



HAL
open science

Développer l'agroforesterie et les haies pour favoriser le stockage de carbone dans le sol et la biomasse végétale

Aurelie Metay

► To cite this version:

Aurelie Metay. Développer l'agroforesterie et les haies pour favoriser le stockage de carbone dans le sol et la biomasse végétale. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport de l'étude réalisée par l'INRA pour le compte de l'ADEME, le MAAF et le MEDE., Inra, 2013. <hal-01600866>

HAL Id: hal-01600866

<https://hal.science/hal-01600866v1>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



5

Développer l'agroforesterie et les haies pour favoriser le stockage de carbone dans le sol et la biomasse végétale

A. Développer l'agroforesterie à faible densité d'arbres

B. Développer les haies en périphérie des parcelles agricoles

I- Enjeu et principe de l'action

Le bilan de GES de l'agriculture peut être amélioré par une augmentation du stockage dans la biomasse ou le sol de carbone sous forme organique, c'est-à-dire provenant de CO₂ capté par des végétaux. Ce stockage peut être accru par le développement de la biomasse ligneuse et par des restitutions au sol plus importantes de matières organiques.

L'action vise l'implantation d'arbres au sein des parcelles agricoles en grandes cultures assolées ou en herbe (agroforesterie), ou à leur périphérie (haies). Les cas retenus sont une plantation d'arbres à faible densité (30-50 arbres par ha) et l'installation de 60 ou 100 mètres linéaires de haies par ha, situations compatibles avec le maintien d'une production agricole mécanisée.

II- Mécanismes et modalités techniques de l'action

• Modalités et intérêts de l'introduction d'arbres

"Agroforesterie" est un terme générique qui désigne un mode d'exploitation des terres agricoles associant des arbres et des cultures ou des pâturages. Autrefois courantes en Europe, ces pratiques ont été abandonnées progressivement au cours du XX^e siècle, essentiellement pour des raisons liées à l'intensification et à la mécanisation de l'agriculture. Récemment est apparue une agroforesterie "moderne", associant des alignements d'arbres et une culture intercalaire mécanisée.

Dans l'étude, la sous-action "agroforesterie" correspond à l'introduction d'arbres au sein de parcelles cultivées ou de prairies et la sous-action "haies" correspond à l'introduction d'arbres en périphérie des parcelles. La définition retenue pour les haies est celle de l'Inventaire forestier national¹⁰.

Indépendamment de ses bénéfices environnementaux (stockage de carbone et autres), l'intérêt de l'agroforesterie réside dans l'hypothèse que sa production totale de biomasse (arbres + production agricole) par hectare sera supérieure à celles obtenues sur des surfaces séparées.

L'**agroforesterie** présente une grande diversité de systèmes, qui diffèrent par les essences plantées, leur densité et leur disposition dans la parcelle. Les résultats disponibles concernant le fonctionnement et la productivité de ces systèmes sont ponctuels et le plus souvent limités aux premières années suivant la plantation des arbres. Ces références sont souvent centrées sur l'évaluation des effets biophysiques et techniques de l'agroforesterie. Pour une approche intégrée technico-économique, les références disponibles, peu nombreuses, proviennent principalement du projet de recherche européen *Silvoarable Agroforestry For Europe* (SAFE), qui a étudié des systèmes agroforestiers utilisant 5 espèces (chêne vert, pin parasol, peuplier, merisier et noyer).

Quant aux **haies**, leur définition recouvre une très grande diversité de pratiques, avec des haies plantées ou spontanées, à végétation basse, arbustive ou arborée, élaguées ou non, implantées à plat ou sur des talus.

¹⁰ 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 m, sur une largeur d'assise inférieure à 20 m (80% de la biomasse étant concentrée sur moins de 2 m de largeur) et d'une hauteur potentielle supérieure à 2 m.

• Effets sur le stockage de carbone

Le stockage additionnel de carbone dans les parcelles cultivées ou prairies agroforestières ou entourées d'arbres peut provenir principalement :

- du stockage dans la biomasse végétale pérenne (aérienne et souterraine),
- de la restitution de matière organique au sol *via* la litière (feuilles mortes), le renouvellement des racines fines et les exsudats racinaires.

Le stockage dans la biomasse ligneuse dépend du devenir du bois produit : il sera de plusieurs dizaines voire centaines d'années pour le bois d'œuvre, mais considéré comme nul pour les produits utilisés comme bois de chauffage, brûlé dans l'année. Ce dernier usage, se substituant à des combustibles fossiles, contribue à réduire les émissions de CO₂. Les branches coupées peuvent également être broyées et apportées au sol dont elles alimentent le stock de carbone.

• Les sous-actions étudiées

Agroforesterie. L'analyse de la bibliographie sur le stockage additionnel de carbone dans les arbres et dans le sol met en évidence une forte variabilité des stockages mesurés suivant le contexte pédoclimatique, le type de système agroforestier (notamment la densité d'arbres) ou la méthode utilisée (profondeur de sol prise en compte...). Très peu de mesures ont été effectuées en climat tempéré.

L'analyse de la littérature a conduit à retenir la valeur de **3,7 tCO₂e/ha/an** pour le stockage de carbone dans la biomasse et dans le sol, sur une durée de 20 ans, avec comme fourchette une valeur basse autour de 0,4 tCO₂e/ha/an et une valeur haute de 4,97 tCO₂e/ha/an. On note donc une très forte incertitude associée au stockage agroforestier.

A noter que le rythme de stockage de carbone n'est pas constant, la valeur retenue doit donc être considérée comme une valeur moyenne, "linéarisée" sur 20 ans.

Haies. Peu de travaux ont quantifié le stockage additionnel de C dans le sol en relation avec l'implantation de haies en milieu tempéré. Les valeurs retenues sont de **0,55 tCO₂e/ha/an** (valeur basse : 0,17 et valeur haute : 0,94) et **0,92** (valeur basse : 0,28 et valeur haute : 1,56), suivant que la haie est introduite dans une parcelle cultivée ou une prairie, sur 60 ou 100 mètres linéaires respectivement. Ces valeurs sont plus basses que celles mesurées dans certaines études, mais cohérentes avec une valorisation des produits des haies comme bois de chauffage, qui conduit à

considérer que seul le carbone des racines et du sol est durablement stocké.

• Autres effets de l'action sur les GES

La réduction de l'érosion liée à la présence d'arbres a été considérée sans effet sur le bilan GES dans la mesure où les matières organiques déplacées par érosion peuvent se redéposer

III- Calculs du potentiel d'atténuation et du coût de l'action

• Systèmes retenus et modalités de calcul

Les systèmes pris comme référence sont :

- pour l'**agroforesterie** : une plantation de faible densité (de l'ordre de 30 à 50 arbres /ha), restant en place durant au moins 20 ans ; pour les évaluations économiques, 3 essences sont envisagées (peuplier, merisier et noyer) ;
- pour les **haies** : l'implantation de 100 mètres linéaires (ml) de haie par ha de prairies et sur 60 ml par ha de cultures.

En agroforesterie, l'indice le plus utilisé pour évaluer la productivité globale des cultures associées est le *Land Equivalent Ratio* (LER). Il s'interprète comme la surface qu'il faudrait cultiver avec 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 agroforestière¹¹. Peu d'évaluations de ce LER ont été réalisées en conditions tempérées. Dans l'étude, les estimations sont faites sous l'hypothèse d'un LER égal à 1,3.

Concernant le devenir du bois, l'hypothèse retenue est un stockage durable du bois (bois d'œuvre) pour l'agroforesterie, et un stockage nul pour la biomasse aérienne des haies, utilisée pour le chauffage (vente pour la fabrication de plaquettes) - mais cette production de bois énergie représente une économie de fioul.

L'introduction des arbres engendre une réduction de la surface affectée à la culture ou à l'herbe, estimée à 5% pour la sous-action agroforesterie et 1,2 à 2% pour la sous-action haies. Pour l'agroforesterie, les pertes de productions (dues notamment à l'ombre) sont estimées à partir du LER. On suppose que les charges restent proportionnelles au produit, avec toutefois un léger surcoût. Les marges brutes initiales sont issues du RICA 2010, et les données sur la conduite des cultures et prairies (consommation d'engrais par ex.) proviennent de l'enquête "Pratiques culturales" 2006. Tous les calculs sont effectués en différenciant les grandes cultures et les prairies (temporaires ou permanentes), dont les surfaces sont fournies par la SAA 2010.

La diversité des situations régionales, qui influent sur les niveaux de production des cultures et prairies et sur la croissance et la productivité des arbres, n'a pu être prise en compte ; les données utilisées sont des moyennes nationales. Les éventuels effets de la présence des arbres sur la conduite des cultures et des prairies n'ont pas non plus été considérés.

Pour les prairies, les résultats du projet SAFE sont à prendre avec prudence, peu d'études économiques ayant abordé le sylvo-pastoralisme.

• Effets de l'action sur les GES et estimation de son potentiel d'atténuation unitaire

Dans l'inventaire national 2010, les haies brise-vent, rideaux et couloirs d'arbres sont inclus dans la forêt s'ils ont une superficie

¹¹ Une association est donc "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.

et s'accumuler en aval de la parcelle.

L'introduction des arbres réduit la surface cultivée, et donc la consommation d'intrants (engrais, pesticides, gazole) et la production agricole par hectare. Elle est susceptible de modifier la conduite de la culture : réduction de la fertilisation (permise par l'apport de matière organique) ou de l'irrigation (à l'ombre des arbres).

supérieure à 0,5 ha et une largeur de plus de 20 m ; les parcelles agroforestières sont comptabilisées dans la catégorie "cultures". Ni les haies, ni l'agroforesterie ne peuvent donc être prises en compte. L'inventaire ne comptabilise pas le stockage de C dans le sol, et considère nul le stockage dans la biomasse ligneuse en faisant l'hypothèse que l'accroissement compense la récolte à la suite de laquelle tout le bois est brûlé dans l'année qui suit sa récolte.

Dans cette étude, le potentiel d'atténuation lié à l'introduction à l'agroforesterie et aux haies sera donc principalement estimé à partir d'une compilation effet par effet des valeurs disponibles dans la littérature.

Effet visé :

• **Le stockage additionnel de carbone** dans le sol et la biomasse des arbres. Les valeurs de stockage additionnel utilisées sont celles retenues précédemment : +3,7 (0,4-4,97) tCO₂e/ha/an pour l'agroforesterie, et 0,55 (0,17-0,94) et 0,92 (0,28-1,56) tCO₂e/ha/an pour les haies.

Autres effets comptabilisés :

• **La réduction des émissions de N₂O** liées à la fertilisation azotée minérale, par la suppression des engrais *au prorata* des surfaces cultivées réduites. Ces émissions, directes et indirectes, sont estimées d'après les fertilisations moyennes en France et les facteurs d'émission fournis par les lignes directrices du GIEC 2006.

• **Les modifications des émissions de CO₂** liées aux travaux supplémentaires réalisés pour les arbres (plantation, travaux d'entretien et récolte des arbres) et à la réduction de la surface agricole travaillée.

• **Les modifications des émissions induites**, liées à la substitution du bois issu de la taille des haies à des combustibles fossiles pour le chauffage, et liées à la fabrication et au transport :

- des engrais azotés minéraux (émissions induites estimées d'après les fertilisations moyennes en France et les valeurs fournies par la base Dia'terre® - Ges'tim) ;
- du gazole (émissions induites estimées d'après la Base Carbone® de l'ADEME) ;
- du fioul (dont la consommation est évitée par la valorisation en énergie du bois récolté à partir des haies).

Effets négligés :

- La consommation énergétique en aval de l'exploitation, liée à l'exploitation de la récolte (transport, scierie, fabrication des plaquettes ou des meubles).

• Estimation du coût unitaire pour l'agriculteur

Sont pris en compte :

- les coûts et gains associés aux arbres, considérés hors subventions : coûts d'implantation, d'entretien puis d'exploitation des arbres, et ventes de bois ;

- les effets de la perte de la surface agricole : économie d'intrants et de travail, et manque à gagner dû à une production réduite.

Pour l'agroforesterie, l'estimation des coûts s'est appuyée sur une actualisation des résultats publiés du projet SAFE. Pour les haies,

un itinéraire technique type pour l'installation, l'entretien et la récolte des haies, a été reconstitué.

Les recettes et les coûts sont additionnés à un taux d'actualisation de 4%.

	Sous-actions	A. Agroforesterie	B. Implantation de haies
Contenu technique	Implantation d'arbres	Arbres à l'intérieur des parcelles, en cultures annuelles ou en prairies (permanentes ou temporaires) Densité faible (30-50 arbres /ha), compatible avec le maintien de la production agricole, et l'accès aux aides de la PAC -5% de surface pour la culture annuelle ou la prairie	Arbres en périphérie des parcelles 100 mètres linéaires (ml) par ha de prairies 60 mètres linéaires (ml) par ha de cultures -1,2 à -2 % de surface pour la culture annuelle ou la prairie
Potentiel d'atténuation unitaire	Stockage de C kgCO ₂ e/ha/an	Dans le sol, la biomasse souterraine et aérienne : Cultures et prairies : 3 700 (400 à 4 970)	Dans le sol et la biomasse souterraine : Cultures : 550 (170 à 940) Prairies : 920 (280 à 1 560)
	Emissions directes de CO₂ (gazole) kgCO ₂ e/ha/an	Travaux d'implantation des arbres, d'entretien, de récolte du bois :	
		Consommation supplémentaire : - 14	Consommation supplémentaire : Cultures : - 3 Prairies : - 6
	Emissions de N₂O (directes + indirectes) kgCO ₂ e/ha/an	Economie d'engrais (-5% de surface) : Cultures : 63 Prairies : 8	Economie d'engrais (-1,2 à 2% de la surface) : Cultures : 15 Prairies : 25
	Total des émissions directes + indirectes kgCO ₂ e/ha/an	Cultures : 3 749 (449 à 5 019) Prairies : 3 694 (394 à 4 964)	Cultures : 562 (182 à 952) Prairies : 939 (299 à 1 579)
	Emissions induites (amont) de CO₂ et N₂O kgCO ₂ e/ha/an	Economie d'engrais et consommation accrue de gazole : Cultures : 33 Prairies : 2	Economie d'engrais, consommation accrue de gazole et valorisation énergétique : Cultures : 690 Prairies : 1 140
Total kgCO ₂ e/ha/an	Cultures : 3 782 (482 à 5 052) Prairies : 3 696 (396 à 4 966)	Cultures : 1 252 (872 à 1 642) Prairies : 2 079 (1 439 à 2 719)	
Coût unitaire	Investissement plantation	▲ Peu de références technico-économiques disponibles	
		De 17 € (merisier) à 45 € (peuplier) par hectare	15 € (plants + main d'œuvre) par ml soit 54 €/ha/an
	Entretien et exploitation des arbres	Autour de 50 € par hectare	Taille d'entretien et de formation des hauts jets, recépage, désherbage, récolte : 17 €/ha/an
	Perte de production	Cultures : de 80 à 124 €/ha/an, selon les essences Prairies : de 42 à 70 €/ha/an, selon les essences	Cultures ou prairies : 9 €/ha/an
	Valorisation de bois	Vente de bois d'œuvre : 84 à 147 €/ha	Vente du bois : 16 €/ha/an
Total €/ha/an	Cultures : 54 €/ha/an (noyer), 45 (peuplier), 69 (merisier) Prairies : 28 €/ha/an (noyer), 52 (peuplier), 45 (merisier)	75	
Assiette	Assiette théorique	Toutes les surfaces en grandes cultures (13,8 Mha) et en prairies (9,8 Mha), soit un total de 23,6 Mha	
	Critères techniques	Sols à profondeur (1 m) et RU (120 mm) suffisantes Parcelles d'au moins 4 ha	Sols à profondeur (0,5 m) suffisante Parcelles d'au moins 4 ha
	Ass. maximale technique (AMT)	Cultures : 3,9 Mha ; Prairies : 1,98 Mha Total : 5,9 Mha	Cultures : 7,6 Mha ; Prairies : 4,5 Mha Total : 12,1 Mha
Scénario de diffusion	Etat de référence 2010	2000 ha en 2010	
	Scénario de diffusion	<p>Scénario 4% de l'AMT en 2030</p> <p>Scénario 10% de l'AMT en 2030</p>	<p>Scénario 10% de l'AMT en 2030</p> <p>Scénario 20% de l'AMT en 2030</p>

Tableau 1

• Estimation de l'impact à l'échelle nationale

Assiette maximale technique (AMT)

Pour les 2 sous-actions, les surfaces toujours en herbe peu productives (parcours, landes, alpages) sont exclues car difficilement accessibles (relief).

Pour l'**agroforesterie**, sont retenues les parcelles d'une taille > 4 ha (compatible avec la mécanisation du travail entre les rangées d'arbres), et dont le sol a une profondeur > 1 m et une réserve utile > 120 mm (soit 38% des sols en cultures, 31% en prairies). Pour les **haies**, le même critère est retenu pour la taille

des parcelles, mais l'exigence est moindre pour la profondeur du sol, > 0,5 m (soit 74% des sols en cultures, 71% en prairies).

Scénario de diffusion de l'action

Pour l'**agroforesterie**, qui représente une profonde mutation dans la stratégie de production, l'hypothèse est une diffusion lente, avec 2 scénarios : une adoption sur 4 et 10% de l'AMT d'ici 2030.

Pour les **haies**, dont l'extension actuelle peut être estimée à 4% des terres (principalement situés en zones bocagères d'élevage), l'hypothèse est là aussi une diffusion lente, avec 2 scénarios : une adoption sur 10 et 20% de l'AMT d'ici 2030.

IV- Résultats et mise en perspective

	unités (M : millions)	Année 2030			Cumul sur la période 2010-2030	
		Agroforesterie* Moyenne*** [4% / 10%]	Haies** Moyenne [10% / 20%]	Total 2 sous-actions	Agroforesterie* Moyenne [4% / 10%]	Haies** Moyenne [10% / 20%]
Potentiel d'atténuation (méthode "CITEPA") Sans émissions induites		0	0	0	0	0
Potentiel d'atténuation (méthode "expert")	Sans émissions induites	1,5 [0,1 / 2,3]	1,3 [0,3 / 2,9]	2,8 [0,4 / 5,2]	17,7 [1,2 / 27,1]	18,1 [4,2 / 38,9]
	Avec émissions induites	1,5 [0,1 / 2,4]	2,8 [1,3 / 4,9]	4,4 [1,4 / 7,3]	17,7 [1,2 / 27,3]	40,2 [20,3 / 67]
Coût total pour les agriculteurs	M€	20,5 [11,7 / 29,2]	136,1 [90,8 / 181,5]	156,6 [102,5 / 210,7]	236,5 [135,1 / 337,8]	1931 [1406 / 2456]
Coût de la tonne de CO ₂ e pour l'agriculteur (méthode "expert", sans émissions induites)	€/tCO ₂ e	14 [13 / 118]	107 [63 / 332]	56 [41 / 275]	-	-

* 2 valeurs correspondant aux 2 scénarios : 4% et 10% de l'AMT ; ** 2 valeurs correspondant aux 2 scénarios : 10% et 20% de l'AMT ;

***les valeurs moyennes correspondent à l'introduction de l'agroforesterie sur 7% de l'AMT et des haies sur 15% de l'AMT, en utilisant les potentiels et coûts centraux. Les fourchettes d'atténuations basses sont appliquées aux scénarios d'AMT bas, et les fourchettes hautes aux scénarios d'AMT hauts.

Tableau 2

• Les résultats

Pour l'**agroforesterie**, le potentiel d'atténuation unitaire des émissions directes et indirectes est de 3,75 tCO₂e/ha/an pour les cultures et de 3,7 tCO₂e/ha/an pour les prairies. Les émissions induites sont très faibles (33 kgCO₂e/ha/an) pour les cultures, et négligeables en prairies.

Pour les **haies**, le potentiel d'atténuation unitaire des émissions directes et indirectes est de 0,55 tCO₂e/ha/an pour les cultures et 0,92 tCO₂e/ha/an pour les prairies. Les émissions induites sont non négligeables du fait de la valorisation énergétique de la récolte prise comme hypothèse (0,14 et 0,22 tCO₂e/ha/an pour les cultures et les prairies respectivement).

Le potentiel d'atténuation unitaire 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 tCO₂e/ha/an), ce qui est logique compte tenu de la part de la surface parcellaire concernée (1,2 ou 2% pour les haies contre 5% pour l'agroforesterie) et de la valorisation durable sous forme de bois d'œuvre prise comme hypothèse pour l'agroforesterie. Par ailleurs, le coût unitaire de la tonne de CO₂e est plus bas pour l'agroforesterie que pour les haies (14 € contre 107 €). Compte tenu des AMT différentes (5,9 millions d'ha pour l'agroforesterie et 12,1 pour les haies) et des potentiels unitaires de stockage différents, les atténuations cumulées moyennes sur la période 2010-2030 sont équivalentes pour les deux sous-actions, autour de 18 millions de tCO₂e, pour un coût cumulé de 237 millions d'euros (M€) dans le cas de l'agroforesterie, contre 1931 M€ pour la sous-action "haies". 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 pour l'agroforesterie à base de bois précieux à faible densité.

La mise en œuvre des deux sous-actions sur une même parcelle est peu probable. Toutefois, compte tenu des faibles niveaux de diffusion considérés (10% et 20% maximum de l'AMT pour l'agroforesterie et les haies respectivement), un développement des deux sous-actions sur des surfaces différentes est envisageable. Leurs effets peuvent donc être sommés au niveau national.

Ce sont les valeurs moyennes qui seront retenues pour l'analyse comparée des actions.

Comparaisons avec les résultats d'autres études "atténuation de GES". Plusieurs rapports et expertises récents portant sur des zones tempérées considèrent l'introduction d'arbres dans les parcelles agricoles comme une pratique stockant du carbone. Aux Etats-Unis, le potentiel de développement de l'agroforesterie sur 10 Mha a été estimé à 4,97 tCO₂e/ha/an. En Europe, une étude, qui reprend d'une expertise technique française des taux de stockage en agroforesterie de 5,55 à 14,8 tCO₂e/ha/an selon la densité de plantations, la durée de la rotation et la vitesse de croissance des arbres, a estimé que la contribution potentielle de l'agroforesterie au stockage de carbone est très importante (1566 millions de tonnes CO₂e par an) à l'échelle européenne (UE 27).

• La sensibilité des résultats aux hypothèses

Les résultats concernant l'efficacité environnementale et économique de cette action sont assortis d'une incertitude forte en raison

du grand nombre d'hypothèses faites. En particulier, les hypothèses faites pour quantifier l'atténuation potentielle sont fortes du fait d'un manque de références mesurées en milieu tempéré dans des situations comparables, de densité d'arbres notamment. La nature des essences plantées n'a pas été prise en compte, alors que la vitesse de croissance des arbres est un élément déterminant de la production de biomasse et donc du potentiel d'atténuation. La valeur utilisée pour estimer le stockage de carbone est réaliste notamment pour le peuplier, espèce à croissance rapide, mais pourrait être revue à la baisse pour les espèces à croissance plus lente comme le noyer. Selon les hypothèses faites sur le stockage de carbone, le potentiel d'atténuation unitaire varie d'un facteur 10 pour l'agroforesterie.

Une autre hypothèse forte a porté sur la valorisation ultérieure du bois, avec un stockage durable sous forme de bois d'œuvre pour l'agroforesterie, et un stockage limité dans le cas des haies. L'hypothèse de production de bois d'œuvre est discutable notamment pour le peuplier. Cette approche est d'autant plus critiquable que tout le carbone stocké dans le bois 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.

L'estimation de l'assiette maximale technique est également sensible aux critères biophysiques et agricoles retenus. Ces derniers, quoique raisonnables, sont discutables : les plantations d'arbres sont également possibles dans des situations *a priori* moins favorables ; d'autres critères de faisabilité technique, liés à l'exploitation agricole (SAU, équipement, intégration dans les filières bois) n'ont pas été pris en compte. Le niveau de diffusion des sous-actes envisagés en % de l'AMT est également difficile à justifier : les deux valeurs (réaliste et optimiste) retenues dans l'étude permettent d'encadrer l'estimation d'atténuation à l'horizon 2030.

Enfin, les estimations des **coûts** apparaissent également très variables et sensibles aux hypothèses retenues. Le scénario central retient un coût (certes modéré) au développement de l'agroforesterie, alors que le projet SAFE concluait, dans une certaine mesure, à sa rentabilité – toutefois variable selon les scénarios envisagés. L'une des raisons tient au contexte des prix agricoles très différents en 2006 (année de base du projet SAFE) et en 2010 (année de base de l'étude). De nombreuses variables jouent en fait sur la rentabilité de l'agroforesterie. Le taux d'actualisation choisi (4%) est notamment très pénalisant pour l'agroforesterie, or un débat existe sur ce taux, compte tenu de la stagnation de la croissance qui semble durable. 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.

• 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.

• 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 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.

• Les autres effets de l'action

Politiquement, l'**agroforesterie** est surtout mise en avant pour ses performances agri-environnementales, en tant que moyen de lutte contre l'érosion des sols, la pollution des nappes et des rivières, l'uniformisation des paysages et la perte de biodiversité. Les **haies** quant à elles, constituent aussi bien des brise-vent que des habitats et refuges pour la faune sauvage, et notamment les auxiliaires des cultures. De façon générale, l'hétérogénéité de la végétation (cultures, arbres et enherbement) permet l'établissement d'une biodiversité plus riche sur la parcelle, mais les travaux de recherche quantifiant ces effets sont rares.

Enfin, l'agroforesterie représenterait un moyen d'adaptation au changement climatique, en protégeant les cultures contre les excès climatiques (notamment les stress thermiques précoces de printemps). La compétition pour l'eau entre les arbres et la culture pourrait être accrue en cas de sécheresses plus fréquentes ou plus prononcées, mais les choix techniques explorés (faible densité d'arbres, sols à forte RU) minimisent ce risque.

• Conclusions

La disponibilité en données (données fragmentaires) est un réel verrou pour l'estimation du potentiel d'atténuation unitaire de cette action. Par ailleurs, l'estimation d'une assiette technique réaliste est difficile pour une action impliquant des pratiques agricoles très innovantes, dont ni les critères d'acceptabilité ni les résultats économiques ne sont connus. Cette situation a conduit à devoir faire de nombreuses hypothèses, qui affaiblissent les évaluations.

Pour l'**agroforesterie**, encore peu développée sur le territoire, les stockages unitaires proposés sont prudents, l'assiette technique a été évaluée de manière réaliste et les taux d'adoption, compte tenu de la grande innovation que représente cette pratique, sont raisonnables ; cela conduit à considérer que le résultat global est plausible et autorise la comparaison avec les autres actions étudiées. L'analyse montre qu'il est possible en conservant la production agricole française d'introduire des arbres dans les parcelles agricoles et de stocker du carbone dans le sol et la biomasse.

Au-delà des incertitudes sur ses résultats économiques, l'agroforesterie constitue une alternative intéressante par rapport à

d'autres options (le boisement des terres agricoles, par ex.) 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 sont importants dans la mesure où il s'agit d'un investissement de long terme dans un avenir incertain.

En ce qui concerne la sous-action **haies**, il s'agit d'une pratique déjà mise en œuvre à l'échelle du territoire dont l'assiette est très importante. Pour autant, les références en termes de potentiel de stockage additionnel suite à l'implantation de haies font état d'une grande variabilité temporelle et spatiale, ce qui a conduit 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 est réaliste, celui de 20% étant considéré comme optimiste. Reste la question du coût assez élevé d'implantation et d'entretien des haies, qui peut constituer un frein à leur mise en place. Dans cette étude, nous avons en effet considéré une valorisation bois d'œuvre pour l'agroforesterie et une valorisation déchetage et plaquette pour les haies, ce qui correspond à des hypothèses plausibles mais discutables.

L'action modifie la production agricole, mais son AMT (10% de l'assiette théorique) est faible par rapport à celle d'autres actions. Ces calculs ne concernent que les plantations à faible densité. Les plantations à densités moyenne et élevée, non considérées pour cette action, peuvent conduire, en fin de période, à des baisses importantes de la production agricole, voire à son arrêt.