

Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France

Chenu C.¹, Klumpp K.², Bispo A.³, Angers D.⁴, Colnenne C.⁴, Metay A.⁵

¹AgroParisTech, UMR Bioemco, F-78850 Thiverval Grignon

²INRA, UR Ecosystème Prairial, F-63039 Clermont-Ferrand

³ADEME, Service Agriculture et Forêts, F-49004 Angers

⁴AAC, Soils and Crops Research and Development Centre, G1V2J3 Sainte-Foy, Québec, Canada

⁵INRA, UMR Agronomie, F-78850 Thiverval-Grignon

⁶SupAgro Montpellier UMR SYSTEM, F-34060 Montpellier

Correspondance : chenu@grignon.inra.fr

Résumé

Les sols contiennent une très grande quantité de carbone, sous forme de matières organiques. Nous avons identifié des pratiques agricoles qui permettraient, sans changement majeur du système de production, d'accroître les stocks de carbone des sols. Nous avons instruit quatre actions : la réduction du travail du sol, l'implantation de davantage de couverts dans les systèmes de culture, le développement de l'agroforesterie et des haies et l'optimisation de la gestion des prairies. Nous décrivons ici ces actions, leur potentiel de stockage de C additionnel par unité de surface, l'assiette sur laquelle elles pourraient être développées et leur potentiel de stockage à l'échelle nationale. Les résultats montrent qu'il apparaît plus efficace, en termes de stockage de C dans le sol, d'accroître les entrées de matière organique au sol, par implantation de ligneux en association ou en remplacement de sols nus, par des couverts végétaux, plutôt que de tenter de réduire les vitesses de minéralisation des matières organiques par des pratiques de non labour. Ce travail s'intègre dans une étude plus vaste de comparaison de leviers techniques pour limiter les émissions de gaz à effet de serre en agriculture.

Mots-clés : gaz à effet de serre, agriculture, atténuation, sol, carbone, pratiques agricoles

Abstract: Carbon sequestration in agricultural soils

Soils contain very large stocks of carbon as organic matter. We identified agricultural practices that would increase soil C stocks, without major changes in the cropping systems. We considered four actions: reduced tillage, plant more cover crops in annual cropping systems, develop agroforestry and hedges, and manage grasslands to store soil C. We quantified the additional soil C storage potential per unit surface area, the applicability of the actions in mainland France and their C storage potential at the national scale. The results suggest that to store additional C in soils, it would be more efficient to increase organic matter inputs by planting trees and replacing bare soil by cover crops, rather than by attempting to reduce organic matter mineralization reducing or eliminating tillage. This work is part of a larger study comparing technical levers to reduce greenhouse gas emissions from agriculture in mainland France.

Keywords: Greenhouse gas, agriculture, attenuation, cropping practices

Introduction

Les sols contiennent un très important réservoir de carbone (C) sous forme de composés organiques. Cette matière organique provient des organes et organismes morts, essentiellement végétaux, des

déjections animales, des exsudats des racines ou « rhizodépôts » et des organismes vivants. La matière organique (MO) subit des biotransformations dans le sol : biodégradation et finalement minéralisation, laquelle restitue le C à l'atmosphère sous forme de CO₂. Les composés organiques résident dans le sol pendant une durée moyenne de quelques décennies, mais qui est très variable puisqu'elle peut aller de quelques heures à plusieurs millénaires. Le temps de résidence du C dans le sol dépend de la composition de la matière organique et des conditions locales (température, humidité, aération..) ; il est augmenté par l'association de la matière organique aux particules minérales du sol (aux argiles en particulier) qui assurent une protection physique et physicochimique de la MO vis-à-vis de l'action des microorganismes décomposeurs. Le carbone est donc stocké de manière temporaire dans les sols.

La quantité de carbone organique qui est stockée dans les sols du monde est considérable : entre 1 200 et 2 000 Gt (1Gt=10⁹t) de carbone dans le premier mètre du sol, soit deux à trois fois la quantité de carbone présente dans l'atmosphère sous forme de CO₂, et 700 Gt de C dans les 30 premiers cm du sol. En France métropolitaine, le stock de C des 30 premiers cm du sol est estimé à 3,2 Gt (Martin *et al.*, 2011). Une augmentation de 1‰ de ces stocks, soit 3,2 10⁶t C compenserait 12% des émissions agricoles et sylvicoles françaises, qui sont de 94 10⁶ t eqCO₂, soit 26 10⁶ t eq C (CITEPA 2012). Augmenter le stockage de C dans les sols via les pratiques agricoles apparaît donc comme un volant d'action tout à fait significatif pour l'atténuation du changement climatique.

Stocker du carbone dans les sols présente également d'autres intérêts. En effet les matières organiques des sols assurent des fonctions très diverses : elles sont une composante majeure de la fertilité chimique des sols, car leur minéralisation libère les éléments nutritifs qu'elles contiennent (N, P, K,...) ; elles augmentent la rétention d'eau par le sol et améliorent sa structure et sa résistance à l'érosion ; elle jouent un rôle de filtre vis à vis de polluants tels que les pesticides ou les éléments traces métalliques et renforcent donc le rôle de tampon que le sol a vis à vis des autres compartiments de l'environnement : l'eau, l'atmosphère et le vivant. Enfin elles sont la ressource trophique des organismes vivants du sol et soutiennent ainsi la très grande biodiversité qu'il héberge. Les matières organiques sont ainsi une composante majeure de la qualité des sols et stocker du carbone dans les sols, c'est à dire augmenter sa teneur en matière organique, apporte de nombreux bénéfices.

Comment stocker du carbone dans les sols agricoles et quels en sont les leviers d'action ? L'évolution du stock de carbone organique des sols résulte de l'équilibre entre le flux d'entrée, c'est à dire les entrées de MO fraîches au sol et le flux de sortie par minéralisation. Une représentation simplifiée du cycle du carbone dans un agroécosystème (Figure 1) montre que les leviers d'action sont (1) d'augmenter les entrées en augmentant la production primaire (par exemple en augmentant les rendements en culture), (2) de favoriser le retour au sol de la biomasse végétale produite (en restituant les résidus de récolte plutôt que les exporter, en limitant le pâturage), (3) d'importer des matières organiques externes à la parcelle (par exemple des produits résiduels organiques tels que des composts, des effluents d'élevage), ou (4) de réduire la minéralisation des matières organiques (par exemple en limitant les opérations de travail du sol qui stimulent la décomposition).

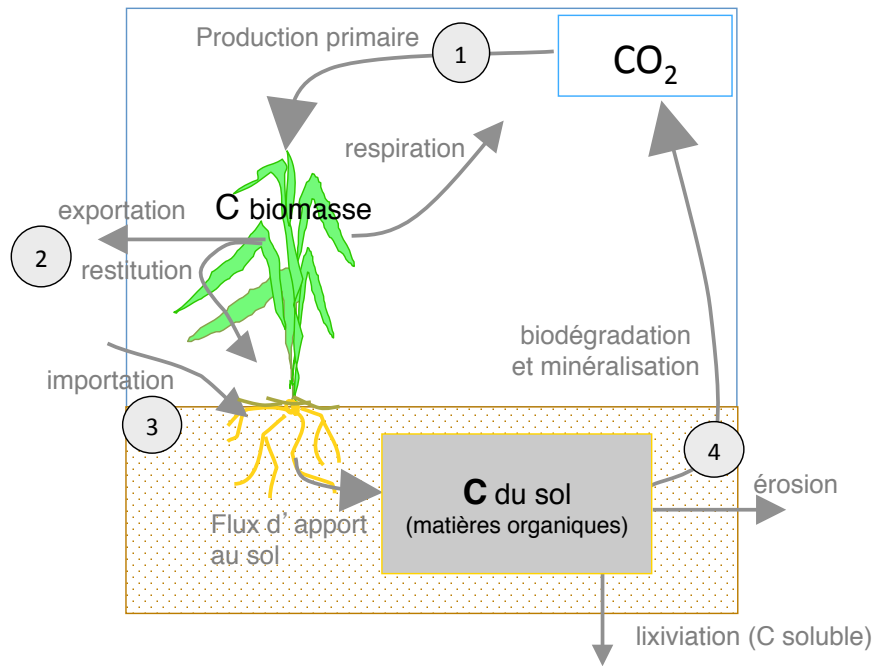


Figure 1 : Le cycle du C dans les sols d'un agroécosystème cultivé et les leviers d'action : 1- augmentation de la production primaire, 2- diminution des exportations et augmentation des restitutions, 3- importation de matières organiques exogènes et 4- diminution des pertes par minéralisation. Les pertes par érosion et par lixiviation de C soluble sont en conditions tempérées généralement beaucoup moins importantes que celles par minéralisation. Dans une prairie pâturée il faudrait ajouter à ces flux la consommation d'herbe par le bétail, la respiration des animaux et la restitution de leurs déjections au sol.

Dans une étude confiée à l'INRA¹ par l'ADEME² et les ministères en charge de l'agriculture et de l'écologie (Pellerin *et al.*, 2013 ; Pellerin *et al.*, 2014, ce numéro), nous avons retenu quatre actions visant à réduire les émissions de GES via le stockage de carbone dans les sols. Les critères de sélection des actions ont été les suivants : (i) pratique agricole relevant d'une décision de l'agriculteur, avec une atténuation escomptée se situant au moins en partie sur l'exploitation agricole, sans remise en cause majeure du système de production ni baisse des niveaux de production supérieure à 10% ; (ii) potentiel d'atténuation des émissions de GES avéré par l'état des connaissances ; (iii) techniques nécessaires à la mise en œuvre de l'action actuellement disponibles ; (iv) action applicable dès maintenant (réglementation, acceptabilité..) et (v) action compatible avec les autres objectifs majeurs assignés à l'agriculture, en particulier environnementaux. Pour chacune de ces actions, déclinée éventuellement en sous action(s), nous avons estimé un potentiel de stockage de carbone unitaire, c'est à dire par unité de surface et un potentiel d'atténuation des émissions de GES unitaire en passant en revue tous les postes d'émissions de GES potentiellement affectés par l'action, à partir d'une analyse bibliographique internationale. Nous avons estimé le coût unitaire de l'action pour l'agriculteur comprenant les variations de charges (achats d'intrants, travail...), les investissements, et les modifications de revenu associées à celles des productions telles que d'éventuelles pertes de rendement. Nous avons identifié l'assiette maximale technique (AMT), c'est-à-dire la surface sur laquelle l'action pouvait être développée, en tenant compte de critères pédologiques, agronomiques et environnementaux.

Ces quatre actions sont (i) la **réduction du travail du sol**, (ii) l'**implantation de davantage de couverts végétaux dans les systèmes de culture**, (iii) le **développement de l'agroforesterie et des**

¹ Institut National de la Recherche Agronomique

² Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

haies et (iv) l'**optimisation de la gestion des prairies**. Nous présenterons ici ces quatre actions, leur potentiel de stockage de C et leur potentiel d'atténuation des émissions de GES, unitaire puis pour le territoire français, avant de discuter des résultats obtenus.

1 . Les pratiques permettant de stocker du carbone dans les sols

1.1 Méthodologie

La première étape a consisté à identifier des potentiels de stockage de carbone pour les différentes pratiques en nous basant sur une analyse de la littérature, en sélectionnant plus particulièrement les études portant sur des conditions pédoclimatiques analogues à celles de la France métropolitaine et en privilégiant, lorsqu'elles existaient, les résultats de méta-analyses. Nous avons considéré l'horizon de surface du sol : horizon cultivé ou son équivalent (0-30 cm). Nous avons estimé un taux de stockage de C additionnel moyen en $t\ ha^{-1}\ an^{-1}$ en référence à un témoin sans application de la pratique et en considérant que le stockage était linéaire sur 20 ans. Nous l'avons assorti d'une incertitude. La même démarche a été appliquée pour estimer les émissions des autres GES : N_2O et CH_4 (ce dernier étant en fait négligeable pour les actions considérées). Nous avons estimé les émissions induites, à l'amont ou à l'aval de l'exploitation, liées à des achats (produits phytosanitaires, carburant) ou à la vente de biens modifiés par l'action (par exemple, vente d'énergie renouvelable produite sur l'exploitation en agroforesterie).

1.2. Non labour

1.2.1 Description de l'action et principes d'action

L'absence de labour augmenterait le stockage de C par une moindre minéralisation des matières organiques due à leur meilleure protection physique dans les agrégats du sol (qui ne sont plus détruits par le labour, ni exposés à la pluie lorsque le sol est nu), et à des conditions plus froides et humides dans la couche de surface du sol. Cela correspond donc au volant d'action 4 sur la Figure 1. La suppression du labour, action fortement consommatrice de carburant fossile, permet en outre une baisse des émissions de CO_2 . Par contre, l'absence de labour augmenterait (souvent ??) les émissions de N_2O en favorisant la dénitrification par une structure du sol plus compacte et une humidité souvent plus élevée, donc des conditions plus anoxiques.

Nous avons considéré sur des parcelles antérieurement labourées, le passage : au semis direct continu (SD), au labour occasionnel un an sur cinq (LO1/5), alternant avec 4 années de semis direct, à un travail superficiel du sol sur une dizaine de centimètres de profondeur (TS).

1.2.2 Potentiel de stockage de C/ émissions d'autres GES/ potentiel d'atténuation unitaire

Les données disponibles proviennent surtout de comparaisons entre semis direct et labour réalisées en Amérique du Nord, et nombreuses d'entre elles comportent des biais méthodologiques. Le stockage additionnel de C a souvent été surestimé par des mesures limitées aux horizons supérieurs du sol, ne tenant pas compte des variations de masse volumique apparente du sol, ou effectuées sur des durées trop courtes. Le semis direct conduit en effet à une stratification importante des matières organiques dans le sol : les horizons superficiels (0-20 cm) stockent du C alors que les horizons plus profonds en perdent. De plus, la cinétique de stockage n'est pas linéaire : elle est plus rapide les premières années et atteint un plateau après quelques décennies. Nous nous sommes particulièrement appuyés sur trois méta-analyses récentes (Angers et Eriksen-Hamel, 2008 ; Luo *et al.*, 2010 ; Virto *et al.* 2012), confirmées par des travaux récents et méthodologiquement fiables réalisés en France (Viaud *et al.*, 2011 ; Dimassi *et al.*, 2013). Ils montrent des bilans nuls ou faiblement positifs (Tableau 1), conduisant à revoir nettement à la baisse les évaluations du potentiel de stockage de C du semis direct par rapport

à ce qui est admis depuis une quinzaine d'années et sert de base aux coefficients d'atténuation utilisés par le GIEC. Les effets du labour occasionnel, peu étudiés, ont fait l'objet d'estimations par modélisation. Les travaux, peu nombreux, sur le travail superficiel du sol ne mettent pas en évidence de différence par rapport au labour. En ce qui concerne les émissions de N₂O, les travaux et méta-analyses récents montrent que non-labour conduit à des émissions souvent plus importantes qu'en labour, mais faiblement, excepté pour les sols hydromorphes, et sont assorties d'une variabilité très grande (van Kessel *et al.*, 2012). Dans le calcul du potentiel d'atténuation unitaire, nous avons tenu compte d'une augmentation, telle qu'elle est observée en général, de la consommation d'herbicides, et de l'économie de carburant permise par la réduction des opérations de travail du sol (Tableau 1, Figure 3).

Tableau 1 : Stockage de C dans les sols, potentiel d'atténuation unitaire et assiette pour l'action non labour

Passage du labour continu (chaque année) à :		Semis direct strict continu (tous les ans) (SD)	Semis direct avec labour occasionnel 1 an sur 5 (LO1/5)	Travail superficiel continu (TS)
Potentiel d'atténuation unitaire	Stockage additionnel de C (t ha ⁻¹ an ⁻¹)	0,15 (0-0,3)	0,10 (0-0,2)	0
	Total émissions additionnelles directes, indirectes et induites (kg CO ₂ e ha ⁻¹ an ⁻¹)	604 (-36 à 1212)	400 (-27 à 824)	87 (-23 à 126)
Assiette	Assiette maximale théorique	Toutes les surfaces en grande culture (14,8 millions d'ha)		
	Surfaces exclues (contraintes techniques)	100% des surfaces cultivées en pommes de terre et betteraves, surfaces en monoculture, sols hydromorphes		Sols très hydromorphes
	Assiette maximale technique (millions d'ha)	10,1		13,8

1.2.3 Assiette

Nous avons estimé l'assiette maximale technique en retranchant de la superficie totale des cultures assolées, les surfaces des productions non adaptées au non-labour (les cultures sarclées comme la betterave ou pomme de terre et les monocultures dont le désherbage est plus difficile) et les sols où le non-labour est peu approprié et induit des émissions de N₂O rédhitoires comme les sols hydromorphes.

1.2.4 Impacts environnementaux, coûts, freins

En termes de coût, les principaux postes sont l'économie de carburant et de temps, la consommation accrue d'herbicides et les pertes de rendement (estimées entre 0 et -5%), qui en font une action à faible coût (Pellerin *et al.*, 2013).

Le non labour est associé à d'autres effets environnementaux positifs tels que l'amélioration de la stabilité structurale, la réduction du ruissellement et de l'érosion, l'amélioration de la biodiversité et de l'activité biologique des sols, ou négatifs tels que le recours accru aux herbicides pour réduire les adventices.

Le non-labour est déjà adopté spontanément par les agriculteurs (sur 21% des surfaces de cultures annuelles en 2001, 34% en 2006), pour les économies de carburant et de temps de travail qu'il permet ; il s'agit généralement d'un passage à du travail superficiel, ou bien de semis direct et de semis direct assorti d'un recours périodique au labour.

1.3 Introduction de couverts végétaux dans les systèmes de culture

1.3.1 Description de l'action et principes d'action

Nous avons considéré trois sous-actions : (i) la mise en place de cultures intermédiaires dans les zones non vulnérables de la Directive Nitrates en interculture longue c'est à dire de 5 à 8 mois (dans les zones de grande culture vulnérables, cette action est déjà rendue obligatoire par la Directive Nitrates) ; (ii) la mise en place de cultures intercalaires, par enherbement permanent de toute la surface en vergers et des inter-rangs en vignobles, et (iii) l'implantation de bandes enherbées de quelques mètres de large le long des cours d'eau, en substitution aux cultures annuelles.

L'effet attendu sur le stockage de C dans le sol est essentiellement dû à une augmentation des apports de matière organique au sol, par augmentation de la production primaire (couvert végétal en remplacement d'un sol nu) (Figure 1) et secondairement par réduction du travail du sol (passage d'une culture annuelle labourée à un couvert enherbé permanent, assimilable à une prairie. Ces sous-actions sont susceptibles de modifier les émissions de N₂O essentiellement par réduction de la fertilisation azotée (cultures intermédiaires, bandes enherbées) ou au contraire par son augmentation (enherbement en vigne).

1.3.2 Potentiel de stockage de C / émissions d'autres GES / potentiel d'atténuation unitaire

Nous nous sommes appuyés sur des travaux récents ayant fait l'objet d'une synthèse bibliographique dans l'étude INRA « Cultures intermédiaires » en 2012 (Justes *et al.*, 2012). La diversité des couverts considérés dans la littérature est cependant restreinte par rapport à celle des couverts effectivement mis en place. En l'absence de données spécifiques publiées pour des conditions tempérées, nous avons assimilé l'enherbement en vignes, vergers et bandes enherbées à une conversion grande culture annuelle – prairie permanente sur la surface concernée, et avons repris les valeurs de l'expertise INRA en 2002 (Arrouays *et al.*, 2002). Les valeurs en sont reportées dans le Tableau 2 et dans les Figure 2 et Figure 3.

1.3.3 Assiette

Les actions sont développables sur les surfaces des cultures considérées (grandes cultures, vignes, vergers). Nous avons exclu, pour les cultures intermédiaires, les sols très riches en argile, car ces sols sont peu praticables en hiver lorsque la culture intermédiaire doit être implantée. En ce qui concerne l'enherbement des vignes, nous avons exclu les sols très caillouteux, car là aussi l'implantation d'un couvert est délicate. Pour les bandes enherbées, nous avons considéré la totalité des surfaces le long des cours d'eau identifiés sur une carte IGN au 1/250000^e (Tableau 2).

1.3.4 Impacts environnementaux, coûts, freins

L'implantation de couverts temporaires ou permanents est assortie d'impacts environnementaux positifs : réduction de la lixiviation des nitrates à partir des sols portant ces couverts, une augmentation de l'activité biologique et de la biodiversité tellurique et une réduction du ruissellement et de l'érosion. L'enherbement des vignes est susceptible d'en réduire la production et la qualité des raisins dans certaines conditions et la mise en place de bandes enherbées conduit à une réduction de la production lorsque les surfaces étaient initialement cultivées. Il en résulte un coût, auquel il faut ajouter les dépenses occasionnées par l'implantation et la gestion des couverts.

Tableau 2 : Stockage de C dans les sols, potentiel d'atténuation unitaire et assiette pour l'action couverts végétaux.

Passage de grandes cultures annuelles sans interculture, de sol nu en vignes et vergers à :		Cultures intermédiaires en grande culture	Culture intercalaire : enherbement des vergers	Culture intercalaire : enherbement en vigne	Bandes enherbées le long des cours d'eau
Potentiel d'atténuation unitaire	Stockage additionnel de C (t ha ⁻¹ an ⁻¹)	0,24 (0,13-0,37)	0,49 (0,23-0,72)	0,32 (0,15-0,48)	0,49 (0,23-0,72)
	Total émissions additionnelles directes et induites (kg CO ₂ e ha ⁻¹ an ⁻¹)	522-1305	844-2753	1078	822-1578
Assiette	Assiette maximale théorique	Toutes cultures annuelles	Tous les vergers	Certains vignobles	Toutes les bordures de cours d'eau
	Surfaces exclues (contraintes techniques)	Sols à taux d'argile > 60%		Sols avec une forte charge en éléments grossiers, vignes en climat sec	
	Assiette maximale technique (millions d'ha)	2,83	0,014	0,128	0,25

1.4 Agroforesterie et haies

1.4.1 Description de l'action et principes d'action

L'agroforesterie est un terme générique qui désigne un mode d'exploitation des terres agricoles associant des arbres et des cultures ou des pâturages. L'agroforesterie « moderne » qui associe des alignements d'arbres avec une culture intercalaire mécanisée ou une prairie intercalaire est celle retenue ici. Nous avons considéré des plantations de faible densité (30-50 arbres /ha), restant en place pendant au moins 20 ans. La sous-action « haies » correspond à l'introduction d'arbres en périphérie des parcelles et nous avons considéré une implantation de 100 m linéaires (ml) de haie par ha de prairie et de 60 ml par ha de cultures.

L'agroforesterie intraparcellaire ainsi que les haies permettent un stockage de carbone dans la biomasse ligneuse. Un intérêt supplémentaire de l'agroforesterie est une production totale de biomasse (arbres + production agricole) par hectare supérieure à celles obtenues sur des surfaces séparées. Nous avons ainsi fait l'hypothèse d'un Land Equivalent Ratio (LER), c'est à dire la surface qu'il faudrait cultiver avec des cultures pures (témoin agricole et témoin forestier) pour produire autant que ce qui est produit par hectare de plantation agroforestière, de 1,3. Nous avons considéré une production de bois d'œuvre en agroforesterie, donc un stockage durable du bois, et de bois de chauffage pour les haies, donc un stockage nul de biomasse aérienne. Outre le stockage de C dans la biomasse aérienne et souterraine, agroforesterie et haies augmentent le stockage de carbone dans les sols principalement par augmentation de la production primaire (LER>1) et des restitutions au sol (racines mortes, rhizodépôts et feuilles des arbres), mais également par absence de labour sur la zone plantée de ligneux. Par ailleurs, l'absence de fertilisation sur cette zone plantée conduit à une réduction des émissions de N₂O liées à la fertilisation azotée. Par contre les travaux supplémentaires réalisés pour la plantation, l'entretien et la récolte des arbres occasionnent une consommation supplémentaire de carburant fossile, donc une émission accrue de CO₂. Enfin l'éventuelle utilisation du bois des haies pour le chauffage permet une substitution de cette biomasse à des combustibles fossiles, ce qui réduit les émissions de CO₂.

1.4.2 Potentiel de stockage de C / émissions d'autres GES / potentiel d'atténuation unitaire

Si les impacts de l'agroforesterie sur les sols font l'objet de nombreux travaux en zone tropicale, il n'en est pas de même en conditions tempérées et les références sur le stockage de C dans les sols dans ces conditions sont très peu nombreuses (Kumar et Nair, 2011). De plus, les stocks sont affectés d'une importante variabilité spatiale, structurée par les rangées d'arbres (Bambrick *et al.*, 2010), ce qui complique l'analyse. Des parcelles témoins (sans arbres) ne sont pas toujours disponibles, ce qui fait que si des valeurs de stocks sont proposées, le stockage additionnel par rapport à une parcelle cultivée ne peut pas être estimé. La valeur que nous avons retenue est donc assortie d'une très grande incertitude (Tableau 3, Figure 2). En ce qui concerne les haies, nous nous sommes appuyés, outre une synthèse américaine (Eagle *et al.*, 2012), sur des travaux réalisés en Bretagne (Walter *et al.*, 2003 ; Follain *et al.*, 2007). Pour cette action, en raison des différents volants d'action, le potentiel d'atténuation est donc nettement plus élevé que le stockage additionnel de C (Figure 3).

Tableau 3 : Stockage de C dans les sols, potentiel d'atténuation unitaire et assiette pour l'action agroforesterie et haies

Passage de cultures annuelles ou prairies à :		Agroforesterie		Haies	
		en cultures annuelles	en prairies	en cultures annuelles	en prairies
Potentiel d'atténuation unitaire	Stockage additionnel de C (t ha ⁻¹ an ⁻¹)	0,30 (0,03-0,41)	0,30 (0,03-0,41)	0,15 (0,05-0,26)	0,25 (0,08-0,43)
	Total émissions additionnelles directes et induites (kg CO _{2e} ha ⁻¹ an ⁻¹)	3782 (482 à 5062)	3696 (396 à 4966)	1252 (182 à 952)	939 (299 à 1579)
Assiette	Assiette maximale théorique	Toutes grandes cultures	Toutes prairies	Toutes grandes cultures	Toutes prairies
	Surfaces exclues (contraintes techniques)	Parcelles ≤ 4 ha. Sols de profondeur ≤ 1m et de RU ≤ 120 mm		Parcelles < 4 ha. Sols de profondeur ≤ 0,5 m	
	Assiette maximale technique (millions d'ha)	3,9	1,98	7,6	4,5

1.4.3 Assiette

Les surfaces toujours en herbe peu productives (parcours, landes, alpages) ont été exclues car difficilement accessibles à cause du relief. Pour l'agroforesterie nous avons retenu les parcelles d'une taille suffisante (> 4 ha) pour permettre la mécanisation du travail des cultures, dont le sol a une profondeur > 1m et une réserve utile > 120 mm afin de limiter la concurrence pour l'eau entre arbres et culture ou prairie. Pour les haies, ont été également retenues les grandes parcelles (> 4 ha), mais avec une exigence moindre sur la profondeur du sol (> 0,5 m).

1.4.4 Impacts environnementaux, coûts, freins

L'agroforesterie est maintenant souvent mise en avant pour ses performances agri-environnementales, comme 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 auraient les mêmes effets et servent de brise vent. Les deux actions sont assorties de coûts assez importants, liés aux travaux d'implantation, entretien et récolte du bois et à la perte de surfaces en culture ou prairie. Identifiée comme une pratique agroécologique et représentant une profonde mutation des systèmes de culture, l'agroforesterie fait l'objet de diverses mesures d'accompagnement au plan national et européen. Nous avons considéré que son développement était entaché de freins importants et avons restreint le périmètre de cette sous-action à 10% de l'assiette maximale technique en 2030 et visé 20% de l'assiette maximale technique pour les haies.

1.5 Gestion des prairies

1.5.1 Description de l'action et principes d'action

Des travaux récents montrent que les prairies sont des puits de carbone et sont à ce titre susceptibles de compenser une partie des émissions de gaz à effet de serre du secteur de l'élevage (Soussana *et al.*, 2004). Toutefois l'importance du stockage additionnel de carbone dépend de leur type (prairie permanente ou temporaire) et de leur mode de gestion (pâturage, fauche, chargement animal, niveau de fertilisation...). Les prairies accumulent du carbone essentiellement sous forme de matières organiques dans les sols. La présence d'un couvert permanent assure des entrées de C au sol importantes, particulièrement par voie racinaire (racines mortes, rhizodépôts) et l'absence de perturbations par le travail du sol, ou sa faible fréquence en prairies temporaires, limite le déstockage par minéralisation des matières organiques (Figure 1). La conversion de surfaces cultivées en prairie étant un changement d'usage, elle ne faisait pas partie du périmètre de l'étude. Nous avons considéré deux sous-actions susceptibles d'augmenter le stockage de carbone dans les sols de prairie : l'allongement de la durée des prairies temporaires et l'intensification de prairies peu productives. La première sous-action vise à réduire la fréquence de retournement des prairies, ce qui prolonge la phase de stockage de C et réduit les émissions de CO₂ ainsi que la consommation de gazole. Nous avons opté pour un allongement à 5 ans de la durée de vie des prairies temporaires. Dans les prairies peu productives comme celles des pacages, alpages et landes, la production végétale peut être stimulée en augmentant le chargement animal de 20% sur une partie de ces prairies, c'est à dire en déplaçant temporairement les animaux d'autres prairies plus productives et situées à proximité, qui pourront alors être fauchées. Ceci s'accompagne sur la parcelle peu productive d'un prélèvement d'herbe modéré et d'un apport de déjections qui restituera plus de C et N au sol. Il en est attendu une augmentation de la production primaire, donc des retours de C au sol plus importants.

1.5.2 Potentiel de stockage de C / émissions d'autres GES / potentiel d'atténuation unitaire

Nous avons calculé le stockage de C et les atténuations unitaires en utilisant la méthode CITEPA (2011), basée sur les préconisations du GIEC (Tableau 4). L'allongement de la durée des prairies temporaires réduit les émissions de N₂O, puisque les épisodes de minéralisation des matières organiques du sol liés au retournement des prairies sont moins fréquents. L'augmentation du chargement animal dans les prairies peu productives stimule les émissions de N₂O, résultat de l'apport d'azote des déjections et augmente les émissions de CH₄ dues à la fermentation entérique et aux déjections (Tableau 4, Figure 2).

En conséquence si le potentiel d'atténuation est plus élevé que le stockage additionnel de C lorsque l'on allonge la durée de vie des prairies, on observe l'inverse pour l'intensification des prairies peu productives (Figure 3).

1.5.3 Assiette

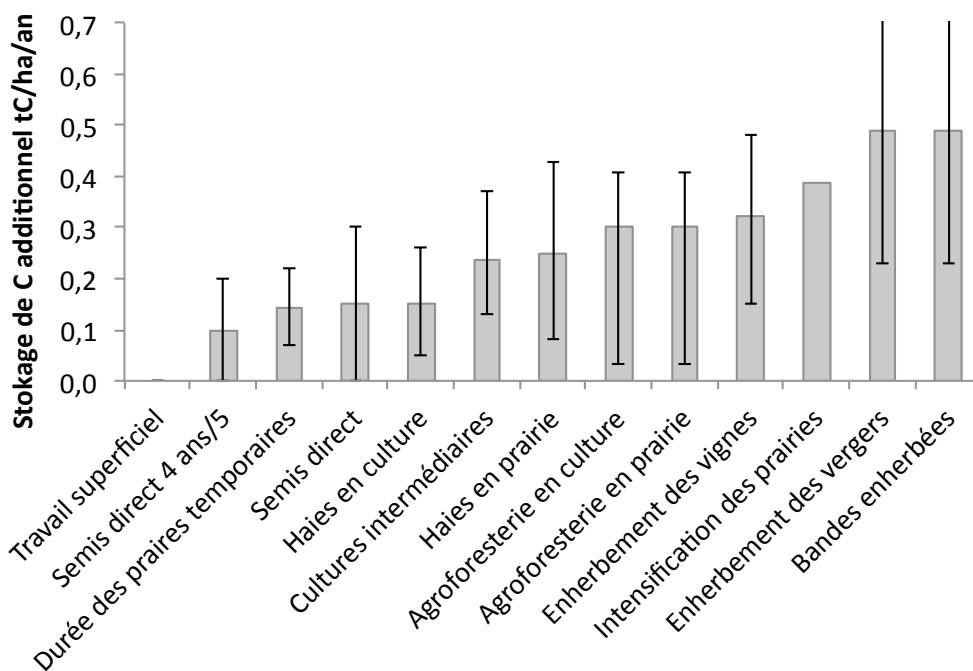
Toute la surface des prairies temporaires est concernée par l'action. La surface des prairies peu productives et peu éloignées d'autres prairies de l'exploitation est considérée, afin de permettre le transfert des animaux ; nous avons supposé que c'était le cas pour 20% des surfaces de prairie peu productives.

1.5.4 Impacts environnementaux, coûts, freins

Les sous-actions proposées représentent une économie puisque les travaux de labour et d'implantation de la prairie temporaire sont moins fréquents et qu'une vente de foin des parcelles productives est permise en transférant les animaux sur une parcelle de prairie peu productive.

Tableau 4 : Stockage de C, potentiel d'atténuation unitaire et assiette pour l'action optimisation de la gestion des prairies

Passage de prairies temporaires ou permanentes à :		Allongement à 5 ans de la durée des prairies temporaires	Intensification modérée des prairies peu productives
Potentiel d'atténuation unitaire	Stockage additionnel de C (t ha ⁻¹ an ⁻¹)	0,14	0,39
	Total émissions additionnelles directes et induites (kg CO _{2e} ha ⁻¹ an ⁻¹)	620	840
Assiette	Assiette maximale théorique	Toutes les prairies temporaires	Les prairies peu productives
	Surfaces exclues (contraintes techniques)	-	Prairies éloignées d'autres pâtures de l'exploitation
	Assiette maximale technique (millions d'ha)	1,8	0,5

**Figure 2** : Potentiels de stockage additionnel unitaire de C des différentes actions.

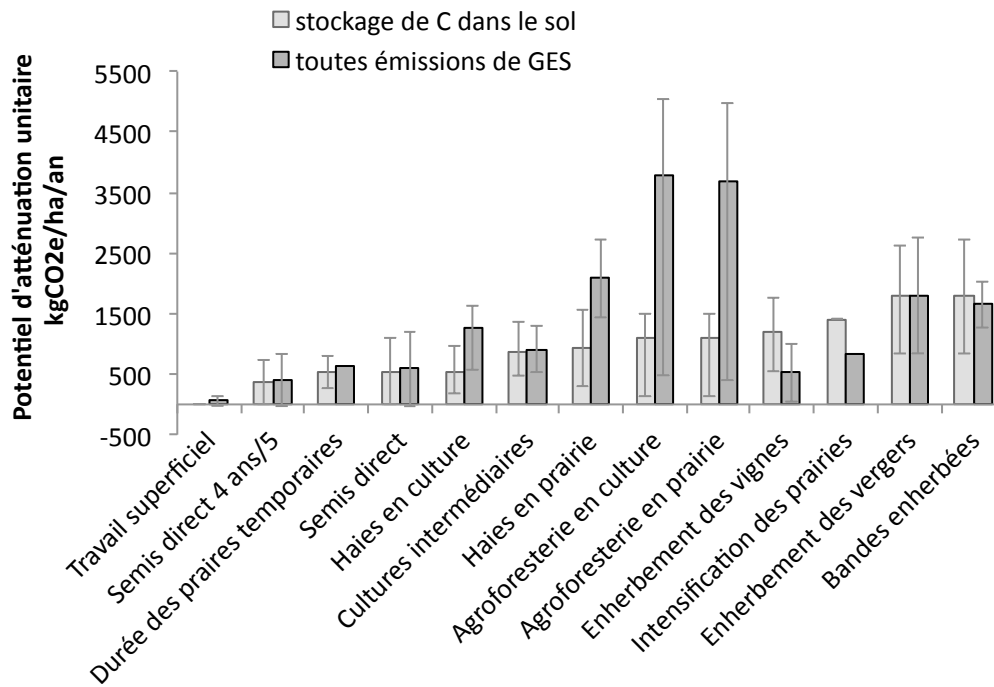


Figure 3 : Potentiels d'atténuation unitaire des différentes actions, prenant en compte les émissions de tous GES, directes, indirectes et induites. Ils sont comparés aux stockages additionnels de C lesquels sont exprimés ici en kg CO₂e/ha/an. Les actions sont classées par ordre croissant de stockage additionnel de C, comme dans la Figure 2.

2. Potentiel de stockage de C et d'atténuation de GES de ces pratiques à l'échelle nationale

Pour calculer un potentiel de stockage de C ou un potentiel d'atténuation additionnels pour le territoire français, nous avons dans un premier temps soustrait à l'assiette maximale technique (cf Tableaux) la surface sur laquelle la pratique était déjà en place en 2012 (par ex. la soustraction des surfaces de vergers déjà enherbés ou celle des prairies temporaires de durée ≥ 5 ans). La surface résultante est ensuite multipliée par le potentiel de stockage de C unitaire (Figure 2) pour estimer un potentiel de stockage additionnel de C pour le territoire de France métropolitaine, si la pratique était appliquée sur toute l'assiette maximale technique (AMT) (Figure 4).

Pour l'action agroforesterie et haies, dans l'étude INRA un scénario d'adoption prudent a été considéré avec développement de la pratique en 20 ans sur 10% de l'AMT pour l'agroforesterie et 20% de l'AMT pour les haies (Pellerin *et al.*, 2013). Nous avons ici comparé les résultats des deux scénarios (prudent ou 100% de l'AMT). On constate que les différentes actions, classées par potentiel de stockage de C croissant dans la Figure 2, ne représentent pas des potentiels de stockage additionnel croissants au plan national. En effet certaines, bien qu'efficaces par unité de surface, comme le sont les cultures annuelles en zone non vulnérable ou l'enherbement des vergers, concernent en fait de petites surfaces (Tableau 2) ; en outre certaines sont déjà largement pratiquées, comme l'enherbement des vergers. Les actions ayant le plus fort potentiel de stockage de C à l'échelle nationale sont celles liées à une réduction du labour et au développement de l'agroforesterie et des haies si on les applique à toute l'AMT. Rappelons que si le stockage additionnel unitaire est toujours positif pour l'agroforesterie et les haies (Tableau 3), il n'en est pas de même pour la réduction du labour pour lequel le stockage additionnel minimum est de 0 (fourchette de variation, Tableau 1). Si l'on somme le potentiel de stockage des pratiques compatibles cela représente $2,4 \cdot 10^6$ t C soit une augmentation relative de 0,8‰ des stocks de C des sols métropolitains.

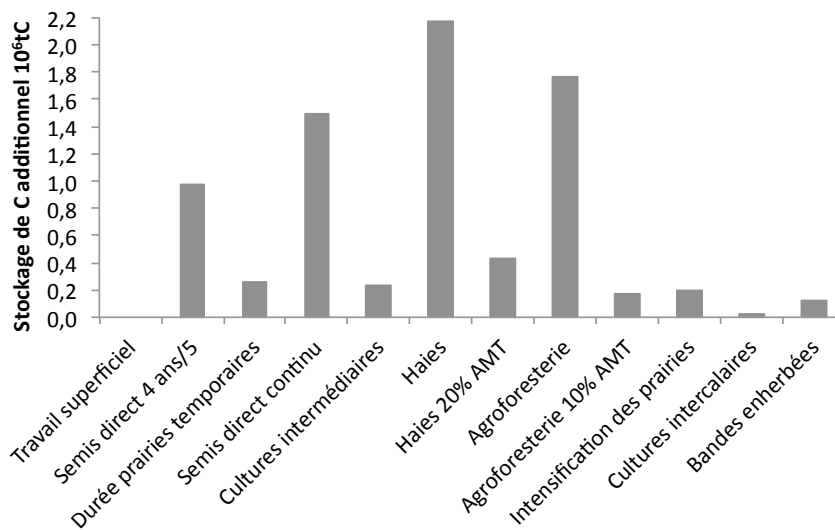


Figure 4 : Potentiel de stockage de C additionnel, pour le territoire français métropolitain, pour une année, en l'appliquant à toute l'assiette maximale technique (AMT) moins les surfaces sur lesquelles ces actions étaient déjà mises en œuvre. Pour l'agroforesterie et les haies nous avons représenté ce potentiel pour toute l'assiette maximale technique ou bien pour 10% (agroforesterie) et 20% (haies), selon Pellerin *et al.*, 2013. Le classement des actions sur l'axe des abscisses est par potentiel de stockage additionnel unitaire croissant (Figure 2). Les incertitudes n'ont pas été reportées sur ce graphique, bien que très grandes.

Ce décompte considère les pratiques séparément alors que le potentiel de stockage pourrait être plus important en modifiant les systèmes de production plus profondément et en combinant les actions entre elles. Ainsi par exemple, le moindre travail du sol peut s'accompagner de la mise en place de cultures intermédiaires visant à protéger les sols en hiver. Cet effet est plus difficile à évaluer car les combinaisons possibles entre actions sont multiples. Une évaluation précise nécessiterait d'identifier les pratiques et successions culturales les plus courantes afin de procéder soit à des simulations, soit à des mesures sur des parcelles expérimentales ou d'agriculteurs.

Enfin le bilan pour les autres émissions de GES, directes ou indirectes et induites, est contrasté selon les actions (Pellerin *et al.*, 2013 ; Pellerin *et al.*, 2014) (Figure 4). Toutes les actions considérées ici atténuent les émissions de GES, sauf la réduction du labour dont les valeurs basses de la fourchette considérée sont négatives : il peut en effet il y avoir une augmentation des émissions de GES en raison des émissions de N₂O.

En termes de coût, les actions permettant de stocker du carbone se classent en trois familles : celles à coût négatif, comme l'optimisation de la gestion des prairies, celles à coût faible (< 30€ par ha), comme la réduction du labour, l'agroforesterie ou les cultures intercalaires, et celles à coût élevé comme les haies, les cultures intermédiaires ou les bandes enherbées. Outre leur efficacité et leurs bénéfices annexes, ce coût déterminera leur développement.

Discussion et conclusion

La mise en œuvre de pratiques agricoles sans changement majeur de l'orientation des systèmes de production permettrait donc une **augmentation relative du stock de carbone des sols significative**, puisqu'elle correspondrait, pour une année de son application à l'ensemble de l'assiette choisie, à 9% des émissions de GES de l'agriculture. Les résultats obtenus ici sont cohérents dans l'ensemble avec ceux de l'expertise INRA de 2002 (Arrouays *et al.*, 2002). De plus l'accroissement de la teneur en matières organiques des sols présente de nombreux bénéfices environnementaux que nous avons listés.

Toutefois, le stockage de carbone dans les sols présente des caractéristiques dont il faut tenir compte. Il est limité en amplitude ; en effet les teneurs en matière organique des sols n'augmentent pas indéfiniment mais atteignent un plateau, dont la valeur semble dépendre des caractéristiques pédologiques et du climat. Surtout le stockage de carbone dans les sols est temporaire et réversible. Tout abandon de la pratique conduit à une libération d'une partie du carbone stocké, car elle modifie les composantes du bilan de carbone : les flux d'entrée de C au sol ou les flux de sortie par minéralisation, et que le temps de résidence des matières organiques dans les sols est en moyenne de quelques décennies. Cette caractéristique est cruciale à considérer si l'on souhaite concevoir des systèmes incitatifs à l'adoption de pratiques dites « stockantes ». Il faut alors raisonner le soutien à long terme et proposer des mécanismes adéquats (ex : assurances, contrats d'engagement à long terme).

Ce travail, basé sur une revue critique de la littérature scientifique internationale, modifie pour partie la vision antérieure des potentiels de stockage relatifs de différentes pratiques. Ainsi le **potentiel de stockage de C additionnel unitaire par des pratiques de non labour a été fortement revu à la baisse**. Un résultat majeur de l'étude est de montrer, par comparaison des différentes pratiques (Figure 2), **qu'il est plus efficace d'augmenter les entrées de carbone au sol, que de tenter d'en réduire les sorties** (Figure 1). Toutes les pratiques permettant d'augmenter la production primaire peuvent être ici mobilisées : implantation de ligneux en association (haies, agroforesterie), remplacement de sols nus par des couverts végétaux, dans l'espace (cultures intercalaires) ou dans le temps (cultures intermédiaires).

Nous n'avons pas considéré ici toutes les pratiques permettant de stocker du carbone dans les sols agricoles. Ainsi la restitution des résidus de culture plutôt que leur exportation n'a pas été envisagée alors qu'elle a un impact significatif sur les stocks de carbone des sols (Arrouays *et al.*, 2002). Nous n'avons pas instruit cette action car le brûlage des pailles, interdit, ne se pratique plus depuis des années. L'exportation des pailles vers l'élevage, elle, conduit à leur retour différé dans le temps, sous forme d'effluents. Enfin l'exportation des pailles à des fins de valorisation énergétique est une alternative de plus en plus pratiquée et envisagée. Cependant c'est l'ensemble de la filière, énergétique versus agricole, qui doit alors être analysée, ce qui sortait du périmètre de cette étude. Nous n'avons pas non plus considéré les apports de matière organique exogène. Ils permettent des stockages additionnels de C significatifs (0,15 à 0,5 t C ha⁻¹ an⁻¹, Peltre *et al.*, 2012). Cependant, dans le cas des effluents d'élevage ils sont déjà intégralement restitués au sol, directement ou après compostage, i.e. l'assiette maximale technique est déjà atteinte. L'épandage des produits résiduels organiques issus des activités urbaines et industrielles n'a pas été considéré car il représente des quantités faibles au plan national et donc à priori un potentiel de stockage de C additionnel national très faible.

Les estimations reportées ici sont assorties de grandes incertitudes, dont l'origine et l'ampleur varient selon les actions concernées. Les incertitudes portant sur le potentiel d'atténuation unitaire sont généralement élevées du fait de la forte variabilité des processus impliqués dans le stockage de carbone, de la diversité des sols dont la nature affecte l'intensité des processus en jeu, ou encore du fait de l'absence d'un nombre suffisant de références dans la littérature pour certaines pratiques. Pour certaines actions, l'incertitude sur l'assiette et la cinétique d'adoption est également forte (agroforesterie, là encore). Ce travail a ainsi mis en relief des besoins de connaissances, qui relèvent d'une part du faible nombre d'études portant sur certaines pratiques, telles que l'agroforesterie, et d'autre part de la prise en compte insuffisante de la diversité des pratiques possibles, diversité des espèces en culture intermédiaire par exemple et ainsi que de la variabilité pédologique, laquelle affecte fortement le stockage de carbone.

Références bibliographiques

Angers D.A., Eriksen-Hamel N.S., 2008. Full-inversion tillage and organic carbon distribution in soil

profiles: a meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal* 72, 1370-1374.

Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. (Eds.), 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? INRA Editions, Paris, 332 pp.

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.

CITEPA, 2011. Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques et du protocole de Kyoto, Citepa, Paris, 206 p.

Dimassi B., Cohan J.P., Labreuche J., Mary B., 2013. Changes in soil carbon and nitrogen following tillage conversion in a long-term experiment in Northern France. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 169, 12-20.

Eagle A., Olander L., 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. Companion Report to Assessing Greenhouse Gas Mitigation Opportunities and Implementation Strategies for Agricultural Land Management in the United States, Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions Report.

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.

Justes E., Beaudouin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Durr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J., Souchère V., Tournebize J., Savini I., Rechauchère O., 2012. Réduire les fuites de nitrates au moyen de cultures intermédiaires, Etude INRA, France.

Kumar B.M., Nair P.K.R., 2011. Sequestration potential of agroforestry systems: opportunities and challenges. *Advances in Agroforestry* 8, Dordrecht, Springer Science, 326 p.

Luo Z.K., Wang E.L., Sun O.J., 2010. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agriculture Ecosystems & Environment* 139, 224-231.

Martin M.P., Wattenbach M., Smith P., Meersmans J., Jolivet C., Boulonne L., Arrouays D., 2011. Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France. *Biogeosciences* 8, 1053-1065.

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.-P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.-H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2014. Quels leviers techniques pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole ? *Innovations Agronomiques* 37, 1-10

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 92p.

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2014. Quels leviers techniques pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole ? *Innovations Agronomiques* n° 37, à paraître.

Peltre C., Christensen B.T., Dragon S., Icard C., Kätterer T., Houot S., 2012. RothC simulation of carbon accumulation in soil after repeated application of widely different organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry* 52, 49-60.

Soussana J.F., Loiseau P., Vuichard N., Ceschia E., Balesdent J., Chevallier T., Arrouays D., 2004. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management* 20, 219-230.

van Kessel C., Venterea R., Six J., Adviento-Borbe M.A., Linquist B., van Groenigen K.J., 2012.

Climate, duration, and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis. *Global Change Biology* 19, 33-44.

Viaud V., Angers D.A., Parnaudeau V., Morvan T., Menasseri-Aubry S., 2011. Response of organic matter to reduced tillage and animal manure in a temperate loamy soil. *Soil Use and Management* 27, 84-93.

Virto I., Barré P., Burlot A., Chenu C., 2012. Carbon input differences as the main factor explaining the variability in soil organic C storage in no-tilled compared to inversion tilled agrosystems. *Biogeochemistry* 108, 17-26

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, 201-207.