sol et la biomasse. Les autres effets ont été estimés à partir de la base de la méthode CITEPA et de la base Carbone de l'ADEME.

Le potentiel d'atténuation lié à la moindre émission de N₂O engendrée par la réduction des surfaces fertilisées diffère suivant les situations initiales (cultures ou prairies) sur lesquelles sont introduites les actions en raison de la réduction de la fertilisation associée. Dans le Tableau 5-7, nous avons considéré la fertilisation moyenne des cultures (136 kgN/ha) et la fertilisation moyenne des prairies à partir d'une moyenne pondérée des fertilisations pratiquées sur cultures et prairies (d'après l'enquête "Pratiques culturales" 2010). Nous considérerons dans les calculs le facteur d'émission du Référentiel Dia'terre® qui s'appuie sur Ges'tim pour un engrais azoté moyen (5,035 kgCO₂e par kgN épandu).

Enfin, la quantification du CO₂ émis par le fioul consommé par les machines agricoles sur les parcelles de l'exploitation lors des travaux agricoles supplémentaires nécessite de lister les opérations culturales associées à la mise en place et à l'entretien dans le temps de l'action. Pour ce faire, nous considérons les travaux du sol liés à la plantation, les travaux d'entretien et ceux de la récolte des arbres sur les 20 ans de présence des arbres (voir annexe 5-1). Conformément à la méthodologie de l'étude, les consommations de carburant liées au transport et à la valorisation de la récolte ne sont pas estimées.

• Conclusion : potentiel d'atténuation unitaire de la sous-action Agroforesterie

Le potentiel d'atténuation unitaire (tenant compte des émissions directes et indirectes) pour la sous-action agroforesterie est de 3,75 (0,45- 4,02) MgCO₂e/ha/an et de 3,7 (0,4-4) MgCO₂e/ha/an pour un hectare de cultures et un hectare de prairies respectivement. Les émissions induites sont très faibles et estimées à 0,033 MgCO₂e/ha/an et 0,002 MgCO₂e/ha/an pour un hectare de cultures et un hectare de prairies respectivement.

5.1.b. Ligne de base et conditions de développement de l'action

• Situation actuelle

En 2008, on estimait à environ 170 000 hectares la surface agroforestière en France (dont 140 000 ha de prés vergers autrement dit de vergers enherbés, le reste concernant des noyeraies, peupleraies et oliveraies...) ce qui concernent moins de 45 000 agriculteurs. Les surfaces d'agroforesterie "moderne" ou d'agrisylviculture (alignement d'arbres avec culture intercalaire mécanisée) en 2008 sont quant à elle estimées à 2 000 ha environ dont à peine 350 ont été plantés il y a plus de 15 ans (Grégoire Talbot 2011).

Les dynamiques régionales dépendent surtout de l'animation professionnelle. Certaines régions sont très actives (Midi-Pyrénées, Poitou-Charentes, Pays de Loire), d'autres quasi inertes (Rhône-Alpes, Bourgogne...). Pour l'instant, les 2 000 ha sont essentiellement implantés sur de bons sols.

Contexte politique et associatif

Au niveau européen, le Règlement de Développement Rural pour 2007-2013 intègre une mesure spéciale Agroforesterie (article 44) dont le cofinancement communautaire peut monter à 80%. Au niveau national, cette mesure a été activée en mai

¹² Si 10% de la surface est occupée par les arbres plutôt que par les cultures en arbres, cela occasionne une moindre consommation d'engrais azotés de 10% : il s'agit donc de faire le calcul des % de surfaces non fertilisées dans les scénarii ci-dessous, pour les haies comme pour l'agroforesterie, le problème consistant à évaluer en amont les doses de fertilisants effectivement utilisés pour chacune des situations culturales initiales.

Tableau 5-7 : Quantification de l'atténuation annuel et par ha de la sous-action Agroforesterie en comparaison avec la pratique conventionnelle. Les valeurs retenues se situent dans la fourchette basse des synthèses (tableaux 5-2, 5-3 et 5-4). Une valeur positive correspond à une atténuation, une valeur négative à une augmentation des émissions de GES

Types d'émission	Détail de l'émission	Mg CO ₂ e ha ⁻¹ an ⁻¹	source
Emissions directes et indirectes sur l'exploitation	CO₂ stocké dans le sol et dans la biomasse des arbres	+3.7 (0,4-4,97)	Synthèse bibliographique (tableaux 5-2, 5-3 et 5-4)
	N ₂ O émis lors des apports de fertilisants azotés sur l'exploitation ainsi que dans les espaces physiquement liés (lixiviation des nitrates à partir des sols et dépôt d'ammoniac)	+ % surface réduite ¹³ * moyenne fertilisation par ha * taux d'émission Pour les cultures : +0.05 * 136,51 (kgN/ha) * 9,24 (CO ₂ e/kgN) * 10 ⁻³ (kg en Mg) soit 0,063 Pour les prairies : +0.05*17.81 (kgN/ha) * 9,24 (CO ₂ e/kgN)*10 ⁻³ (kg en Mg) soit 0,008	Mode de calcul CITEPA 2010 pour le taux d'émission SAA 2010 pour la dose de fertilisant moyenne
	CO ₂ émis par le fioul consommé lors des travaux agricoles supplémentaires liés à la sous-action ;	Consommation supplémentaire de fioul ¹⁴ * taux d'émission	-5,2 L* 2.69 (kgCO ₂ e/L) * 10 ⁻³ (kg en Mg) soit 0,014
Emissions induites	CO ₂ émis lors de la fabrication et au transport de fertilisants azotés minéraux évités par la réduction de la surface cultivée	+%surface réduite*moyenne fertilisation par ha* taux d'émission Pour les cultures : +0.05 * 136,51 (kgN/ha) * 5.305 (kgCO ₂ e/kgN) * 10 ⁻³ (kg en Mg) soit 0,036 Pour les prairies : +0.05*17.81 (kgN/ha) * 5.305 (kgCO ₂ e/kgN) * 10 ⁻³ (kg en Mg) soit 0,005	Base Carbone® de l'ADEME
	CO ₂ émis lors de la fabrication de fioul utilisé de façon supplémentaire avec les nouvelles pratiques	Consommation supplémentaire de fioul ¹³ * taux d'émission	-5,2L * 0.563 (kgCO ₂ e/L) * 10 ⁻³ (kg en Mg) soit -0,003
Potentiel d'atténuation unitaire pour la sous-action agroforesterie (émissions directes et indirectes)		Pour les cultures : 3.75 (0.45- 4.02) Pour les prairies : 3.7 (0.4-4)	

¹³ L'introduction des arbres dans la parcelle agroforestière à faible densité (30-50 arbres par ha) induit une baisse de la surface cultivée ou en prairie de l'ordre de 5 %.

¹⁴ La consommation supplémentaire de fioul liée à l'itinéraire technique de l'agroforesterie a été estimée à 5,3 L ha⁻¹ an⁻¹ à partir des consommations de fioul pour les différentes opérations, voir annexe 5-1.

2009 et fait désormais partie des mesures du Programme de Développement Rural pour l'Hexagone (PDRH) pour 2007-2013. Cette mesure 222 « Première installation de systèmes agroforestiers sur des terres agricoles » a fait l'objet, en avril 2010, d'une circulaire du Ministère de l'agriculture (circulaire DGPAAT/SDBE/SDFB/C2010-3035¹⁵ expliquant les différentes conditions pour en bénéficier. La mesure est cofinancée par le FEADER (fond européen) et les collectivités territoriales souhaitant financer cette mesure.. Cette mesure permet de financer uniquement les coûts d'installation des arbres, ainsi que l'entretien de la plantation les premières années. Le taux de subvention est plafonné à 70% voire 80% dans les zones défavorisées. Le cahier des charges précis de la mesure est défini au niveau régional¹⁶. Il existe également une possibilité de subvention à la plantation d'arbres sur parcelles agricoles dans le cadre du Plan Végétal Environnement (PVE) faisant partie du PDRH. Ce PVE prévoit une ligne budgétaire pour la plantation d'arbres sous forme de haies ou d'arbres isolés. Il est à noter qu'il existe aujourd'hui une association française d'agroforesterie (AFAF), une association française des arbres et des haies champêtres (AFAC), et une fédération européenne (EURAF).

Perspectives de développement

Le projet SAFE (C Dupraz et al. 2005) a étudié les perspectives de développement de l'agroforesterie à l'échelle européenne. Ainsi, la méthode a consisté à superposer les terres susceptibles de permettre la croissance productive des arbres (56% des terres arables) et les terres à risque potentiel d'érosion, de lixiviation des nitrates et de perte de diversité paysagères (80% des terres arables européennes). Au final, l'introduction d'arbres sur 40% de la SAU serait efficace d'un point de vue des performances productives et environnementales (protéger 4% des terres cultivées, limiter la lixiviation des nitrates sur 18% des terres et diversifier les paysages sur 18% des terres arables européennes).

D'après certaines estimations (Agreste, 2012), le cap des 10 000 hectares d'agroforesterie moderne pourrait être atteint en France métropolitaine d'ici 2013. A ce propos, un CASDAR Agroforesterie (2009-2011) a travaillé à la création d'outils d'évaluation et de suivi des aménagements agroforestiers, en vue d'améliorer leur efficacité biologique.

• Conditions nécessaires à la mise en place de la sous-action (critères de détermination de l'assiette maximale technique)

L'assiette théorique correspond à l'ensemble des surfaces de cultures et les prairies (permanentes et temporaires). Les surfaces toujours en herbes peu productives (parcours, landes, alpages) sont exclues car difficilement accessibles (relief). Pour estimer l'assiette maximale technique, sont pris en compte dans cette étude les critères agronomiques définissant les zones agricoles potentiellement exploitables en agroforesterie. La faisabilité technique et socio-économique n'est pas considérée ici. L'agroforesterie représentant une innovation agronomique importante, des critères comme l'âge de l'agriculteur, la propension à prendre des risques, la sensibilité aux pratiques agroécologiques... sont importants à prendre en compte (Cardinael, 2011).

Les critères agronomiques principaux retenus dans le cadre de cette étude sont :

- (i) la profondeur du sol et le niveau de réserve utile (Cardinael, 2011)
- (ii) la taille des parcelles, compatibles avec la mécanisation du travail entre les rangées d'arbres (Dupraz and Liagre, 2008).

A dire d'expert, nous avons considéré un seuil acceptable de 1 m de profondeur de sol et de 120 mm de réserve utile ce qui correspond aux situations pour lesquelles on suppose que les cultures seront moins pénalisées par la présence des arbres¹⁷ au sein des parcelles. Pour intégrer un critère de praticabilité des parcelles après l'introduction des arbres, nous fixons à 4 ha le seuil de taille de parcelle éligible. Pour affiner l'assiette, on pourrait également exclure de l'estimation les sols hydromorphes.

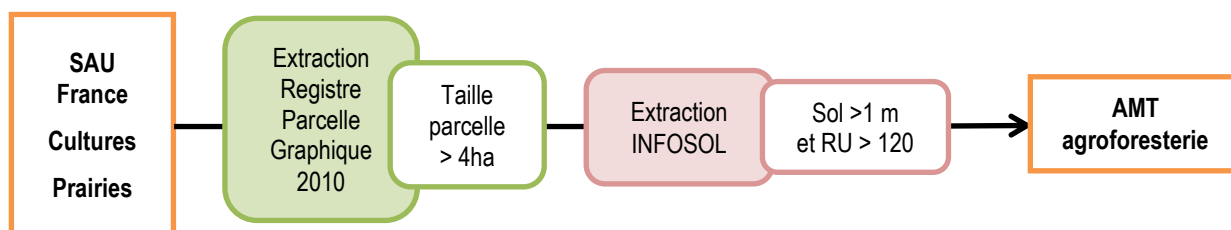


Figure 5-1. Méthode d'estimation de l'assiette maximale technique de la sous-action Agroforesterie sur la base de critères biophysiques et techniques

¹⁵ http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/agroforesterie_Circulaire_DGPAATC20103035.pdf

¹⁶ Pour savoir si une région a activé la mesure, il suffit de consulter les pages réglementations de www.agroforesterie.fr

¹⁷ A titre indicatif, les cultures éligibles à l'introduction d'arbres au sein des parcelles d'après une étude conduite en Languedoc – Roussillon (Cardinael, 2011) sont les surfaces cultivées en céréales, oléagineux, prairies et vignes.

Contrairement à (Cardinael 2011), nous excluons de notre calcul les surfaces plantées en vignes sur des parcelles supérieures à 4 ha (37% de la surface viticole française d'après l'extraction sur la base du RGP, soit environ 800 000 ha) car nous considérons que l'action consiste à introduire des arbres dans les parcelles, ce qui supposerait dans le cas des parcelles viticoles déjà en place d'arracher les vignes (Cardinael, 2011).

- Assiette maximale technique (AMT)

Tableau 5-8 : Estimation de l'AMT pour la sous-action agroforesterie, à partir des surfaces en cultures et en prairies considérées dans la SAU française (Mha)

	Surface en France considérée dans l'étude (Mha)	Assiette Maximale Technique de la sous-action Agroforesterie (Mha)
Cultures	13 750 385	3 888 639
Prairies (temporaires et permanentes)	9 804 937	1 976 669
Total	23 555 322	5 865 308

Le détail des calculs pour l'estimation de l'AMT et des cultures concernées est présenté en annexe 5-2.

- Scénario de diffusion (% de l'AMT atteint en 2030 et cinétique)

Compte tenu de la profonde mutation dans la stratégie de production que représente l'agroforesterie, il n'est pas envisageable de travailler sur un scénario d'adoption à 100% de cette assiette maximale technique. A titre indicatif, une étude propose un scénario à 10% d'adoption pour les cultures et 5% pour les prairies à l'horizon 2050 (Centre d'études et de prospective 2012).

Dans cette étude, nous proposons d'examiner deux scénarios pour l'agroforesterie :

- Hypothèse basse ou réaliste: scénario à 4% de l'assiette maximale technique atteint en 2030
- Hypothèse haute ou ambitieuse: scénario à 10% de l'assiette maximale technique atteint en 2030.

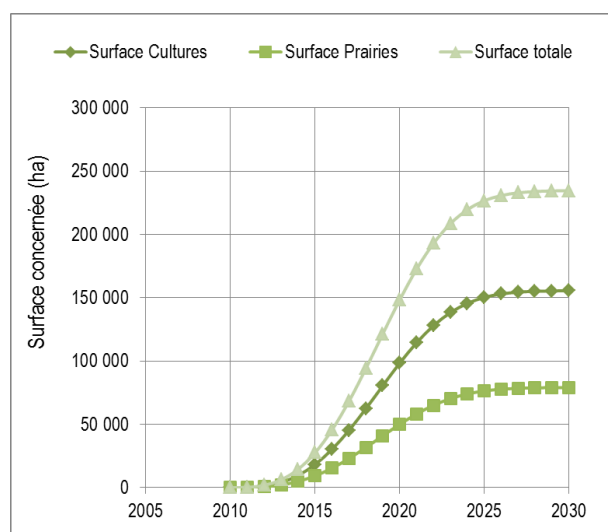


Figure 5-2 : Cinétique de diffusion de la sous-action Agroforesterie entre 2010 et 2030 sous hypothèse d'un taux de diffusion à 4% de l'AMT en 2030 et avec un point d'inflexion en 2020

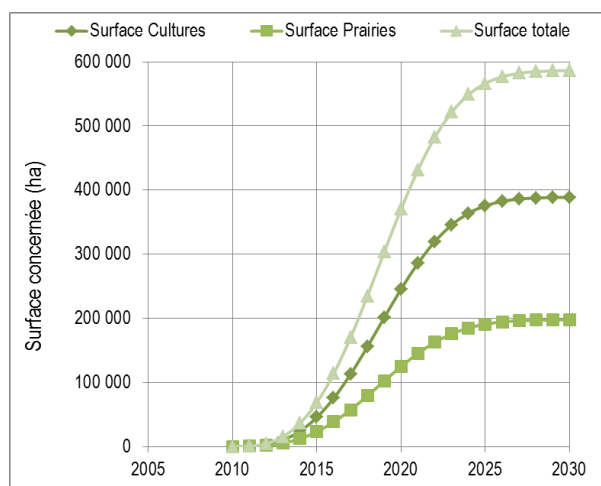


Figure 5-3 : cinétique de diffusion de la sous-action Agroforesterie entre 2010 et 2030 sous hypothèse d'un taux de diffusion à 10% de l'AMT en 2030 et avec un point d'inflexion en 2020

5.1.c. Potentiel d'atténuation à l'échelle du territoire français

Tableau 5-9 : Potentiels d'atténuation par la sous-action agroforesterie sous différentes hypothèses de diffusion en 2030 et cumulé sur la période 2010-2030 (MgCO_{2e})

		Cultures	Prairies	Total France
Valeur basse (MgCO _{2e} pour 2030)	Potentiel d'atténuation de l'année 2030 pour 4% de l'AMT (MgCO _{2e} pour l'année 2030) avec valeur basse du potentiel d'atténuation	69 817	31 142	100 958
Valeur centrale ((MgCO _{2e} pour 2030)	Potentiel d'atténuation de l'année 2030 pour 7% de l'AMT (MgCO _{2e} pour l'année 2030) avec valeur centrale du potentiel d'atténuation	1 020 153	510 956	1 531 109
Valeur haute (MgCO _{2e} pour 2030)	Potentiel d'atténuation de l'année 2030 pour 10% de l'AMT (MgCO _{2e} pour l'année 2030) avec valeur haute du potentiel d'atténuation	1 963 881	981 285	2 945 166
Valeur cumulée basse (MgCO _{2e} pour 2010-2030)	Atténuation cumulée pour 2010-2030 pour 4% de l'AMT en 2030 (Mg CO ₂ e) avec valeur basse du potentiel d'atténuation	808 072	360 443	1 168 515
Valeur cumulée centrale (MgCO _{2e} pour 2010-2030)	Atténuation cumulée pour 2010-2030 pour 7% de l'AMT en 2030 (Mg CO ₂ e) avec valeur centrale du potentiel d'atténuation	11 807 478	5 913 914	17 721 393
Valeur cumulée haute (MgCO _{2e} pour 2010-2030)	Atténuation cumulée sur la période 2010-2030 pour 10% de l'AMT atteinte en 2030 (Mg CO ₂ e) avec valeur haute du potentiel d'atténuation	22 730 397	11 357 606	34 088 003

5.1.d. Coûts et bénéfices induits par la sous-action agroforesterie

- Inventaire des modifications induites par la sous-action agroforesterie

L'introduction d'arbres au sein d'une parcelle suppose l'ajout d'un itinéraire technique (préparation du sol, plantation, entretien des arbres et récolte) qu'il s'agit d'évaluer pour en mesurer les coûts. L'itinéraire technique choisi correspond à l'implantation de 30 à 50 arbres par ha dont l'exploitation a lieu au-delà des 20 ans d'horizon de notre étude.

- Estimations des coûts/bénéfices de la sous-action Agroforesterie

Plusieurs études de calcul économique ont été effectuées sur l'agroforesterie (Gavaland et al., 2004), dans le cadre notamment du projet SAFE (Borrell, 2004 ; Graves et al., 2010). Ce projet SAFE a donné lieu à la production d'un logiciel de calcul de la rentabilité de l'agroforesterie auquel nous n'avons pas eu l'accès. L'estimation s'est, pour une large part, appuyée sur une actualisation des résultats publiés du projet SAFE (Annexe 5-3) mais ces résultats gagneraient sans doute à être confortés par une utilisation du logiciel. En particulier, les résultats disponibles sur le fonctionnement et sur la productivité de ces systèmes sont ponctuels et le plus souvent limités aux premières années suivant la plantation des arbres (Dupraz and Newman, 1997 ; Jose, 2009 ; Peichl et al., 2006) ce qui pose question sur la validité des estimations à plus long terme. Des travaux récents montrent que certains systèmes agroforestiers pourraient être jusqu'à 30 % plus productifs que des assolements avec parcelles agricoles d'un côté, et reboisement de terres agricoles de l'autre (Dupraz et al., 2010) ; (Graves et al., 2007). Dans de bonnes conditions, les arbres agroforestiers poussent plus vite et produisent plus de biomasse. Il s'agit d'arbres de pleine lumière qui peuvent bénéficier d'un environnement favorable à proximité de la culture (fertilisation de la culture, faible concurrence entre eux, travail du sol) (Dupraz and Liagre, 2008). A âge égal, ils peuvent ainsi produire 3 fois plus de biomasse par arbre (Gavaland and Burnel, 2005).

Cadre général et limites de l'estimation

Le cadre général de l'estimation induit de nombreuses limites :

- Les calculs sont effectués globalement sur la France sans prendre en compte donc les diversités régionales qui sont pourtant fondamentales dans le problème traité.
- Le champ concerne les cultures arables et les prairies. Sur ces dernières, les résultats sont à prendre avec prudence dans la mesure où peu d'études économiques abordent le sylvopastoralisme.
- Les calculs ne concernent que les plantations à faible densité considérées dans cette étude. Le cadre général du contrat stipule de ne prendre en compte que les changements n'aboutissant pas à un bouleversement des systèmes de production. Or, les plantations à densités moyenne et longue durée peuvent conduire, en fin de période avant la coupe des arbres à des baisses de production importante, voire même à un arrêt de la production agricole (Dupraz and Liagre, 2008).

L'estimation s'appuie sur des modèles simples concernant le peuplier, le merisier et le noyer. La densité de plantation est de 52 arbres pour les peupliers et de 30 arbres (50 initialement) pour les arbres fruitiers. La surface initiale plantée correspond à 5% de la surface totale, qui cadre bien avec l'option technique retenue dans le cadre du développement de l'agroforesterie.

Les éléments financiers pris en compte concernent les pertes de marges brutes agricoles, les coûts de plantation, d'entretien et d'exploitation des arbres et les gains liés aux ventes de bois. Ils sont actualisés à un taux de 4% et conduisent au calcul d'une annuité constante, conformément à la méthodologie de l'étude. Le détail de ces calculs est présenté en annexe 5-4. Ce calcul s'appuie toutefois sur un modèle économique simplifié de l'agroforesterie qu'il est nécessaire de présenter. Les subventions à l'agroforesterie ne sont pas prises en compte.

Une modélisation simplifiée de l'agroforesterie et l'utilisation du LER (Land Equivalent Ratio).

L'indice le plus couramment utilisé pour évaluer la productivité globale des cultures associées est le Land Equivalent Ratio (LER, (Mead and Willey, 1980 ; Vandermeer, 1989), qui est défini comme la somme des rendements relatifs des espèces associées. Il s'interprète comme la surface qu'il faudrait cultiver avec un assolement des cultures pures (témoin agricole et témoin forestier) pour produire autant (et dans les mêmes proportions) que ce qui est produit par un hectare de plantation agroforestière. Une association est donc considérée "globalement" intéressante d'un point de vue productif si son LER est supérieur à 1, c'est-à-dire si l'association permet de produire plus, par unité de surface, que les cultures pures correspondantes.

Or à notre connaissance, la seule mesure existante du LER d'un système agroforestier sur le cycle complet des arbres a été réalisée sur une association peuplier - blé dur (Dupraz et al., 2010) pour une densité voisine de 100 arbres . Pour différents clones de peupliers et différentes orientations des lignes d'arbres, ces auteurs rapportent un LER moyen de 1,3 pour une rotation agroforestière de 13 ans. Dans ce cas, le rendement relatif des cultures, intégré sur 13 ans est $yC = 0,50$, celui des arbres est $yT = 0,83$ (Talbot, 2011) ce qui revient à dire que la production de blé est réduite de moitié et que l'intérêt du système réside dans la production complémentaire de bois. Cette information est déterminante dans notre étude: en effet, une des hypothèses de travail est la conservation du niveau des productions agricoles. L'agroforesterie ou l'introduction des haies ne doit pas profondément perturber les biomasses produites, ce qui revient à dire que dans notre cas d'étude, une hypothèse de fortes densités d'arbres (100 ou 200) est inacceptable car trop préjudiciable en terme de réduction de surfaces cultivées en cultures annuelles et de réductions des rendements de la culture annuelle due à l'ombre.

Dans l'étude, les estimations présentées sont faites sous l'hypothèse d'un LER égal à 1,3 ce qui acceptable si l'on considère que la plus faible densité d'arbres que nous considérons dans l'étude n'affectera pas cette valeur de LER estimée avec des densités plus fortes (cf. Annexe 5-4).

L'estimation centrale

L'estimation centrale a été faite pour un LER de 1,3 et les prix des cultures et des bois de 2010. Trois essences d'arbres ont été considérées. On a pris par ailleurs un taux d'actualisation de 4%. L'estimation suppose en outre que tout le carbone qui a été stocké, autant dans les racines que dans les parties aériennes, reste stocké, ce qui est cohérent avec le fait que nous travaillons sur des hypothèses de production de bois d'œuvre.

Tableau 5- 10. Annuité constante € par hectare et coût d'atténuation par MgCO₂e évité dans les cas étudiés

	Agroforesterie introduite dans des parcelles cultivées			Agroforesterie introduite dans des prairies		
	Peuplier	Merisier	Noyer	Peuplier	Merisier	Noyer
Marge agricole (€/ha)	80	87	124	42	46	70
Coût arbre (€/ha)	96	66	78	141	82	105
Vente de bois (€/ha)	-131	-84	-147	-131	-84	-147
Annuité (€/ha/an)	45	69	54	52	45	28
Coût d'atténuation (€/MgCO ₂ e évité)	12	18	14	14	12	7

Pour les cultures, l'annuité par hectare varie entre 45 euros pour le peuplier et 69 euros pour le merisier, le noyer se situant à 54 euros. La perte sur les cultures intercalaires est la plus forte sur le noyer, compte tenu de la structure du LER. Le noyer bénéficie par contre d'une bonne valorisation, malgré la croissance lente de l'arbre. Le merisier est pénalisé par son prix de vente moyen mais bénéficie de coût de plantations faibles.

Pour les prairies, les pertes de production jouant moins, l'annuité par hectare est la plus faible pour le noyer, avec 28 euros. Avec une annuité par hectare de 52 euros, le peuplier perd son intérêt, même par rapport au merisier.

Si on retient dans chaque cas l'espèce moyenne, le coût de la tonne de CO₂ évitée est donc de 14 euros pour les cultures (cas du noyer) et de 12 euros pour les prairies (cas du merisier). Compte tenu des surfaces concernées, à l'horizon de 2030, le coût global est de 12 millions d'euros dans le scénario à 4% de diffusion et 29 millions d'euros dans le scénario à 10% de diffusion.

- **Conclusions : coût unitaire de la sous-action agroforesterie, coût annuel pour l'AMT (ou le % atteint) en 2030 et coût cumulé sur la période 2010-2030**

Tableau 5- 11: Coût moyen de la tonne carbone et coûts globaux en 2030 et sur la période 2010-2030 de l'agroforesterie dans les scénarios étudiés (Scénario 4% : 4% de l'AMT sont atteints en 2030 et Scénario 10% : 10% de l'AMT sont atteints en 2030).

	Cultures ¹⁸		Prairies		Total	
	Hypothèse basse Scénario 4%	Hypothèse haute Scénario 10%	Hypothèse basse Scénario 4%	Hypothèse haute Scénario 10%	Hypothèse basse Scénario 4%	Hypothèse haute Scénario 10%
Surface concernée (ha)	155 493	388 733	79 040	197 601	234 534	586 334
Atténuation (MgCO ₂ e/ha/an)	3,75	3,75	3,7	3,7	3,73	3,73
Atténuation totale (MgCO ₂ e)	583 100	1 457 750	292 449	731 122	875 549	2 188 873
Coût (€/MgCO ₂ e)	14	14	12	12	13	13
Coût total (millions euros)	8,2	20,4	3,5	8,8	11,7	29,2
Coût total cumulé (millions euros) sur la période 2010-2030	94,5	236,2	40,6	101,5	135,1	337,8

Dans l'hypothèse d'un carburant agricole non défiscalisé, le coût d'atténuation de la sous-action agroforesterie augmenterait de 0.6 €/MgCO₂e.

Sensibilité des résultats et fourchettes basses et hautes.

L'annexe 5-5 examine la sensibilité des résultats au système de prix des produits agricoles et du bois et au taux d'actualisation. On peut en tirer deux remarques fondamentales :

- Le système des prix agricoles élevés de 2010 diminue la rentabilité de l'agroforesterie, ce qui explique en partie l'appréciation différente de cette rentabilité par rapport au projet SAFE dont l'étude était fondée sur les prix de 2005.
- Le taux d'actualisation de 4% est très pénalisant pour l'agroforesterie. Or ce taux est contestable (Gollier 2011), surtout dans le contexte actuel d'un faible taux de croissance de l'économie qui semble perdurer.

D'autres éléments peuvent faire varier le coût d'atténuation de la tonne de carbone induite par l'agroforesterie, le choix du LER et l'appréciation des coûts de l'agroforesterie. Le tableau 5-12 donne une fourchette basse et une fourchette haute de ce coût d'atténuation pour différentes hypothèses, pour la même atténuation, et toujours dans le système des prix de 2010 et avec un taux d'actualisation de 4% :

- Dans la fourchette basse, le LER est de 1,4 (contre 1,3 dans le scénario central), il n'y a pas de surcoût des cultures (contre + 3%) et le coût de mécanisation est de 15 euros par hectare (contre 30 euros). On choisit par ailleurs l'espèce ayant le coût le plus faible sur les cultures ou sur les prairies (Tableau 5-10).
- Dans la fourchette haute, le LER est 1,2, et l'augmentation des coûts en culture est de 10%. On choisit par ailleurs l'espèce ayant le coût le plus élevé sur les cultures ou sur les prairies (Tableau 5-10).

Tableau 5-11: Estimation d'une fourchette basse et d'une fourchette haute pour le coût d'atténuation du CO₂.

		Scénario à 4% de l'AMT en 2030	Scénario à 10% de l'AMT en 2030
	Atténuation	875 549	2 188 873
Estimation basse	Coût (euros par Mg CO ₂ e)	-7	-7
	Coût global (millions euros)	-6	-15
Estimation haute	Coût (euros par Mg CO ₂ e)	30	30
	Coût global (millions euros)	26	65
Estimation centrale	Coût (euros par Mg CO ₂ e)	13	13
	Coût global (millions euros)	12	29

¹⁸ Compte tenu de potentiels d'atténuation unitaire différents (Tableau 5-7), cultures et prairies ont été distinguées

Le coût d'atténuation de la tonne de CO₂ varie entre – 7 euros (ce qui correspond à un gain net de 7 euros) et 30 euros, le scénario central retenant 13 euros.

Conclusion et mise en place des mesures incitatives.

Dans l'examen des variantes, les résultats sont ainsi très variables et sensibles aux hypothèses prises. Le scénario central retient un coût positif au développement de l'agroforesterie alors que le projet SAFE concluait, dans une certaine mesure, à la rentabilité de l'agroforesterie. Mais, les résultats du projet SAFE étaient aussi très variables ce qui amenaient les auteurs à présenter, avec réserve, la rentabilité de l'agroforesterie en termes de probabilités, selon des scénarios "optimistes" ou "pessimistes". Plus que le chiffre en soi, il faut donc plutôt retenir comme résultat que l'agroforesterie constitue une alternative intéressante par rapport à d'autres options (tel que le boisement des terres agricoles) pour contribuer au stockage du carbone même si son développement ne peut être que limité compte tenu des pertes de production agricoles qu'elle induit.

Ces calculs simples de rentabilité ne prennent pas en compte en outre les coûts d'opportunité qui peuvent être liés à la décision de mettre en œuvre un projet d'agroforesterie. Or, ceux-ci sont importants dans la mesure où il s'agit d'un investissement de long terme dans un avenir incertain. Cet investissement est possible pour l'exploitant sur des terres en fermage mais avec des difficultés supplémentaires (C Dupraz and F. Liagre 2008). De même, un propriétaire foncier peut réaliser un tel projet mais il doit s'entendre avec son locataire. Le statut juridique des terres aurait pu être un critère pour définir l'assiette.

Depuis 2007, l'agroforesterie peut être subventionnée dans le cadre du développement rural. Dix-neuf programmes sont actuellement en cours dans sept Etats membres. Les modalités de ce financement dépendent des régions et prennent souvent la forme d'une prise en charge par l'Etat d'une fraction des dépenses des premières années qui concernent essentiellement les coûts de plantation. Le Tableau 5-12 donne, par exemple, les variations de l'annuité à l'hectare dans le cas d'une prise en charge de 75% des dépenses des cinq premières années.

Tableau 5-12: Variations de l'annuité à l'hectare dans le cas d'une prise en charge de 75% des dépenses des cinq premières années (agroforesterie en cultures)

	Peuplier	Merisier	Noyer
Annuité /ha avant subvention	45	69	54
Annuité /ha après subvention	-2	49	25

L'annuité par hectare devient négative pour le peuplier et elle est divisée par deux pour le noyer. Cette mesure peut donc être assez incitative.

Dans le cadre de la nouvelle réforme de la PAC de 2013, de nouvelles opportunités s'ouvrent pour favoriser le développement de l'agroforesterie. Dans le projet de la Commission Européenne, 30% des fonds du premier pilier seraient destinés à un paiement vert à l'hectare pour les exploitations qui utiliseraient des pratiques agricoles considérées comme bénéfiques en termes de climat et d'environnement. Cette mesure concernerait notamment les agriculteurs qui consacraient 7% de leurs hectares admissibles à des surfaces d'intérêt écologique telles que des particularités topologiques ou des arbres. Une articulation de ce verdissement du premier pilier avec des mesures du second pilier peut favoriser le développement du stockage du carbone par l'agroforesterie.

- **Autres coûts (coût de transaction privé)**

Le coût de transaction privé est de 6.9 €/ha en moyenne, mais varie de 0.1 à 137.6 €/ha selon les exploitations.

5.1.e. Synthèse : récapitulatif de l'atténuation escomptée, du coût, et du coût de la tonne de CO₂e évitée pour l'agroforesterie

Pour la sous-action agroforesterie à faible densité, le potentiel d'atténuation (émissions directes et indirectes) a été estimé à 3,75 MgCO₂e/ha/an et 3,7 MgCO₂e/ha/an suivant que les arbres sont introduits dans des cultures ou dans des prairies. L'atténuation annuelle en 2030 est de 875 549 et 2 188 873 MgCO₂e sous hypothèse de diffusion de la sous action sur 4% et 10% de l'AMT respectivement. L'atténuation cumulée sur la période 2010-2030 est de 10 133 799 et 25 334 497 MgCO₂e sous hypothèse de diffusion de la sous action sur 4% et 10% de l'AMT respectivement. Ces estimations prennent en compte les émissions intervenant sur l'exploitation agricole et sur les espaces qui lui sont physiquement liés. La tonne de CO₂e évitée est estimée entre 12 et 14 euros. Sous hypothèse de 4% et 10% de diffusion à l'horizon 2030, le coût global cumulé sur la période 2010-2030 est estimé à 135,1 et 337,8 millions d'euros respectivement.

5.2. Potentiel d'atténuation et du coût de la sous-action Haies

5.2.a. Potentiel d'atténuation unitaire de la sous-action haies

• Inventaire des effets sur les émissions

La sous-action "Développer les haies sur 60 mètre linéaire dans les cultures et 100 mètres linéaires dans les prairies" a des conséquences sur les émissions directes sur l'exploitation agricole et sur les émissions indirectes en amont et en aval de l'exploitation agricole (Tableau 5-13). Notons que ces effets sont semblables qualitativement aux effets engendrés par l'agroforesterie. La sous-action a également des effets induits dont un non pris en compte dans le cas de l'agroforesterie, qui correspond à l'évitement de CO₂ émis par le fioul substitué par le bois énergie produit.

Tableau 5-13. Inventaire qualitatif des émissions directes, indirectes et induites par la sous-action Haies

Emissions directes	<ul style="list-style-type: none">- N₂O émis à partir des apports de fertilisants azotés¹⁹- CO₂ stocké dans le sol et dans les racines des arbres- CO₂ émis par le fuel consommé lors des travaux agricoles supplémentaires liés à la sous-action
Emissions indirectes	<ul style="list-style-type: none">- lixiviation des nitrates à partir des sols- dépôt d'ammoniac
Emissions induites	<ul style="list-style-type: none">- CO₂ émis lors de la fabrication et au transport de fertilisants azotés minéraux, évité par la réduction de la surface fertilisée- CO₂ émis lors de la fabrication de fuel utilisé de façon supplémentaire avec les nouvelles pratiques- CO₂ émis par le fioul substitué en cas de valorisation énergétique du bois des haies

• Quantification de l'atténuation

L'introduction des arbres en périphérie des parcelles induit une baisse de surface cultivée (de l'ordre de 2% si 100 mètres linéaires sont introduits, de l'ordre de 1,2% si 60 Mètres linéaires sont plantés).

Emissions directes et indirectes

L'analyse de la bibliographie (Tableau 5-5) ainsi que l'hypothèse que seul le carbone des racines et du sol est durablement stocké (valorisation en bois de chauffage des parties aériennes après la récolte des haies) nous conduit à retenir une valeur de stockage de 0,55 MgCO₂e/ha/an pour 60 mètres linéaires de haies en bordure de parcelles cultivées et 0,92 MgCO₂e/ha/an pour 100 mètres linéaires de haies.

Le potentiel d'atténuation lié à la moindre émission de N₂O engendré par la réduction des surfaces fertilisées diffère suivant les situations initiales (cultures ou prairies) sur lesquelles sont introduites les actions en raison de la réduction de la fertilisation associée. Dans le Tableau 5-15, nous avons considéré la fertilisation moyenne des cultures (136 kgN/ha) et la fertilisation moyennes des prairies à partir d'une moyenne pondérée des fertilisations pratiquées sur cultures et prairies (EPC 2006). Nous considérerons dans les calculs le facteur d'émission du Référentiel Dia'terre® pour un engrais azoté moyen (5,035 kgCO₂e/kgN épandu).

La consommation supplémentaire de fuel liée à l'itinéraire technique de la haie été estimée à 0,14 L/ha et 0,24 L/ha/an à partir des consommations de fuel pour les différentes opérations, pour les surfaces en cultures et en haies (voir Annexe 5-6).

Emissions induites

La quantification du CO₂ émis par le fioul consommé par les machines agricoles sur les parcelles de l'exploitation lors des travaux agricoles supplémentaires nécessite de lister les opérations culturales associées à la mise en place et à l'entretien dans le temps de la sous-action. Pour ce faire, nous considérons les travaux du sol liés à la plantation, aux travaux d'entretien et à la récolte des arbres sur les 20 ans de présence des arbres (voir Annexe 5-6). Il faut également prendre en compte la valorisation du bois récolté sous forme de bois énergie ce qui induit une baisse des émissions induites équivalent aux émissions issues du fioul non consommé. L'estimation de production de bois est : 8.25 MAP secs/ha tous les 15 ans dans le cas des haies dans les parcelles cultivées et 13.75 MAP secs par ha tous les 15 ans dans le cas des haies dans les prairies, avec comme référence 1 MAP sec = 90 L de fioul (Base Carbone® ADEME). Enfin, la consommation énergétique liée à l'exploitation de la récolte (transport, scierie, fabrication des plaquettes) n'est pas estimée.

¹⁹ L'introduction de haies rogne également la surface cultivée et induit donc une baisse d'utilisation de fertilisants : il s'agit donc de faire le calcul des % de surfaces non fertilisées dans les scénarii ci-dessous, pour les haies comme pour l'agroforesterie, le problème consistant à évaluer en amont les doses de fertilisants effectivement utilisés pour chacune des situations culturales initiales).

Tableau 5-15 : Quantification²⁰ de l'atténuation annuelle et par ha de la sous-action Haies.

Types d'émission	Détail de l'émission	Mg CO ₂ e ha ⁻¹ an ⁻¹		source
Emissions directes et indirectes sur l'exploitation	N ₂ O émis lors des apports de fertilisants azotés sur l'exploitation ainsi que dans les espaces physiquement liés (lixiviation des nitrates à partir des sols et dépôt d'ammoniac)	+ % surface réduite * moyenne fertilisation par ha * taux d'émission	Pour les cultures : +0.012 * 136,51 (kgN/ha) * 9,24 (CO ₂ e/kgN) * 10 ⁻³ (kg en Mg) soit 0,015 Pour les prairies : +0.02 * 17.81 (kg Nha ⁻¹) * 9,24 (CO ₂ e/kgN)*10 ⁻³ (kg en Mg) soit 0,003	Mode de calcul CITEPA 2010 et SAA 2010
	CO₂ stocké dans le sol et dans les racines des arbres	Pour les prairies : +0,92 (0,28 – 1,56) et pour les cultures : +0.55 (0,17-0,94)		Synthèse bibliographique
	CO ₂ émis par le fioul consommé lors des travaux agricoles supplémentaires liés à la sous-action ;	Consommation supplémentaire de fioul * taux d'émission	Pour les cultures : -0,14 L * 2.69 kgCO ₂ e/L * 10 ⁻³ (kg en Mg) soit -0,0004 Pour les prairies : -0,24 L * 2.69 kgCO ₂ e/L * 10 ⁻³ (kg en Mg) soit -0,0006	Base Carbone® de l'ADEME
Emissions induites	N ₂ O émis lors de la fabrication et du transport de fertilisants azotés minéraux évités par la réduction de la surface cultivée	+% surface réduite *moyenne fertilisation par ha * taux d'émission	Pour les cultures : +0.012 * 136,51 (kgN/ha) * 5.305 kg CO ₂ e par kg N*10 ⁻³ (kg en Mg) soit 0,008 Pour les prairies : +0.02*17.81 (kgN/ha)* 5.305 kgCO ₂ e/kgN * 10 ⁻³ (kg en Mg) soit 0,002	Base Carbone® de l'ADEME
	CO ₂ émis lors de la fabrication de fioul utilisé de façon supplémentaire avec les nouvelles pratiques	Consommation supplémentaire de fioul * taux d'émission	Pour les cultures : -0,14 L * 0.563 kg CO ₂ e L ⁻¹ * 10 ⁻³ (kg en Mg) soit -7.10 ⁻⁵ Pour les prairies : -0,24 L * 0.563 kg CO ₂ e L ⁻¹ * 10 ⁻³ (kg en Mg) soit -10 ⁻⁴	Base Carbone® de l'ADEME
	CO ₂ émis lors de l'utilisation du fioul réduit par la valorisation énergétique du bois des haies	Production annuelle de bois * équivalent de valorisation énergétique * taux d'émission	Pour les cultures : +1/15 *(90 x 8,25 L de fioul x 2.69 kgCO ₂ e/L) * 10 ⁻³ (kg en Mg) soit 0,133 Pour les prairies : +1/15 *(90 x 13,75 L de fioul x 2.69 kgCO ₂ e/L) * 10 ⁻³ (kg en Mg) soit 0, 222	Base Carbone® de l'ADEME
Potentiel d'atténuation unitaire pour la sous-action haies (émissions directes et indirectes)			Pour les cultures et les prairies : 0.55 (0,17-0,94) et 0,92 (0,28 – 1,56) respectivement	
Potentiel d'atténuation unitaire pour la sous-action haies (émissions induites)			Pour les cultures et les prairies : 0,69 (0,31–1,08) et 1,14 (0,5-1,78) respectivement	

²⁰ Une valeur positive correspond à une atténuation, une valeur négative à une augmentation des émissions de GES.

- Conclusion : potentiel d'atténuation unitaire de la sous-action haies

Le potentiel d'atténuation unitaire (tenant compte des émissions directes et indirectes) pour la sous-action haies est de 0,55 MgCO_{2e}/ha/an (entre 0,17 et 0,94) pour les cultures et 0,92 MgCO_{2e}/ha/an (entre 0,28 et 1,56) pour les prairies. Les émissions induites sont estimées à 0,14 et 0,22 MgCO_{2e}/ha/an pour les haies introduites en cultures ou sur des prairies respectivement, ce qui représente 14% et 24% des émissions directes et indirectes. Dans la suite, nous travaillerons sur une valeur globale d'atténuation de la sous-action haies basée sur le cumul des émissions directes et indirectes soit 0,55 et 0,92 MgCO_{2e}/ha/an pour les haies introduites dans les cultures et les prairies respectivement. Les émissions induites seront estimées par ailleurs : 0,14 et 0,22 MgCO_{2e} pour les haies dans les cultures et les prairies respectivement.

5.2.b. Ligne de base et conditions de développement de la sous-action haies

- Situation actuelle

Aujourd'hui

Les haies sont déjà présentes sur le territoire : les linéaires de haies sont évaluées à 566 000 km en 2006 (Pointereau 2006). D'après l'enquête Teruti-Lucas 2010, 503 274 ha (323397 et 179877 pour les surfaces cultivées et les surfaces destinées à l'élevage respectivement) de terres agricoles sont concernés par des haies et des alignements d'arbres. Nous faisons ici l'hypothèse qu'il s'agit de haies du type de celles prises en compte dans cette étude (entre 60 et 100 mètres linéaires par ha). En France, les taux les plus élevés de haies sont atteints dans les régions à bocage que sont le Nord-Pas-de-Calais, la Normandie, les Pays de la Loire et la Bretagne (entre 7 et 9% de la surface équivalente topographique) (Agreste 2012).

Contexte politique et associatif

Dans le cadre du bilan de santé de la PAC de 2008-2009, la conditionnalité a été renforcée et une nouvelle BCAE (Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales) a notamment été créée : "Maintien des éléments topographiques". Cette BCAE exige le maintien sur l'exploitation d'un pourcentage de "particularités topographiques" : haies, bosquets, jachères, murets, bordures de champs... et parcelles agroforestières.

Il est à noter qu'il existe aujourd'hui en France une Association Française des Arbres et des Haies Champêtres (AFAC).

Perspectives de développement

D'après l'évaluation ex post du Plan de Développement Rural National (2008), les mesures d'entretien des haies dominent les réalisations des MAE "linéaires" loin devant les créations de haies. La création de nouvelles haies ne représente que 3% des 80 000 km d'éléments linéaires engagés dans des MAE sur l'ensemble du programme. On note également que la moitié du linéaire engagé dans des MAE d'entretien des haies est situé dans les zones d'élevage herbagers et semi extensif et le reste principalement dans les zones mixtes et en diversification (régions traditionnelles de bocage). Concernant les espèces à planter dans les haies, des références nationales existent²¹.

- Conditions nécessaires à la mise en place de la sous-action haies (critères de détermination de l'assiette maximale technique)

L'assiette théorique correspond à l'ensemble des surfaces de cultures et les prairies (permanentes et temporaires). Les surfaces toujours en herbes peu productives (parcours, landes, alpages) sont exclues car difficilement accessibles (relief). Pour estimer l'assiette maximale technique, sont pris en compte dans cette étude les critères agronomiques définissant les zones agricoles potentiellement exploitables en agroforesterie. La faisabilité technique et socio-économique n'est pas considérée ici. L'option technique envisagée distingue déjà les surfaces en culture des surfaces en prairies en proposant d'introduire 60 mètres de linéaires de haies sur les cultures et 100 mètres de linéaires de haies dans les prairies. Les critères agronomiques principaux retenus dans le cadre de cette étude sont :

- (i) la profondeur du sol (Cardinael, 2011)
- (ii) la taille des parcelles, compatibles avec la mécanisation du travail entre les rangées d'arbres (Dupraz and Liagre, 2008).

²¹ La liste des essences préconisées est disponible sur le site de la préfecture du Rhône :

<http://www.rhone.pref.gouv.fr/web/176-prendre-soin-de-notre-patrimoine-naturel-et-paysager.php>

Liste des essences préconisées

La conception des haies bocagères pourra s'appuyer sur l'un des quatre cahiers des charges téléchargeables sur le site de la préfecture du Rhône : <http://www.rhone.pref.gouv.fr/web/176-prendre-soin-de-notre-patrimoine-naturel-et-paysager.php>

Cahier des charges technique pour les haies classiques, à utiliser également pour références coûts d'implantation d'une haie

A dire d'expert, nous avons considéré un seuil acceptable de 0,5 m de profondeur de sol. Ce seuil est nettement moins sélectif que dans le cas de la sous-action agroforesterie (1 m de profondeur et 120 mm de réserve utile) pour laquelle les arbres sont introduits à l'intérieur des parcelles et risqueraient d'engendrer une forte compétition si le sol était superficiel. Nous fixons à 4 ha le seuil de taille de parcelle éligible (Figure 5-4). Pour affiner l'assiette, on pourrait également exclure de l'estimation les sols hydromorphes.

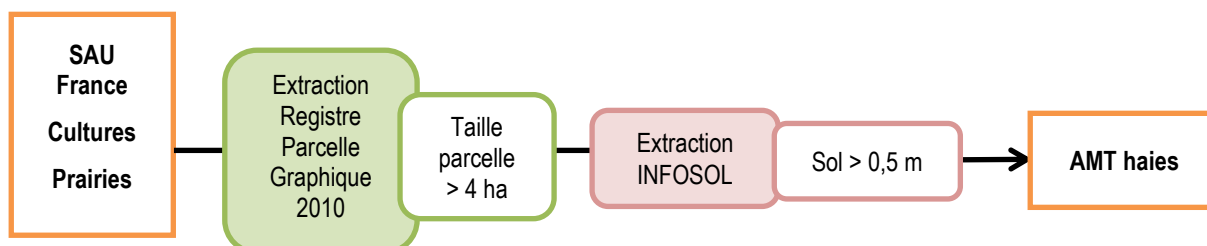


Figure 5-4: Méthode d'estimation de l'assiette maximale technique de la sous-action Haies sur la base de critères biophysiques et techniques

- Assiette maximale technique (AMT) de la sous-action haies

Tableau 5- 17 : Estimation de l'AMT pour la sous-action haies, à partir des surfaces de cultures et de prairies considérées sur la SAU française (Mha)

	Surface en France considérée dans l'étude (Mha)	Assiette Maximale Technique de la sous-action Haies (Mha)
Cultures	13 750 385	7 556 936
Prairies (temporaires et permanentes)	9 804 937	4 538 092
Total	23 555 322	12 095 028

Le détail du calcul de l'estimation de l'AMT pour la sous-action haies est présenté en annexe 5-7.

- Scénario de diffusion (% de l'AMT atteint en 2030 et cinétique)

Aujourd'hui, les 503 274 ha concernés par l'enquête Teruti-Lucas 2010 correspondent, si on fait l'hypothèse qu'ils sont inclus dans cette assiette (cultures et prairies,) à 4,1% de l'AMT précédemment déterminée. Compte tenu de la profonde mutation dans la stratégie de production que représente l'agroforesterie et dans une moindre mesure l'introduction de haies, il n'est pas envisageable de travailler sur un scénario d'adoption à 100% de cette assiette maximale technique. Comme pour l'agroforesterie, nous proposons d'examiner deux scénarios pour la diffusion des haies :

- Scénario 1 ou hypothèse basse: scénario réaliste à 10% de l'assiette maximale technique atteint en 2030;
- Scénario 2 ou hypothèse haute : scénario ambitieux à 20% de l'assiette maximale technique atteint en 2030.

Ces deux scénarios permettront d'encadrer le potentiel d'atténuation atteint en 2030. Nous proposons d'étudier une cinétique de type sigmoïde avec un point d'inflexion en 2020 (Figures 5-5 et 5-6).

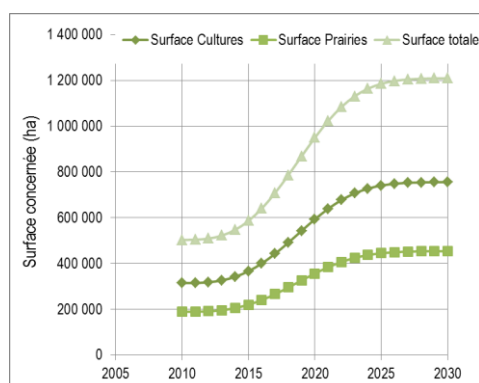


Figure 5-5 : Cinétique de diffusion de la sous-action Haies entre 2010 et 2030 en prenant compte l'état actuel de diffusion de la sous-action et sous hypothèse d'un taux de diffusion à 10% de l'AMT en 2030 et avec un point d'inflexion en 2020

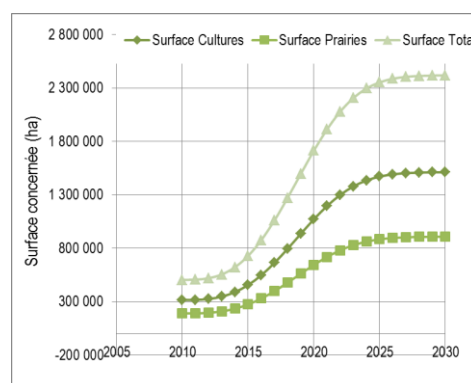


Figure 5-6 : Cinétique de diffusion de la sous-action Haies entre 2010 et 2030 en prenant compte l'état actuel de diffusion de la sous-action et sous hypothèse d'un taux de diffusion à 20% de l'AMT en 2030 et avec un point d'inflexion en 2020

5.2.c. Potentiel d'atténuation à l'échelle du territoire français

- Potentiel d'atténuation de l'année 2030 en appliquant la sous-action sur l'AMT (et, s'il est différent de l'AMT, le % de l'AMT atteint en 2030)

Tableau 5-18 : Potentiels d'atténuation (émissions directes et indirectes) par la sous-action Haies sous différentes hypothèses de diffusion en 2030 et cumulés sur la période 2010-2030 (Mg CO₂ e).

Les valeurs basse et haute correspondent à des scénarios d'adoption de 10% avec potentiel d'atténuation unitaire bas et 20% de l'AMT avec potentiel d'atténuation unitaire haut en 2030.

Atténuations par la sous-action Haies (émissions directes et indirectes)		Cultures	Prairies	Total France
Valeur basse (MgCO ₂ e pour l'année 2030)	Potentiel d'atténuation de l'année 2030 pour 10% de l'AMT avec valeur basse pour l'atténuation unitaire	137 509	135 662	273 172
Valeur moyenne (MgCO ₂ e pour l'année 2030)	Potentiel d'atténuation de l'année 2030 pour 15% de l'AMT avec valeur centrale pour l'atténuation unitaire	636 895	639 035	1 275 931
Valeur haute (MgCO ₂ e pour l'année 2030)	Potentiel d'atténuation de l'année 2030 pour 20% de l'AMT avec valeur haute pour l'atténuation unitaire	1 438 458	1 432 749	2 871 207
Atténuation cumulée sur la période 2010-2030 pour 10% de l'AMT en 2030 avec valeur basse pour l'atténuation unitaire		2 130 989	2 102 367	4 233 356
Atténuation cumulée sur la période 2010-2030 pour 15% de l'AMT en 2030 avec valeur centrale pour l'atténuation unitaire		9 037 267	9 067 633	18 104 901
Atténuation cumulée sur la période 2010-2030 pour 20% de l'AMT en 2030 avec valeur haute pour l'atténuation unitaire		19 470 649	19 393 364	38 864 013

Tableau 5-19 : Potentiels d'atténuation liés aux émissions induites par la sous-action Haies sous différentes hypothèses de diffusion en 2030 et cumulés sur la période 2010-2030 (Mg CO₂ e).

Les valeurs basse et haute correspondent à des scénarios d'adoption de 10% et 20% de l'AMT en 2030 respectivement.

Atténuations par la sous-action Haies (émissions induites)		Cultures	Prairies	Total France
Valeur basse (MgCO ₂ e pour l'année 2030)	Potentiel d'atténuation de l'année 2030 pour 10% de l'AMT	106 777	101 444	208 221
Valeur basse (MgCO ₂ e pour 2010- 2030)	Potentiel d'atténuation cumulé sur la période 2010-2030 pour 10% de l'AMT en 2030	1 654 726	1 572 088	3 226 814
Valeur haute (MgCO ₂ e pour l'année 2030)	Potentiel d'atténuation de l'année 2030 pour 20% de l'AMT	213 539	202 874	416 413
Valeur haute (MgCO ₂ e pour 2010-2030)	Potentiel d'atténuation cumulé sur la période 2010-2030 pour 20% de l'AMT en 2030	2 890 412	2 746 063	5 636 475

5.2.d. Coûts et bénéfices induits par la sous-action haies

- Inventaire des modifications induites par la sous-action haies

La consultation de références techniques sur les haies et l'expertise de l'AFHAC nous ont permis de reconstituer un itinéraire technique type pour l'installation, l'entretien et la récolte des haies (voir annexe 5-6).

Implantation de la haie

La haie est plantée sur un rang avec une densité de 1.1 plant par mètre linéaire et 1 arbre de haut jet tous les 9 mètres. Les arbres de haut jet ont une protection contre les cervidés et les plants une protection contre les lapins, les deux étant tutorés. Nous utilisons un paillage "naturel" biodégradable. La préparation du sol consiste à enfouir la végétation existante avec un cultivateur lourd, à sous-soler avec une sous-soleuse, à émietter la terre avec une herse rotative. Pour la pose du paillage, nous utilisons un dérouleur. La plantation est faite à la main. Enfin il faut rajouter, soit dans le coût de la haie, soit dans les coûts de transaction privés, l'ingénierie d'accompagnement du projet pour un montant de 3€/mètre linéaire (entre 2 et 4).

Entretien de la haie

Un désherbage est pratiqué 2 fois la première année et 1 fois la deuxième année suivant l'implantation de la haie. Ensuite, les bordures de champs étant gyrobroyées tous les ans, nous affectons un demi-passage à la haie. Un recépage manuel a

lieu une fois au cours des 5 premières années à une cadence de 300 mètres linéaires/heure. Nous le plaçons en année 2. Nous avons initialement prévu une taille d'entretien tous les 2 ans à partir de la 3^{ème} année, avec un lamier à couteaux, pour un coût de 155 €/km. Toutefois, il apparaît que ce type d'élagage n'est pas compatible avec la production de bois énergie, nuit à la production de biomasse de la haie, épuise les arbres et peut nuire aussi aux autres fonctions de la haie (Liagre, 2006). Nous opterons donc plutôt pour un passage de lamier à scie entre 2 coupes à ras, pour contenir le développement de la haie. Nous plaçons ce passage en année 9, puis 8 ans après chaque coupe à ras. La taille des hauts jets a lieu 4 fois au cours des 8 premières années à raison de 3 mn par arbre. Nous la plaçons en années 1, 2, 4, et 6.

Récolte des haies

La haie est normalement implantée pour des siècles. Pour la régénérer, on procède à une coupe à ras tous les 15 ans dans l'idéal. Comme précisé plus haut, nous supposons que le bois coupé est décheté pour produire des plaquettes et être valorisé sous forme de bois-énergie.

Changement d'usage des sols

Nous faisons l'hypothèse qu'une haie fait 2 mètres de largeur, soit 2 m² /mètre linéaire, soit encore 0.0002 ha/mètre linéaire. Dans notre étude, les haies représentent donc respectivement 1.2% et 2% de la surface d'un hectare de culture et de prairie. Cette haie prend la place des cultures ou prairies existantes, ce qui engendre une perte de revenu. Pour la calculer, nous utilisons les mêmes marges que dans la sous-action agroforesterie.

• Estimations des coûts/bénéfices

Les éléments financiers pris en compte concernent les pertes de marges brutes agricoles, les coûts d'implantation, d'entretien et d'exploitation des haies, les gains liés à la vente de bois et l'ingénierie d'accompagnement du projet. Ils sont actualisés à un taux de 4% et conduisent au calcul d'une annuité constante (tableau 5-18). Le détail de ces calculs est présenté en annexe 5-8.

D'après l'AFHAC, 5 personnes plantent 350 mètres linéaires de haie en 3h en travaillant soigneusement, soit 3 minutes par mètre linéaire pour une personne seule. Après calcul et compte tenu des autres références disponibles, il nous semble que le coût total d'implantation (3,8 €/mètre linéaire) est sous-estimé, et nous testons une valeur couramment trouvée dans les plaquettes d'information sur les haies qui est 15 €/mètre linéaire.

Nous recalculons le coût du lamier en fonction de cette modification et des données du barème d'entraide CUMA.

D'après l'AFHAC, la coupe et le déchetage coutent 15 €/MAP vert, soit 45 €/tonne verte. Lors de cette coupe, on récoltera 0,15 MAP verts / mètre linéaire (3 MAP verts = 1 tonne de bois à 45% d'humidité). La plaquette verte est transportée à une plateforme ou son lieu de stockage pour un coût de 20 €/tonne verte. Ensuite, après quelques mois, elle est vendue à 125 €/tonne à 20% d'humidité (4 MAP "secs" = 1 tonne à 20% à ce moment).

Tableau 5-20. Décomposition du coût unitaire et coût d'atténuation de la sous-action haie, hors coûts de transaction.

	Haies dans les cultures	Haies dans les prairies	Total ²²
Surfaces concernées (ha) (AMT)	7 556 936	4 538 092	12 095 028
Annuités (€/ha/an)			
Ingénierie	8,69	14,48	10,86
Implantation	43,44	72,39	54,30
Recépage	0,15	0,25	0,19
Désherbage	2,16	3,60	2,70
Taille d'entretien	0,51	0,85	0,64
Taille de formation des hauts jets	0,97	1,61	1,21
Perte de revenu (changement d'usage des sols)	8,99	9,20	9,07
Récolte	9,74	16,23	12,17
Vente du bois	-12,88	-21,46	-16,10
Annuité totale (€/ha/an)	61,76	97,15	75,04
Atténuation (MgCO _{2e} /ha/an)	0,55	0,92	0,69
Coût d'atténuation (€/MgCO_{2e})	112,29	105,60	108,94

²² Les valeurs par ha correspondant à la colonne totale sont calculées *au prorata* des surfaces correspondantes

- **Autres coûts (coût de transaction privé)**

Le coût de transaction privé est de 6.9 €/ha en moyenne, mais varie de 0.1 à 137.6 €/ha selon les exploitations.

- **Conclusions : coût unitaire de la sous-action, coût annuel pour l'AMT (ou le % atteint) en 2030 et coût cumulé sur la période 2010-2030**

Si l'on ne comptabilise pas les coûts d'ingénierie dans le coût unitaire, celui-ci passe de 75,04 à 64,18 €/ha/an. Le coût d'atténuation passe quant à lui de 108,94 €/MgCO_{2e} à 93,01 €/MgCO_{2e}. On peut imaginer que les coûts d'ingénierie diminuent avec le développement des haies, par effet d'apprentissage.

D'autre part, si le carburant agricole n'était pas défiscalisé, le coût d'atténuation de la sous-action haies augmenterait de 0.09 €/MgCO_{2e}.

Tableau 5-121 : Coûts unitaires, annuels et cumulés, hors coûts de transaction, pour la sous-action haies sous les deux hypothèses de diffusion

Hypothèse de diffusion	Valeur basse (10% de l'AMT atteinte en 2030)			Valeur haute (20% de l'AMT atteinte en 2030)		
	Haies dans les cultures	Haies dans les prairies	Total	Haies dans les cultures	Haies dans les prairies	Total
Coût unitaire (€/ha/an)	61,76	97,15	75,04	61,76	97,15	75,04
AMT (ha)	7 556 936	4 538 092	12 095 028	7 556 936	4 538 092	12 095 028
% AMT atteint en 2030	10%	10%	10%	20%	20%	20%
Coût annuel en 2030 (euros)	46 671 637	44 088 287	90 759 136	93 343 273	88 175 128	181 522 180
Coût d'atténuation (€/MgCO _{2e})	112,29	105,60	108,94	112,29	105,60	108,94
Atténuation cumulée sur 2010- 2030 (MgCO _{2e})	6 439 802	6 468 822	12 908 625	11 248 799	11 299 490	22 548 290
Coût cumulé sur 2010-2030 (millions euros)	723	683	1406	1263	1193	2456

5.2.e. Synthèse : récapitulatif de l'atténuation escomptée, du coût, et du coût de la tonne de CO_{2e} évitée²³

Pour la sous-action haies, le potentiel d'atténuation a été estimé à 0,55 et 0,92 Mg CO_{2e} ha⁻¹ pour 60 mètres linéaires introduits dans des parcelles cultivées et 100 mètres linéaires introduits dans les prairies respectivement. La tonne de CO_{2e} évitée est estimée à 108 euros, avec comme hypothèse une valorisation du bois sous forme de plaquette.

Sous hypothèse basse de diffusion de la sous action à 10% de l'AMT, l'atténuation annuelle en 2030 est 273 172 MgCO_{2e} et l'atténuation cumulée de 4 233 356 MgCO_{2e} pour un coût global cumulé de 1406,34 millions d'euros pour la période 2010-2030. Sous hypothèse haute de diffusion de la sous action sur 20%, l'atténuation annuelle en 2030 est de 2 871 207 MgCO_{2e} et l'atténuation cumulée de 38 864 013 Mg CO_{2e} pour un coût global cumulé 2456,53 millions d'euros pour la période 2010-2030. Ces estimations prennent en compte les émissions intervenant sur l'exploitation agricole et sur les espaces qui lui sont physiquement liés. Les émissions induites pour le scénario à 10% de l'AMT représentent 208 221 MgCO₂ en 2030 et l'atténuation cumulée due aux émissions induites atteint 3 226 814 MgCO₂ pour la période 2010-2030. Dans le cas du scénario à 20% de l'AMT en 2030, l'atténuation de 2030 est de 416 413 et l'atténuation cumulée de 5 636 475 MgCO_{2e} sur la période 2010-2030.

²³ Calculée en faisant le rapport entre le coût unitaire et l'atténuation unitaire, hors coût de transaction et en considérant uniquement l'atténuation intervenant sur l'exploitation agricole et sur les espaces physiquement liés, dans un premier temps.

6. Synthèse : potentiel d'atténuation et coût annuels et cumulés pour l'ensemble de l'action

Le potentiel d'atténuation de la sous action agroforesterie à faible densité est bien supérieur à celui de la sous-action haies (3,7-3,75 contre 0,55 et 0,92 MgCO₂e/ha/an) ce qui est logique compte tenu de la surface parcellaire concernée (1,2% ou 2% pour les haies contre 5% pour l'agroforesterie) et la valorisation durable sous forme de bois d'œuvre pris comme hypothèse pour l'agroforesterie. Par ailleurs, **compte tenu notamment des hypothèses sur la valorisation du bois produit, le coût unitaire de la tonne de CO₂e est inférieur dans le cas de la sous-action agroforesterie par rapport à la sous-action haies (12-14 euros contre 108 euros)**. Compte tenu des AMT différentes (5 865 308 pour l'agroforesterie et 12 095 028 ha pour les haies) pour chacune des sous-actions et des potentiels unitaires de stockage différents, les valeurs centrales des atténuations cumulées sur la période 2010-2030 mettent en avant la sous-action agroforesterie: près de 18 millions CO₂e pour l'agroforesterie et pour les haies pour un coût cumulé de 337,8 millions d'euros et 1406 millions d'euros pour les sous-actions agroforesterie et haies respectivement. Notons toutefois que la perspective d'atteindre 10% de l'AMT en 2030 apparaît beaucoup plus réaliste dans le cas des haies (déjà présentes sur plus de 500 000 ha agricoles en 2010) que dans le cas de l'agroforesterie à base de bois précieux à faible densité.

Au final, pour intégrer les deux sous-actions **dans la MAC Curve** en prenant en compte l'incertitude liée à l'estimation de leur efficacité respective, nous proposons **d'utiliser les valeurs centrales issues des estimations avec la valeur centrale des fourchettes et des hypothèses médianes de diffusion soient 7% et 15% pour l'agroforesterie et les haies respectivement.**

7. Discussion

7.a. Sensibilité des résultats

Les hypothèses faites pour quantifier l'atténuation potentielle sont fortes du fait d'un **manque de références mesurées en milieu tempéré sur des situations comparables en termes de densité d'arbres notamment**. Selon les hypothèses faites sur le stockage de carbone d'après l'analyse bibliographique, le potentiel d'atténuation unitaire varie d'un facteur 10 pour l'agroforesterie et d'un facteur 2 pour les haies. Par ailleurs, la non prise en compte de la nature des essences introduites sur l'estimation du potentiel d'atténuation²⁴ est critiquable mais cohérente avec la non prise en compte de la nature de ces essences dans les scénarios testés (le nombre d'arbres et non sa nature a été précisé dans la définition de la sous-action). Toutefois, dans une future étude, il pourra être intéressant de mettre davantage en relation les options de plantation (densité et nature des arbres) et la valeur d'atténuation choisie : ainsi la vitesse de croissance des arbres est un élément déterminant de la production de biomasse et donc du potentiel d'atténuation. La valeur que nous proposons ici est cohérente notamment pour le peuplier, espèce à croissance rapide mais pourrait être revue dans le cas d'une espèce à croissance plus lente comme le noyer. Au final, l'option retenue pour l'estimation de l'atténuation potentielle unitaire est donc un **compromis entre l'intégration d'un grand nombre de références hétérogènes et la volonté d'accéder à une valeur pour l'estimation du potentiel d'atténuation réaliste à l'échelle FRANCE**.

Les critères biophysiques et agricoles retenus pour l'estimation de l'assiette maximale technique quoique raisonnables sont discutables car les plantations d'arbres sont également possibles dans des situations a priori moins favorables. Un travail complémentaire de critères de faisabilité technique intégrant les types d'exploitation agricole (SAU, équipement, intégration dans les filières bois) serait pertinent pour compléter cette approche. Le niveau de diffusion des sous-actions envisagées en % de l'AMT est également difficile à justifier : nous avons donc opté pour deux valeurs (réaliste et optimiste) permettant d'encadrer l'estimation d'atténuation à l'horizon 2030.

En conséquence, sur le potentiel unitaire, sur l'évaluation de l'assiette ainsi que sur les hypothèses de diffusion à l'horizon 2030, l'incertitude est grande d'où la nécessité d'encadrer ces valeurs avec des hypothèses de scénario de scénario haute et basse.

Pour l'estimation des coûts, il a fallu fixer le niveau de perte de rendement engendré par la présence des arbres. Un niveau de LER a été fixé, sur la base des rares données disponibles sur le sujet. Pour plus de précision, on pourra se référer aux articles cités ou regretter que des études approfondies quantifiées et diachroniques, avec une vraie valeur initiale, n'existent

²⁴ A titre indicatif, les estimations annuelles de C séquestré par la biomasse des arbres *Eucalyptus globulus* Labill, *Pinus pinaster* Ait., *Pinus radiata* D. Don and *Castanea sativa* Mill., en Espagne étaient 5,14 ; 1,58 ; 1,11, et 0,52 MgC/ha, respectivement ((Sudmeyer et al. 2004).

pas. Le modèle HiSafe (rapporté dans (C Dupraz et al. 2005)) confirme ces ordres de grandeur mais ce modèle est encore en développement (projet ANR ECOSFIX²⁵ en cours). L'analyse des coûts devrait être mieux structurée en considérant les différents itinéraires techniques et non un itinéraire technique type et le schéma de production envisagé pour chacune des espèces avec des conséquences sur le niveau d'atténuation. Enfin, nous avons vu que les coûts unitaires des sous-actions agroforesterie et haies sont peu sensibles au prix du carburant agricole.

Une hypothèse forte de cette étude a porté sur la valorisation ultérieure du bois conduisant dans le cas de l'agroforesterie à considérer un stockage durable sous forme de bois d'œuvre et dans le cas des haies un stockage limité du fait de l'exploitation sous forme de bois énergie. L'hypothèse de production de bois d'œuvre en agroforesterie est discutable notamment dans le cas du peuplier, espèce à croissance rapide, les normes CITEPA considérant que « la totalité du carbone contenu dans la biomasse récoltée est considérée émise l'année de la coupe ». Cette approche est d'autant plus critiquable que tout le C produit n'est pas exporté des parcelles et que seule une portion des grumes commercialisées est transformée en produits plus ou moins durables. Dans l'idéal, il faudrait séparer le stockage dans les produits du stockage dans la végétation et le sol. Il est à noter que dans les démarches IPCC actuelles, le stockage dans les produits n'est actuellement pas pris en compte. Dans une future étude, il pourrait être intéressant de considérer le devenir des produits indépendamment des options techniques et d'envisager plusieurs scénarios correspondant à des proportions plus ou moins importantes de la biomasse produite : (i) substitution d'énergie fossile ; (ii) accumulation dans des produits à vie plus ou moins courte (cas du peuplier : caisse, coffrage, palettes) et (iii) accumulation dans des produits à durée de vie longue (noyer-merisier : meubles).

Ces différents points affaiblissent, du fait de l'abondance d'hypothèses notamment sur la valorisation ultérieure du bois, l'évaluation globale proposée mais l'explicitation des hypothèses permet d'encadrer l'incertitude.

7.b. Les conditions d'une prise en compte de l'action dans l'inventaire national

• Comptabilisation de l'effet

Dans l'inventaire national des émissions de 2010, en l'absence de changement d'usage des sols, les variations de stocks de C dans le sol (et la biomasse) liées aux pratiques (dont l'agroforesterie, les haies) ne sont pas comptabilisées. A notre connaissance, il n'y a pas de prise en compte explicite et spécifique, ni des haies, ni de l'agroforesterie dans l'inventaire national.

Les lignes directrices du GIEC 2006 mentionnent l'agroforesterie comme une pratique stockant du carbone dans le sol et la biomasse qui correspond à une conversion de terres cultivées ou prairies en terres boisées, mais elles ne fixent pas de méthode de calcul explicite pour estimer les effets de l'agroforesterie.

• Vérifiabilité de la mise en œuvre

La mise en œuvre de l'action serait facilement traçable *via* la contractualisation de la mesure 222 auprès des collectivités territoriales, et vérifiable, notamment par images satellitaires. Le réseau associatif (Association française d'agroforesterie - AFAF, Association française des arbres et des haies champêtres - AFAC), particulièrement actif, pourrait être un relais précieux pour accompagner et suivre le développement de l'action.

7.c. Les contextes et mesures susceptibles de favoriser le déploiement de l'action

Aujourd'hui l'agroforesterie est identifiée par le Ministère de l'agriculture comme une pratique culturale novatrice et agroécologique et comme une voie de diversification potentiellement rentable pour l'agriculteur. Dans ce contexte, les associations françaises (AFAF) et européenne (EURAF) d'agroforesterie et l'AFAC travaillent à la diffusion et au soutien de l'agroforesterie.

Dans le cadre du Programme de Développement Rural pour l'Hexagone (PDRH) 2007-2013, l'agroforesterie peut être subventionnée à travers quatre mesures de soutien : mesure 121-B "*Plan Végétal Environnement, installation de haies et d'éléments arborés*"; mesure 216 "*Investissement non-productif*"; MAET 214-I "*Entretien de haies localisées de manière pertinente*", et (depuis 2009) mesure 222 "*Première installation de systèmes agroforestiers sur des terres agricoles*". Cette mesure 222, cofinancée par le FEADER (Fonds européen agricole pour le développement rural) et les collectivités territoriales qui le souhaitent, ne peut couvrir que les coûts d'installation des arbres et l'entretien de la plantation les

²⁵ Projet international ECOSFIX – "Services écosystémiques des racines – redistribution hydrique, séquestration du carbone et fixation du sol" coordonné par l'UMR AMAP (Cirad, Inra, Cnrs, IRD, UM2) et financé par l'ANR (Programme Systerra) pour une durée de 3 ans

premières années. Le taux de subvention peut atteindre 70%, voire 80% dans les zones défavorisées. Le cahier des charges précis de la mesure est défini au niveau régional.

La multiplicité et les conditions de mise en œuvre des dispositifs actuels les rendent difficiles à mobiliser. Toutes les mesures sont zonées, selon les périmètres définis dans le cadre de Natura 2000, de la Directive cadre sur l'eau, des Directives Oiseaux et Habitats hors Natura 2000 : ce zonage ne permet pas de couvrir la totalité des territoires. Par ailleurs, ces diverses mesures sont assorties de seuils minimaux, en termes de surfaces d'aménagement et d'enveloppe financière, très restrictifs au regard des surfaces et linéaires visés dans chaque aménagement (spécifique à chaque objectif fléché). Enfin, l'éclatement des objectifs très ciblés de ces mesures, ainsi que de l'inscription de l'arbre champêtre comme réponse apportée à ces objectifs, rend difficile l'identification de la validité des aménagements arborés.

Aujourd'hui, dans le cadre des négociations de la PAC, est proposée l'idée d'une **mesure globale de soutien aux systèmes** agroforestiers, comprenant toutes les formes d'aménagements arborés champêtres, et applicable à tous les systèmes agricoles sans limite de densité d'arbres à l'hectare.

7.d. Interactions entre sous-actions et avec les autres actions

L'AMT de la sous-action agroforesterie est incluse par définition dans l'AMT de la sous-action haies (Figures 5-1 et 5-4) donc on ne peut sommer leurs effets sur une même surface. Toutefois compte tenu des faibles pourcentages de réalisation des AMT (4 ou 10% pour l'agroforesterie et 10 ou 20% pour les haies, suivant les scénarios), il est envisageable de réaliser les deux sous-actions sur des parcelles différentes. Introduire des haies et des arbres interparcellaires est techniquement faisable mais induirait une perte de SAU de 6,2% ou 7% selon qu'il s'agit de cultures ou de prairies respectivement.

Par ailleurs, l'introduction d'arbres dans des parcelles agricoles ou des prairies va modifier l'assiette de développement de plusieurs actions examinées dans ce rapport : fertilisation azotée, cultures intercalaires, légumineuses et non labour. Par contre, sur la surface encore cultivée, l'effet de l'introduction d'arbres à proximité peut se cumuler avec l'effet d'une autre pratique culturale séquestrante car on peut tout à fait envisager un changement dans les pratiques de fertilisation sur la culture entre les rangées d'arbres (par exemple le non labour dans les parcelles agroforestières).

7.e. Autres effets attendus de l'action, synergies/antagonismes avec l'adaptation au changement climatique et avec d'autres objectifs de politique publique

La présente étude étant centrée sur l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et le coût potentiel d'une action, les autres effets doivent néanmoins être pris en compte de manière qualitative.

Politiquement, l'agroforesterie est surtout mise en avant pour ses performances agri-environnementales. Elle serait en particulier un moyen de lutte efficace contre l'érosion des sols, la pollution des nappes et des rivières par les nitrates, l'uniformisation des paysages et l'érosion de la biodiversité (Gómez et al., 2009 ; Nair et al., 2010 ; Palma et al., 2007 ; Tartera et al., 2012). Les références sont nombreuses, en contexte tropical, notamment sur le recyclage de l'eau, la protection des sols notamment contre l'érosion et la biodiversité. Les haies quant à elles, constituent aussi bien des brise-vent que des habitats et refuges pour la faune sauvage et notamment pour les "auxiliaires des cultures" (Objectif Terres 2020 Pour un nouveau modèle agricole français, <http://agriculture.gouv.fr/objectif-terres-2020-pour-un,906>). L'hétérogénéité de la végétation (cultures, arbres, et enherbement) permet l'établissement d'une biodiversité plus riche sur la parcelle. Elle permet d'abriter à la fois des ravageurs et des auxiliaires des cultures (Jose, 2009). A ce titre, l'expertise collective de l'INRA sur la biodiversité mentionne l'agroforesterie moderne comme système agricole permettant l'accroissement de la diversité végétale mais reconnaît le manque d'informations précises sur le sujet (Le Roux et al., 2008). Cette recherche est encore moins "poussée" si l'on considère uniquement la microflore du sol et la pédofaune. Enfin, L'agroforesterie représente également un potentiel d'adaptation au changement climatique mis en avant par de nombreux auteurs (Nair et al., 2010 ; Oelbermann et al., 2006 ; Peichl et al., 2006) en protégeant notamment les cultures contre les événements climatiques extrêmes (et notamment les stress thermiques précoce de printemps) et constitue à ce titre un système de culture prometteur pour les décennies à venir.

8. Conclusions

Cette étude a permis de quantifier le potentiel d'atténuation d'une pratique culturale encore peu développée sur le territoire, l'agroforesterie, et d'en estimer le coût associé. Les stockages proposés sont prudents à l'échelle métrique, l'assiette technique a été évaluée de manière réaliste et les taux d'adoption compte tenu de la grande innovation que représente cette

action, sont raisonnables. L'ensemble de ces hypothèses permettent de conclure que le résultat global est plausible et autorise la comparaison avec d'autres actions étudiées dans le présent document. Nous montrons ici qu'il est possible en conservant la production agricole française d'introduire des arbres dans les parcelles agricoles.

Globalement, dans le cas de cette action, la disponibilité en données pour l'estimation du potentiel d'atténuation unitaire est un réel verrou (données fragmentaires versus méta-analyses) d'où la difficulté à établir le potentiel d'atténuation unitaire. Par ailleurs, cette action concerne des pratiques agricoles très innovantes ce qui rend difficile d'estimer une assiette technique réaliste, un taux d'adoption de 100% n'étant pas envisageable. Les critères d'acceptabilité d'une telle action devront à notre avis faire l'objet d'un développement supplémentaire. L'agroforesterie revêt une grande diversité de situations culturelles et nous avons opté pour deux options techniques réalistes : l'agroforesterie avec valorisation durable des bois et les haies avec une valorisation énergétique. Cependant, ce bois de menuiserie sera décomposé ou brûlé un jour ou l'autre. Il serait donc peut être plus prudent de considérer un temps moyen de résidence du bois (dépendant du type d'essence) dans la société civile qui déterminera *in fine* la quantité de C qui sera stockée par ce procédé.

En ce qui concerne la sous-action haies, il s'agit d'une pratique déjà largement pratiquée à l'échelle du territoire mais dont l'assiette est très importante. Pour autant, les références en termes de potentiel de stockage font état d'une grande variabilité temporelle et spatiale, ce qui nous a conduits à choisir un potentiel d'atténuation unitaire assez modeste. Le potentiel de développement apparaît donc important et le scénario de 10% de l'assiette maximale technique en 2030 réaliste. Reste la question du coût de mise en place et d'entretien des haies assez élevé qui peut justifier un frein à leur mise en place actuelle. Enfin, nous avons en effet considéré une valorisation bois d'œuvre pour l'agroforesterie et une valorisation déchiquetage et plaquette pour les haies, ce qui correspond à des hypothèses plausibles mais discutables. La régénération naturelle assistée qui diminue les coûts d'installation des haies serait à favoriser.

L'enjeu pour l'avenir de l'agroforesterie d'après (Liagre et al., 2012) et les haies reste donc une meilleure prise en compte par les instances et les politiques agricoles, la reconnaissance des agriculteurs s'y engageant et le soutien aux travaux de recherche et développement pour quantifier plus précisément la productivité et les services environnementaux (dont la séquestration de carbone) associés.

Références bibliographiques citées

- Ademe, 2011. *Guide des valeurs Dia'terre* ®. Paris: Ademe, 187 p.
http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=5E4A099BCA7D2167104D8253488F2F2E_tomcatlocal1323852246395.pdf
- Aertsens, J.; De Nocker, L.; Gobin, A., 2013. Valuing the carbon sequestration potential for European agriculture. *Land Use Policy*, 31: 584-594.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.09.003>
- Agreste, 2012. *Analyse et Résultats Centre - Les exploitations agricoles et l'environnement (partie 1)*, 1-4.
<http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/r2412a32.pdf>
- Arrouays, D.; Balesdent, J.; Germon, J.C.; Payet, P.A.; Soussana, J.F.; Stengel, P., 2002. *Contribution à la lutte contre l'effet de serre, Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Synthèse*. Paris: INRA, Expertise scientifique collective, 36 p.
http://www5.paris.inra.fr/depe/content/download/3185/32262/version/2/file/Carbone_synthese_francais.pdf
- Balesdent, J.; Chenu, C.; Balabane, M., 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53: 215-230.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00107-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00107-5)
- Bambrick, A.D.; Whalen, J.K.; Bradley, R.L.; Cogliastro, A.; Gordon, A.M.; Olivier, A.; Thevathasan, N.V., 2010. Spatial heterogeneity of soil organic carbon in tree-based intercropping systems in Quebec and Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 79: 343-353.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10457-010-9305-z>
- Baudry, J.; Burel, F.; Thenail, C.; Le Cœur, D., 2000. A holistic landscape ecological study of the interactions between farming activities and ecological patterns in Brittany, France. *Landscape and Urban Planning*, 50: 119-128.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00084-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00084-0)
- Borrell, T., 2004. *De l'importance des interactions arbres-cultures sur les performances économiques de l'agroforesterie tempérée*. ENSAM, Montpellier. 98 p.
- Cardinael, R., 2011. *Potential de développement de l'agroforesterie en Languedoc-Roussillon. Etude de cas sur les territoires concernés par des Plans Climat-Energie Territoriaux.*, 1-108.
- CITEPA, 2012. *Rapport national d'inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques*. Paris: CITEPA - Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 1 364 p.
http://www.citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/ccnucc_france_2012_sec.pdf
- Dupraz, C.; Burgess, P.; Gavaland, A.; Graves, A.; Herzog, F.; Incoll, L.D.; Jackson, N.; Keesman, K.; Lawson, G.; Lecomte, I.; Liagre, F.; Mantzanas, K.; Mayus, M.; Moreno, G.; Palma, J.; Papanastasis, V.; Paris, P.; Pilbeam, D.; Reisner, Y.; Van Noordwijk, M.; Vincent, G.; Werf Van der, W., 2005. *Silvoarable Agroforestry For Europe*. 254.
<http://www1.montpellier.inra.fr/safe/english/results/final-report/SAFE%20Final%20Synthesis%20Report.pdf>
- Dupraz, C.; Capillon, A., 2005. L'agroforesterie: une voie de diversification écologique de l'agriculture européenne ? . *Cahier d'étude DEMETER*: 101-113.
- Dupraz, C.; Liagre, F., 2008. *Agroforesterie, des arbres et des cultures*. Paris: Editions France Agricole., 413 p.
- Dupraz, C.; Newman, S., 1997. Temperate agroforestry : the European way. In: A. M. Gordon and S.M. Newman (editors), ed. *Temperate Agroforestry Systems*. Wallingford, UK: CAB International 181-236.
- Dupraz, C.; Talbot, G.; Querné, A., 2010. What explanations for the surprising productivity of temperate agroforestry systems as measured by their Land Equivalent Ratio? *Agro2010* 271-272.
- Eichhorn, M.P.; Paris, P.; Herzog, F.; Incoll, L.D.; Liagre, F.; Mantzanas, K.; Mayus, M.; Moreno, G.; Papanastasis, V.P.; Pilbeam, D.J.; Pisanelli, a.; Dupraz, C., 2006. *Silvoarable Systems in Europe – Past, Present and Future Prospects*. *Agroforestry Systems*, 67: 29-50.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10457-005-1111-7>
- Falloon, P.; Powlson, D.; Smith, P., 2004. Managing field margins for biodiversity and carbon sequestration: a Great Britain case study. *Soil Use and Management*, 20: 240-247.
<http://dx.doi.org/10.1079/sum2004236>
- Fernández-Núñez, E.; Rigueiro-Rodríguez, a.; Mosquera-Losada, M.R., 2010. Carbon allocation dynamics one decade after afforestation with *Pinus radiata* D. Don and *Betula alba* L. under two stand densities in NW Spain. *Ecological Engineering*, 36: 876-890.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.03.007>
- Follain, S.; Walter, C.; Legout, A.; Lemerrier, B.; Dutin, G., 2007. Induced effects of hedgerow networks on soil organic carbon storage within an agricultural landscape. *Geoderma*, 142: 80-95.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.08.002>
- Gavaland, A.; Burnel, L., 2005. Croissance et biomasse aérienne de noyers noirs. *Chambres d'agriculture*, n° 945: 20-21.
- Gavaland, A.; Record, S.; Réquillart, V., 2004. Le boisement des terres agricoles peut-il constituer une voie de diversification des revenus des agriculteurs ? *Economie Rurale*, 281: 24-38.
<http://dx.doi.org/10.3406/ecoru.2004.5482>
- Gómez, J.A.; Guzmán, M.G.; Giráldez, J.V.; Fereres, E., 2009. The influence of cover crops and tillage on water and sediment yield, and on nutrient, and organic matter losses in an olive orchard on a sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*, 106: 137-144.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2009.04.008>
- Gordon, A.M.; Newman, S.M., 1997. *Temperate Agroforestry Systems*. Wallingford: CAB International, 270 p.
- Graves, a.R.; Burgess, P.J.; Liagre, F.; Terreaux, J.-P.; Borrell, T.; Dupraz, C.; Palma, J.; Herzog, F., 2010. Farm-SAFE: the process of developing a plot- and farm-scale model of arable, forestry, and silvoarable economics. *Agroforestry Systems*, 81: 93-108.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10457-010-9363-2>
- Graves, A.R.; Burgess, P.J.; Palma, J.H.N.; Herzog, F.; Moreno, G.; Bertomeu, M.; Dupraz, C.; Liagre, F.; Keesman, K.; van der Werf, W.; de Nooy, A.K.; van den Briel, J.P., 2007. Development and application of bio-economic modelling to compare silvoarable, arable, and forestry systems in three European countries. *Ecological Engineering*, 29 (4): 434-449.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.018>

- Hamon, X.; Dupraz, A.C.; Liagre, M.F., 2009. *L'agroforesterie : outil de séquestration du carbone en agriculture*. Anduze: AGROOF, Bureau d'étude spécialisé dans la formation et le développement des pratiques agroforestières); INRA, 17 p.
<http://www.agroforesterie.fr/documents/Agroforesterie-Outil-de-Sequestration-du-Carbone-en-Agriculture.pdf>
- Howlett, D.S.; Mosquera-Iosada, M.R.; Nair, P.K.R.; Nair, V.D.; Rigueiro-rodriguez, A., 2011. Soil Carbon Storage in Silvopastoral Systems and a Treeless Pasture in Northwestern Spain. *Journal of Environmental Quality*, 40 (3): 825-832.
<http://dx.doi.org/10.2134/jeq2010.0145>
- IFN, 2010. *Rapport d'activité 2009 de l'Inventaire forestier national*. Nogent-sur-Vernisson : : Inventaire forestier national, 60 p.
http://www.ign.fr/publications-de-l-ign/Institut/Publications/RA/RA2009_IFN.pdf
- Jose, S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 76: 1-10.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Kumar, B.M.; Nair, P.K.R., 2011. *Sequestration potential of agroforestry systems: opportunities and challenges*. Dordrecht: Springer Science (*Advances in Agroforestry*, n°8), 326 p.
http://library.uniteddiversity.coop/Permaculture/Agroforestry/Carbon_Sequestration_Potential_of_Agroforestry_Systems-Opportunities_and_Challenges.pdf
- 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., 2008. *Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. Synthèse du rapport d'Expertise scientifique collective*. Paris: INRA, 116 p.
<http://www5.paris.inra.fr/depe/content/download/3172/32207/version/2/file/synthese-expertise-agricultureetbiodiversite-rev%5B1%5D.pdf>
- Liagre, F., 2006. *Les haies rurales : Rôle, création, entretien*. Paris: Editions France Agricole, 320 p.
- Liagre, F.; Santi, F.; Vert, J.; Centre d'études et de prospective, 2012. L'agroforesterie en France : intérêts et enjeux. *Analyse*, n°37: 4 p.
http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Analyse_37_CEP_Agroforesterie.pdf
- Mead, R.; Willey, R.W., 1980. The concept of a Land Equivalent Ratio and Advantages in yields from intercropping. *Experimental Agriculture*, 16 (3): 217-228.
<http://dx.doi.org/10.1017/s0014479700010978>
- Mosquera-Losada, M.R.; Moreno, G.; Pardini, A.; Mcadam, J.H.; Papanastasis, V.; Burgess, P.J.; Lamersdorf, N.; Castro, M.; Liagre, F., 2012. Past, Present and Future of Agroforestry Systems in Europe. 9.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-4676-3>
- Nair, R.P.K.; Nair, V.D.; Mohan Kumar, B.; Showalter, J.M., 2010. Chapter Five - Carbon Sequestration in Agroforestry Systems. In: Donald, L.S., ed. *Advances in Agronomy*. Academic Press, 237-307.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)
- Oelbermann, M.; Voroney, R.P.; Thevathasan, N.V.; Gordon, A.M.; Kass, D.C.L.; Schlönvoigt, A.M., 2006. Soil carbon dynamics and residue stabilization in a Costa Rican and southern Canadian alley cropping system. *Agroforestry Systems*, 68: 27-36.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10457-005-5963-7>
- Palma, J.H.N.; Graves, a.R.; Bunce, R.G.H.; Burgess, P.J.; de Filippi, R.; Keesman, K.J.; van Keulen, H.; Liagre, F.; Mayus, M.; Moreno, G.; Reisner, Y.; Herzog, F., 2007. Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119: 320-334.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2006.07.021>
- 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: 243-257.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10457-005-0361-8>
- Pointereau, P.; Coulon, F., 2006. La haie en France et en Europe: évolution ou régression, au travers des politiques agricoles *Premières rencontres nationales de la haie champêtre*. Auch, 5-7 octobre 2006, 1-9.
- Rasse, D.P.; Rumpel, C.; Dignac, M.F., 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 269 (1-2): 341-356.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11104-004-0907-y>
<http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11104-004-0907-y>
- Sharrow, S.H.; Ismail, S., 2004. Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in western Oregon, USA. *Agroforestry Systems*, 60: 123-130.
<http://dx.doi.org/10.1023/B:AGFO.0000013267.87896.41>
- Talbot, G., 2011. *L'intégration spatiale et temporelle du partage des ressources dans un système agroforestier noyers-céréales : une clef pour en comprendre*. Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.297 p.
http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/66/45/30/PDF/These_talbot.pdf
- Tartera, C.; Rivest, D.; Olivier, A.; Liagre, F., 2012. Agroforesterie en développement : parcours comparés du Québec et de la France. *The Forestry Chronicle*, 88 (1): 21-29.
http://agrooof.net/agrooof_ressources/documents/Tartera_et_al_2012.pdf
- van Oost, K.; Quine, T.A.; Govers, G.; De Gryze, S.; Six, J.; Harden, J.W.; Ritchie, J.C.; McCarty, G.W.; Heckrath, G.; Kosmas, C.; Giraldez, J.V.; da Silva, J.R.M.; Merckx, R., 2007. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle. *Science*, 318 (5850): 626-629.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1145724>
- Vandermeer, J., 1989. *The ecology of intercropping*. Cambridge Cambridge University Press, 237 p.
- Walter, C.; Merot, P.; Layer, B.; Dutin, G., 2003. The effect of hedgerows on soil organic carbon storage in hillslopes. *Soil Use and Management*, 19 (3): 201-207.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2003.tb00305.x>

Références techniques pour la sous-action Haies :

Guide technique « Les haies bocagères » CA du Calvados. Téléchargé le 04/10/2012

<http://www.calvados.fr/files/content/mounts/Internet/publications/environnement/guide-des-haies-26042010.pdf?uuiid=alfresco%3AInternet%3Aworkspace%3A%2F%2FSpacesStore%2F44cac55a-75d6-4df3-a5f3-91abb715a82f>

fichier guide-des-haies-26042010.pdf

Fiche 14 « Haie Freiner les ruissellements Provoquer l'infiltration et la sédimentation » Ca de Seine-Maritime (téléchargé le 04/10/2012)

http://www.seine-maritime.chambagri.fr/iso_album/14_fiche-haie_a3.pdf

fichier 14_fiche-haie_a3.pdf

« Bois Energie », CA de l'Orne (téléchargée le 04/10/2012)

fichier « bois_energie_rentabilité_haies.pdf »

http://www.orne-agri.com/iso_album/bois_energie.pdf

Programme départemental 2012-2013 de plantation de haies bocagères, talus plantés, agroforesterie (CA Loire-Atlantique AFHAC) (téléchargé le 04/10/2012)

http://www.loire-atlantique.chambagri.fr/fileadmin/documents_ca44/environnement/haies_agroforesterie/PROGRAMME_PLANTATION_2012_2013.pdf

fichier PROGRAMME_PLANTATION_2012_2013.pdf

CAHIER DES CHARGES POUR LA PLANTATION ET L'ENTRETIEN DES HAIES DE BORD DE ROUTE (téléchargé le 04/10/2012)

http://www.rhone.gouv.fr/automne_modules_files/standard/public/p176_f8a5e00206e5c02b7e79cfe349fb6d03haies_bord_de_route.pdf

fichier : Annexe 9a - cc_haies_bord_de_route CG Rhône).pdf

Thèse de Ali Lotfi « "Durabilité écologique des paysages agricoles et production de bois, bocage et néobocage" soutenue le 18/11/2008, université de Rennes 1

« Les haies rurales ; Rôle, Création, Entretien », Fabien LIAGRE, Edition France Agricole, ISBN 2-85557-137-5, 1^{ère} édition 2006

Annexes

Annexe 5-1. Détail des hypothèses de consommation de fioul pour l'itinéraire technique agroforestier (avec 5% de la SAU occupée par des arbres).

Source : barème d'entraide CUMA 2010

Opération culturale	Hypothèse sur le matériel utilisé	Consommation fioul L/ha
Enfouissement végétation	Tracteur 4RM 110cv (500h/an) Cultivateur lourd 4,5m	0,236
Sous-solage	Tracteur 130ch 4RM (500h/an) Sous soleuse 2 corps portée (30ha/an) 2,33m	1,250
Emiettage	Herse rotative + packer 3m (80ha/an) Tracteur 4RM 110cv (500h/an)	0,354
Paillage	Dériveur Tracteur 2RM60cv (500h/an)	0,400
Plantation	Dériveur Tracteur 2RM60cv (500h/an)	0,400
Coupe herbe pendant 19 ans	Broyeur 1m Tracteur 2RM60cv (500h/an)	7,600
Entretien haie pendant 19 ans	Epareuse avec bras+lamière (225h/an) Tracteur 130ch 4RM (500h/an)	95,000
Récolte		0,743
Total L/ha/an		5,299
Total consommation pour 20 ans en L/ha		105,983

Annexe 5-2. Détail du calcul de l'AMT pour la sous-action agroforesterie

Source	SAA 2010	EXTRACTION		Assiette Maximale Technique Sous-action Agroforesterie (ha)
		INFOSOL	RGP	
Végétaux	Superficie (ha)	Taux pour extraction sols > 1m et RU >120 mm	Taux pour extraction parcelle >4 ha	
Blé tendre	4 922 954	38%	79%	1 476 790
Blé dur	502 879	38%	64%	122 587
Maïs grain	1 598 400	38%	67%	409 716
Orge et escourgeon	1 572 775	38%	74%	444 705
Autres céréales	636 101	38%	64%	155 063
Pommes de terre	154 638	38%	85%	49 875
Betteraves industrielles	382 775	38%	85%	123 456
Féveroles et fèves	151 340	38%	56%	32 425
Pois protéagineux	239 495	38%	56%	51 312
Colza et navette	1 463 804	38%	84%	470 980
Tournesol	695 051	38%	73%	192 007
Autres oléagineux	27 013	38%	1%	53
Maïs fourrage et ensilage	1 403 160	38%	67%	359 670
Prairies naturelles ou semées depuis plus de 6 ans	6 661 803	31%	67%	1 367 344
Prairies temporaires	3 143 134	0,31	0,63	609 325
Cultures				3 888 639
Prairies				1 976 669
Total				5 865 308

Annexe 5-3. Les coûts dans le projet SAFE (A. R. Graves *et al.* 2007)

		Cherry	Walnut	Poplar
Minimum tree density	ha-1	50	50	50
Establishment				
Plant	(€ tree-1)	1	6	4
Tree protection	(€ tree-1)	1,5	1,5	0,5
Ground preparation	(hr ha-1)	4	4	12
Full weeding	(hr ha-1)	0,5	0,5	0,5
Marking out	(hr ha-1)	7	7	7
Planting trees	(min tree-1)	2	2	2
Tree protection	(min tree-1)	2	2	2
Localised weeding	(min tree-1)	0,5	0,5	0,5
Maintenance				
Weeding				
Year of first weeding	(year)	1	1	1
Year of last weeding	(year)	3	3	3
Annual weeding	(min tree-1)	0,5	0,5	0,5
Annual herbicide	(€ tree-1)	0,14	0,14	0,14
Establishment materials	(€ ha-1)			
Maintenance materials	(€ ha-1 a-1)	30	30	30
Pruning				
First prune				
Height	(m)	1	1	1,5
Time	(min tree-1)	1	1	1
Last prune				
Height	(m)	6	4,5	8
Time required	(min tree-1)	6,4	7	10
Removal of prunings	(min tree-1)	4	4	4

Annexe 5-4. Détail des calculs de coûts pour la sous-action Agroforesterie

Les coûts pris en compte concernent les pertes de marges brutes agricoles, les coûts d'exploitation des arbres et les ventes de bois.

Le modèle simplifié de l'agroforesterie.

Les estimations présentées sont faites sous l'hypothèse d'un LER égal à 1,3. Pour un LER de 1,3, (Borrell 2004) donne pour les plantations à faible densité, les indices de rendements relatifs pour les cultures et les arbres, suivants.

Tableau 5-5-1 : Indice de rendement relatif pour les cultures et les arbres pour un LER de 1,3 ((Borrell 2004)

	Peuplier	Merisier	noyer
Yc	0,90	0,88	0,80
Ya	0,40	0,43	0,50
LER	1,30	1,30	1,30

Le modèle HiSafe a été utilisé pour simuler l'évolution temporelle des rendements respectifs des cultures intercalaires et des arbres. Ils conduisent à estimer un relatif maintien de la production agricole en début de période.

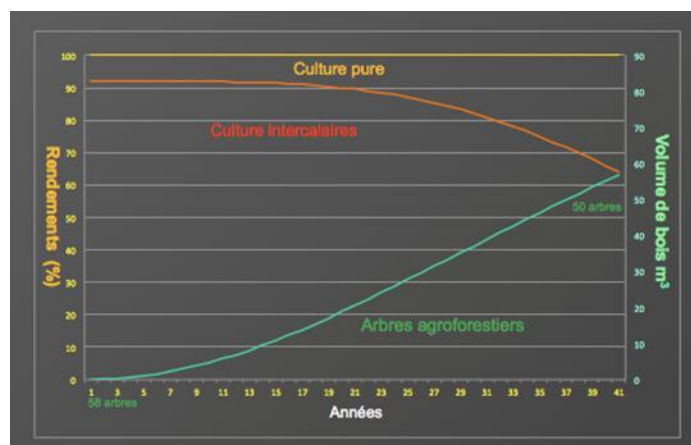


Figure 5-5-1: Rendements respectifs des cultures et des arbres sur 45 années (cas de 50 corniers par ha). Source : Agroof.

La modélisation utilisée a été simplifiée en adoptant une réduction linéaire de la production agricole. Les coefficients de cette droite ont été générés à partir des surfaces agricoles de début de période (soit 95%) et le LER global (cf. tableau 5-11) duquel on peut déduire, en fait, l'intégrale de la fonction. Le graphique donne, par exemple, ce que donne notre application pour le peuplier, avec une densité de 52 arbres par hectare et un LER de 1,3.

Ce modèle donne une approximation déformée de l'évolution de la production agricole, par rapport aux modèles biologiques. Il surestime la chute de la production en début de période (et donc sous-estime la rentabilité de l'agroforesterie), la baisse de la production agricole, en fin de période, étant sous-évaluée ⁽²⁶⁾. L'intérêt de la procédure est sa simplicité, son application facile aux différentes espèces (dès que l'on connaît le LER et les rendements respectifs globaux) et la possibilité de mesurer les effets du LER.

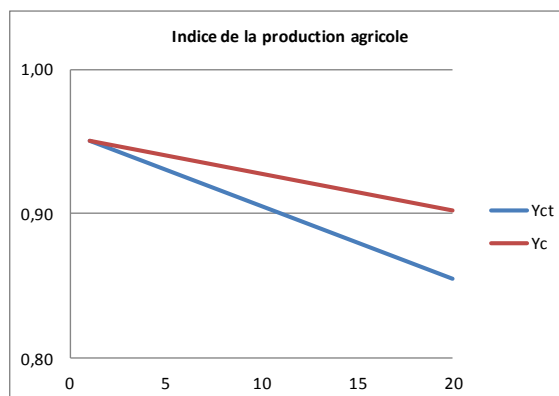


Figure 5-5-2: Forme retenue dans l'étude pour la décroissance de la production agricole dans le temps (cas des peupliers, 52 arbres par hectare, LER=1,3, coupe à 20 ans).

²⁶ Il est possible, en fait, de construire une courbe en deux paliers en maintenant fixe la production agricole pendant un certain nombre d'années.

Annexes

Les pertes de marge brutes agricoles.

Pour le calcul de la marge brute sur les cultures, on a retenu pour les cultures, à partir du RICA, un assolement type céréales – oléagineux – pois. Ceci conduit, par hectare, à un produit de 1175 euros, à des charges (semences, engrais, pesticides et carburants) de 426 euros et donc à une marge brute de 749 euros.

Pour les prairies, le calcul est plus délicat dans la mesure où le RICA ne valorise pas les prairies. On s'est référé aux données des chambres de l'agriculture sur les ventes d'herbe sur pied dont les résultats sont très variables. On a retenu un produit par hectare de 500 euros, soit une marge de 460 euros par hectare.

Les niveaux de produit par hectare ont été générés, pour un LER de 1,3, à partir des fonctions établies au point 7.1.2. Dans un premier temps, on a considéré que les charges restaient proportionnelles au produit. Cette hypothèse est plausible pour les baisses de production induite par la réduction des surfaces. Elle est plus contestable pour celles issues de l'ombre dans la mesure où elle suppose que les agriculteurs puissent adapter leur niveau de charges à la baisse des rendements. Il y a, en outre, des surcoûts que (C Dupraz and F. Liagre 2008) chiffre entre 5 et 15% des charges par hectare en grandes cultures. On a retenu, pour ces cultures, un surcoût modéré de 3%. L'économie de travail n'est pas par contre prise en compte dans l'estimation.

Gains et coûts des arbres.

Pour la production de bois, l'utilisation du LER implique une référence à des productions pures, par espèce. Or, celles-ci sont rares pour les essences concernées, notamment pour le noyer et le merisier. On s'est référé au travail de (Borrell 2004), effectué dans le cadre du projet SAFE, qui donne des références, sur le boisement des terres agricoles, pour les espèces concernées (cf. tableau).

Tableau : Référence sur la production de bois en BTA pour le noyer, le merisier et le peuplier (Borrell 2004.)

	m ³ /arbre	Densité		Récolte m ³	Année de Coupe (années après plantation)
		Initiale	Finale		
Noyer	0,9	200	100	90	50
Merisier	1	800	100	100	50
Peuplier	1,45	200	200	290	20

Le prix des bois sont donnés annuellement par la CNIEFEB. On a repris de cette source le prix du peuplier en 2010 (33,6 euros le m³). Pour les arbres fruitiers, les transactions sont faibles et les prix peuvent varier, selon la qualité du bois, entre 200 à 2000 €/m³. Après consultation de la documentation d'Agroof, on a pris 300 euros le m³ pour le merisier et 500 euros pour le noyer.

Les coûts les plus importants concernent les plantations : en cultures, ils varient entre 450 et 600 euros selon les espèces. En présence d'animaux, ces coûts peuvent être multipliés par trois (C Dupraz and F. Liagre 2008). Mais, les prairies peuvent être pâturées ou fauchées. On a retenu un coefficient multiplicateur de deux.

Les autres postes de coût concernent l'entretien du matériel, le désherbage les premières années en culture et la taille des arbres. Ces coûts ont été générés en actualisant les données du projet SAFE (cf. annexe 5- 6), en prenant notamment pour le travail (qui constitue l'essentiel des coûts) 17 euros de l'heure. Le bois étant vendu sur pied, il n'y a pas de coût d'abattage. Ces estimations sont bien entendu fragiles.

Annexe 5-5 : Sensibilité des résultats sur l'annuité par hectare de l'agroforesterie en cultures selon le LER, le taux d'actualisation, le niveau des prix agricoles et le niveau des prix du bois

Le scénario central correspond à un LER de 1,3, un taux d'actualisation de 4% et le niveau des prix agricoles et du bois de 2010. Le tableau donne les résultats de scénarios de variantes sur l'annuité par hectare en cultures. Dans chaque variante, on raisonne « toutes choses étant égal par ailleurs », les autres variables ayant leur niveau de l'estimation centrale.

Tableau 5-7-1: Sensibilité des résultats de l'agroforesterie en cultures sur l'annuité par hectare par rapport au scénario central (LER 1,3, taux d'actualisation de 4%, niveau des prix agricoles et du bois de 2010)

LER				Taux d'actualisation			
	Peuplier	Merisier	Noyer		Peuplier	Merisier	Noyer
1	198	180	183	0%	-29	-100	-236
1,2	91	96	94	2%	10	2	-60
1,3	45	69	54	4%	45	69	54
1,4	-2	42	15	6%	75	109	123

Indice des prix agricoles				Indice du prix du bois			
	Peuplier	Merisier	Noyer		Peuplier	Merisier	Noyer
70	13	33	1	70	84	94	104
100	45	69	54	100	45	69	54
130	77	104	107	130	5	44	10
				150	-21	27	-19

L'annuité par hectare atteint presque 200 euros par hectares si les rendements des cultures et des arbres évoluaient comme en boisement des terres agricoles (en faible densité !). Elle devient négative pour le peuplier dans le cas d'un LER égal à 1,4. Pour ce LER, l'annuité par hectare est d'un niveau très faible pour le noyer, ce qui signifie que l'annuité par tonne de CO₂ évitée tend vers zéro.

Pour un niveau de prix des cultures inférieures à 30% à celui de 2010, l'annuité par hectare devient très faible, notamment pour le noyer et le peuplier. Comme on l'a déjà dit, ceci explique la différence de résultats avec le projet SAFE dont les calculs étaient établis à une période où les prix agricoles étaient plus bas qu'en 2010. Si les prix agricoles continuent à monter, l'agroforesterie devient évidemment moins attractive.

La variation du prix du bois a évidemment des effets inverses à celle des prix agricoles. Or, comme on l'a noté, il y a une très grande incertitude sur le prix du bois, celui-ci étant très variable selon la qualité. On a plutôt pris des hypothèses basses. Pour des prix supérieurs à 30%, l'annuité par hectare (et donc plus encore l'annuité par tonne de CO₂ évitée) passe à des niveaux très faibles. Pour des prix supérieurs de 50%, elle devient négative pour le peuplier et le noyer. Ceci est conforme aux résultats communiqués par Agrooof, dans la presse (cf. la France Agricole n° 3329 d'avril 2009) qui veulent montrer la rentabilité de l'agroforesterie : le prix du bois est alors de 700 euros le m³, soit 50% au-dessus de notre hypothèse centrale (avec un LER, sans doute, de 1,4).

Si on n'actualise pas les recettes et les coûts associés à l'agroforesterie, l'annuité par hectare est négative pour les trois essences, de façon très forte pour le noyer. Ce résultat reflète la supériorité, pour l'agroforesterie, du point de vue la production biologique, par rapport à l'agriculture ou à la foresterie prise de manière isolée.

A un taux d'actualisation de 2%, les coûts d'atténuation du carbone restent négatifs pour le noyer. Ce résultat est intéressant dans la mesure où certains économistes spécialistes du sujet préconise de prendre un taux d'actualisation proche de ce taux, pour les projets de long terme (Gollier 2011).

A un taux de 6%, les annuités doublent quasiment par rapport à notre hypothèse centrale. Ce résultat est aussi intéressant d'un autre point de vue. Sur le plan individuel, un taux élevé d'actualisation peut cristalliser les difficultés de prendre la décision d'investir dans le long terme sur un projet dont les résultats restent incertains.

Annexe 5-6 Détail des hypothèses de consommation de fioul pour l'itinéraire technique associé aux haies

Consommation fioul (L/ha). Source : barème d'entraide CUMA 2010

	Hypothèse sur le matériel	Haies (ha ⁻¹)	
		dans les cultures, soit 60 mètres linéaires	dans les prairies, soit 100 mètres linéaires
SAU occupée par les arbres en %		1,2	2
enfouissement végétation	Tracteur 4RM 110cv (500h/an) Cultivateur lourd 4,5m	0,057	0,094
sous solage	Tracteur 130ch 4RM (500h/an) Sous soleuse 2 corps portée (30ha/an) 2,33m	0,300	0,500
émiettage	Herse rotative + packer 3m (80ha/an) Tracteur 4RM 110cv (500h/an)	0,085	0,142
paillage	Dérouleuse Tracteur 2RM60cv (500h/an)	0,096	0,160
plantation	Dérouleuse Tracteur 2RM60cv (500h/an)	0,096	0,160
coupe herbe pendant 18 ans	Broyeur 1m Tracteur 2RM60cv (500h/an)	0.864	1.44
entretien haie	Epareuse avec bras+lamier (225h/an) Tracteur 130ch 4RM (500h/an)	1.2	2
Récolte		0,178	0,297
Total L/ha/an		0.1438	0.2396
Total consommation pour 20 ans en L/ha		2.876	4.793

Annexe 5-7 Détail du calcul de l'AMT pour la sous-action haies

Source	SAA 2010 Superficie (ha)	EXTRACTION		Assiette Maximale Technique sous-action Haies (ha)
		INFOSOLS Taux pour extraction sols >0,5 m	RGP Taux pour extraction parcelle >4 ha	
Végétaux				
Blé tendre	4 922 954	74%	79%	2 869 901
Blé dur	502 879	74%	64%	238 228
Maïs grain	1 598 400	74%	67%	796 216
Orge et escourgeon	1 572 775	74%	74%	864 213
Autres céréales	636 101	74%	64%	301 339
Pommes de terre	154 638	74%	85%	96 924
Betteraves industrielles	382 775	74%	85%	239 916
Féveroles et fèves	151 340	74%	56%	63 012
Pois protéagineux	239 495	74%	56%	99 716
Colza et navette	1 463 804	74%	84%	915 272
Tournesol	695 051	74%	73%	373 134
Autres oléagineux	27 013	74%	1%	103
Maïs fourrage et ensilage	1 403 160	74%	67%	698 961
Prairies naturelles ou semées depuis plus de 6 ans	6 661 803	71%	67%	3 139 187
Prairies temporaires	3 143 134	0,71	0,63	1 398 905
Cultures				7 556 936
Prairies				4 538 092
Total				12 095 028

Annexe 5-8. Détail des prix ayant servi à calculer le coût unitaire de la sous-action haies

Plants	€/plant	0.9
Paillage	€/mL	1.6
Protections lapins	€/plant	0.2
Protections cervidés	€/plant	1
Enfouissement végétation	€/mL	0.011
Sous-solage	€/mL	0.023
Emiettage	€/mL	0.015
Pose du paillage	€/mL	0.005
Desherbage	€/mL	0.006
Entretien haie	€/mL	0.132
Récolte	€/tonne verte	65
	€/mL	3.25
Prix plaquette (20% humidité)	€/tonne	125
	€/mL/coupe	4.3
Marge moyenne des cultures	€/ha	749
Marge moyenne des prairies	€/ha	460