

Le stockage de carbone par les prairies

Une voie d'atténuation de l'impact de l'élevage herbivore sur l'effet de serre

La contribution de l'agriculture aux émissions de gaz à effet de serre (GES) est discutée. Il est donc nécessaire de préciser son importance, en veillant bien à la relier à la finalité principale de l'agriculture qui consiste à couvrir les besoins alimentaires et nutritionnels des populations humaines. L'agriculture est une source significative d'émissions de GES. Mais en contrepartie, elle détient d'indéniables atouts pour les réduire, à la fois par la baisse de ses émissions gazeuses et par sa capacité à séquestrer le carbone dans les sols, notamment *via* les prairies.

L'objet de cette brochure est de préciser le potentiel de l'élevage herbivore français pour entretenir et accroître la séquestration de carbone par les prairies et les haies. Il s'agit *in fine* de repositionner la contribution de ce secteur d'activité au changement climatique, sur la base de son impact réel sur l'effet de serre.

Agriculture et changement climatique : la prise en compte du stockage de carbone se généralise

De nombreux pays sont engagés dans des protocoles et conventions internationales : Protocole de Kyoto, Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique. Malgré l'issue mitigée des négociations de Copenhague en 2009, des objectifs de réduction des GES sont affirmés et des actions sont envisagées pour y parvenir au niveau européen (Paquet Climat-Energie de l'Union Européenne) et au niveau français (Facteur 4 et Grenelle de l'Environnement). Une comptabilisation fine des émissions et des capacités de réduction par secteur devient alors nécessaire pour décliner les mesures à entreprendre.

Au début des années 2000, des études de grande ampleur ont été menées pour évaluer l'état des sols et de leurs stocks de matière organique, que ce soit à l'échelon national¹ ou à l'échelon international² (globalement, 1 500 milliards de tonnes de carbone dans le premier mètre de sol au niveau mondial³).

Ces travaux font également état de la **diminution des stocks de carbone dans la plupart des systèmes agricoles** à travers le monde depuis une cinquantaine d'années. Cette dynamique est principalement causée par les changements d'affectation des terres (déforestation, mise en culture des prairies), l'intensification du travail du sol, la réduction des apports de matières organiques et l'érosion des sols agricoles.

Au niveau mondial, le rôle de l'agriculture et de l'élevage dans la lutte contre le changement climatique est désormais largement reconnu par la FAO⁴. Il est admis que les sols représentent le puits de carbone, naturel et à long terme (50-100 ans) le plus important sur les surfaces continentales. Le stockage de carbone par les prairies constitue donc une voie prometteuse pour contrebalancer les émissions de GES. L'élevage herbivore a ainsi un rôle majeur à jouer dans l'atténuation du changement climatique.

Ces résultats plaident pour **raisonner en termes de bilan**, en considérant à la fois les sources de gaz à effet de serre et leur compensation *via* les puits de carbone.

¹ Arrouays et al., 2002
² FAO, 2002

³ IPCC, 2007
⁴ FAO, 2009

QUELQUES REPÈRES SUR L'EFFET DE SERRE ET LA CONTRIBUTION DE L'AGRICULTURE

L'effet de serre est un phénomène naturel qui empêche une partie des rayons infrarouges provenant de la Terre de traverser l'atmosphère pour s'échapper vers l'espace. Bénéfique lorsqu'il maintient à la surface de la Terre une température moyenne de 14 °C, il devient facteur de déséquilibres lorsqu'il s'accroît fortement.

Les activités agricoles génèrent principalement trois gaz à effet de serre : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O). À la différence des autres secteurs d'activité dont la contribution aux émissions de gaz à effet de serre intervient surtout du fait de l'utilisation de carbone d'origine fossile (combustion d'énergies fossiles), le secteur agricole se caractérise par la modification des formes de l'azote (en N₂O) et de carbone d'origine organique (en méthane et biomasse dans le sol).

Tableau 1 : Potentiel de Réchauffement Global (PRG) des différents gaz à effet de serre (à 100 ans)

Gaz à effet de serre	PRG
CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	298

Source : IPCC, 2007

La contribution à l'effet de serre des différents gaz est variable et s'exprime par leur potentiel de réchauffement global (PRG), qui correspond à la puissance radiative qu'ils renvoient vers le sol, cumulé sur une durée définie, ici de 100 ans. Le PRG se mesure relativement au CO₂ et l'impact sur l'effet de serre de chacun des gaz s'exprime en quantité d'équivalent CO₂ (eq. CO₂) (Tableau 1).

En France, l'agriculture contribue pour environ 20 % au pouvoir de réchauffement global national (Tableau 2).

Tableau 2 : Émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole en 2008

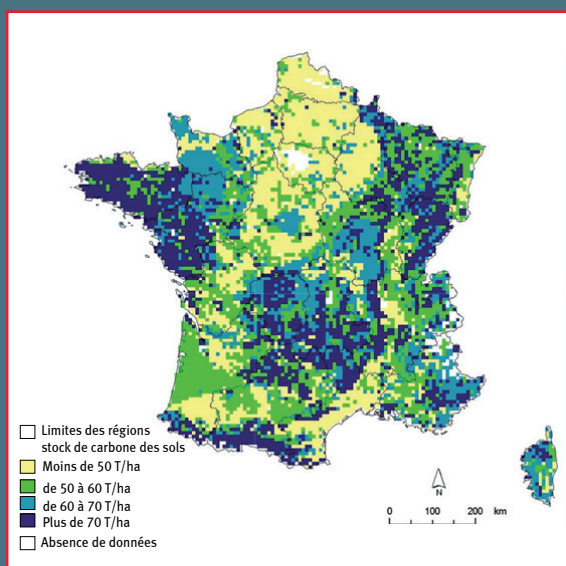
Gaz à effet de serre et sources	Émissions (Mt eq. CO ₂)
CH ₄ entérique	28,7
CH ₄ déjections	14,3
CH₄ total	43,1
N ₂ O lié aux déjections	6,1
N ₂ O lié aux engrais organiques et minéraux	49,5
N₂O total	55,5
CO₂ lié à la consommation d'énergie	10,4
TOTAL Mt eq. CO₂	109,0
Part de l'agriculture dans le total national (%)	20,5

Source : Citepa, 2010

DES STOCKS DE CARBONE ORGANIQUE IMPORTANTS DANS LES RÉGIONS D'ÉLEVAGE HERBIVORE

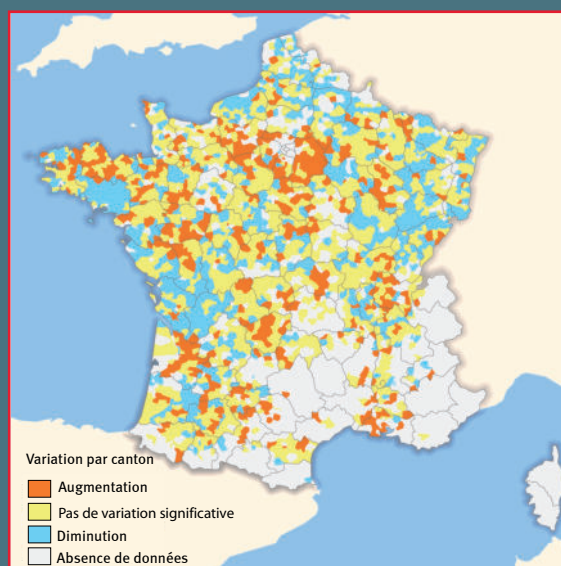
Les régions d'élevage conservent des stocks de matière organique nettement plus importants (Carte 1). Elles bénéficient de l'effet combiné des prairies, des apports de fumier et d'un moindre recours au labour. En effet, les prairies, au même titre que les forêts, constituent des réservoirs de carbone importants, puisqu'elles peuvent stocker 70 t C/ha sur l'horizon 0-30 cm, alors que les terres arables ne comptent que 43 t C/ha.

Les sols agricoles sont en perte de matière organique, qui constitue un réservoir temporaire de carbone organique. Cette perte est estimée à 6 millions de tonnes de carbone par an (soit près de 0,2 % par an) entre les périodes 1990-1995 et 1999-2004. Elle touche principalement les sols qui disposaient des teneurs initiales les plus fortes (Carte 2). Ceci s'explique à la fois par une évolution globale des écosystèmes, une conversion des surfaces en prairies vers des cultures annuelles et une modification des pratiques agricoles (approfondissement du travail du sol, chaulage...).



Carte 1 : Estimation des stocks de carbone organique dans la partie superficielle des sols (0-30 cm) en t/ha

Source : INRA, 2001, in Antoni et Arrouays, 2007



Carte 2 : Variation de la teneur en carbone organique entre les périodes 1990-1995 et 1999-2004 par canton

Source : GIS Sol - BDAT, 2007, in Antoni et Arrouays, 2007

Le phénomène de stockage de carbone par les sols en agriculture

Le cycle du carbone : distinguer cycle court et cycle long

Le carbone (C) suit un cycle, c'est-à-dire que, schématiquement, il n'y a pas de création de nouvel atome de carbone, mais des passages par différentes molécules, dans différentes sphères, appelées réservoirs. Les trois grands réservoirs soumis à des mouvements à une échelle de temps humaine (environ 100 ans) sont l'atmosphère, les océans et la biosphère (plantes et animaux continentaux). À ce carbone qui circule relativement rapidement, il faut ajouter de grandes quantités de carbone sous forme de sédiments, de roches et de combustibles, situé sous terre ou au fond des océans (lithosphère). Ce carbone-ci, au contraire, est plutôt inerte : naturellement, les stocks mettent plus de 200 millions d'années à se constituer (par sédimentation ou enfouissement du carbone de surface) et à se dégrader (par altération des roches et *via* le volcanisme).

Il existe donc deux cycles du carbone en interaction étroite, mais répondant à des échelles de temps très différentes : un **cycle court**, qui implique le vivant, les océans de surface et les sols, et un **cycle long** dans lequel interviennent l'océan profond, les roches et sédiments, les volcans et les combustibles fossiles (Figure 1).

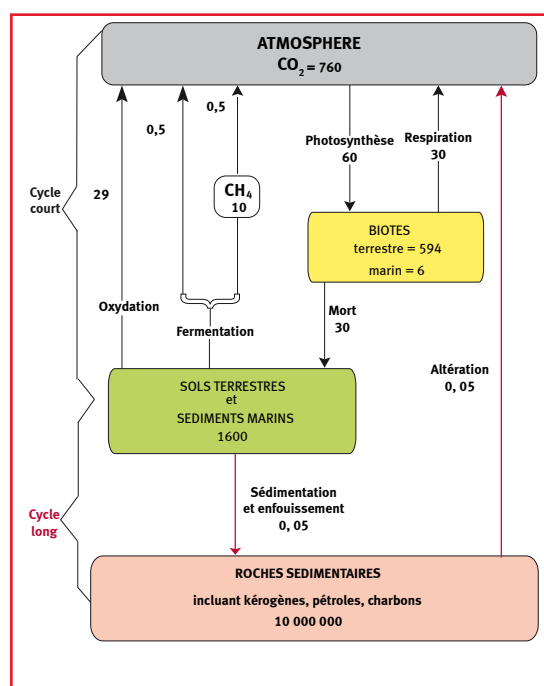


Figure 1 : Représentation du cycle global du carbone (valeurs exprimées en Gt de carbone)

Source : Kump et al., 1999

Dans les réservoirs de carbone à renouvellement rapide, les organismes vivants d'un écosystème tiennent un rôle central. Les échanges avec l'atmosphère se font sous forme de gaz carbonique (CO_2) dans les deux sens : alors que les fermentations (dégradation de matière organique), la respiration des bactéries, des animaux et des végétaux dégagent du CO_2 , la photosynthèse des végétaux chlorophylliens fixe le carbone pour leur croissance (création de matière organique ou biomasse). La photosynthèse consiste ainsi à transformer le carbone atmosphérique en tissus végétaux, à condition que les plantes soient correctement alimentées en azote et éléments minéraux.

LES DIFFÉRENTES FORMES D'ÉCHANGES DE CARBONE ENTRE L'ATMOSPHÈRE ET LA BIOSPHÈRE (PLANTES ET ANIMAUX)

• Photosynthèse

$6 \text{ H}_2\text{O} + 6 \text{ CO}_2 + \text{énergie solaire} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2$
eau + dioxyde de carbone + énergie solaire → glucose + dioxygène gazeux

• Respiration cellulaire

$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2 \rightarrow 6 \text{ H}_2\text{O} + 6 \text{ CO}_2 + \text{énergie}$
glucose + dioxygène gazeux → eau + dioxyde de carbone + énergie

• Fermentation

$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow 6 \text{ CO}_2 + \text{énergie} + \text{déchets}$
glucose → dioxyde de carbone + énergie + déchets variés (méthane, éthanol, etc.)

Le fonctionnement du cycle du carbone résulte d'un équilibre entre les flux entrants et sortants, qu'il s'agisse de flux de carbone organique lié à des matières solides ou de carbone minéral lié à des molécules gazeuses. Les flux de carbone à l'échelle planétaire résultent des activités naturelles et des activités humaines, dites anthropiques, contribuant ainsi au cycle global du carbone (Figure 2).

Sur les continents, certains écosystèmes tels que les prairies et forêts, mais aussi les tourbières et certains sols, captent plus de carbone qu'ils n'en restituent : ils jouent ainsi un rôle plus ou moins important de stockage de carbone (puits de carbone).

Concernant les échanges avec l'hydrosphère (rivières, lacs, océans), le carbone est surtout stocké sous forme de carbonate et de biomasse planctonique. Du fait de la forte solubilité du CO_2 dans l'eau, et de l'importance du volume des océans, la capacité de stockage des couches supérieures des océans (jusqu'à 100 m) est impressionnante : jusqu'à 63 fois plus élevée que celle de l'atmosphère.

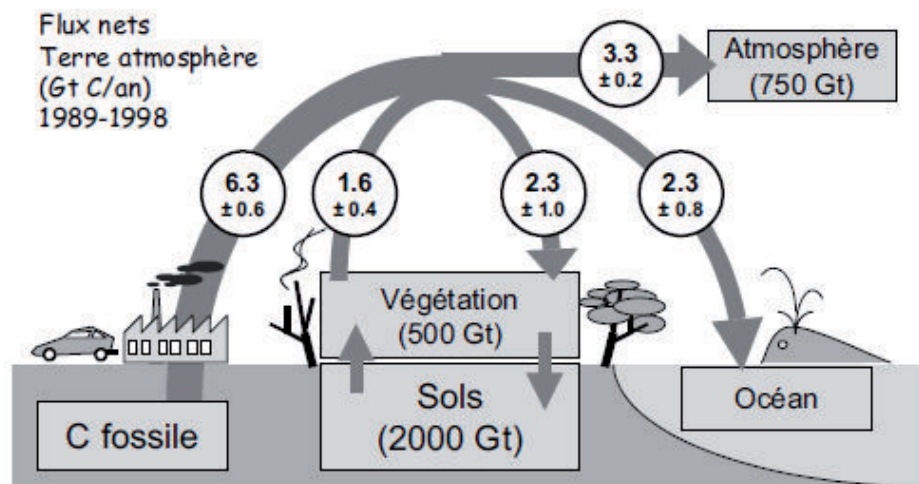


Figure 2 : Cycle global du carbone. Les échanges entre les réservoirs et les bilans sont exprimés en milliards de tonnes (ou giga tonnes) de carbone par an.

Source : Arrouays et al., 2002

Les échanges de carbone au niveau des sols : entre émissions et stockage

Depuis quelques décennies, nous assistons à un réchauffement climatique anormalement rapide et brutal. Les connaissances actuelles permettent de l'imputer en grande partie au rejet de GES, dont deux contiennent un atome de carbone : le dioxyde de carbone (CO_2) et le méthane (CH_4). Afin de comprendre et surtout de prévoir le rôle des activités humaines dans le changement climatique actuel et à venir, le flux de ces deux composés dans l'atmosphère doit être quantifié. La combustion des ressources en énergie fossile (charbon, pétrole et gaz naturel), à laquelle il faut rajouter la déforestation et les pratiques agricoles trop intensives (labour profond, fertilisation supérieure aux besoins des plantes...), concourent à la perte de stocks de carbone et injectent actuellement dans l'atmosphère environ 7,9 Gt C⁵ par an sous forme de CO_2 (Figure 2). L'océan superficiel, la végétation et les sols absorbent une partie du CO_2 émis (à hauteur de 4,6 Gt C/an). Le solde positif entre le CO_2 émis et le CO_2 absorbé contribue à l'enrichissement atmosphérique en CO_2 à raison de 3,3 Gt C/an.

Chaque année, la quantité de carbone fixé sous forme organique par la photosynthèse (et égale à 2,3 Gt) est supérieure de 0,7 Gt C au flux de carbone rejeté sous forme gazeuse par la respiration et la fermentation (dioxyde de carbone, méthane) (égal à 1,6 Gt) (Figure 2).

Certains compartiments de l'écosystème, en particulier les sols, retiennent plus de carbone qu'ils n'en restituent, contribuant ainsi au **stockage de carbone**, via le retour au sol de la biomasse aérienne et racinaire, et l'apport de matières organiques exogènes. Le taux de stockage de carbone par les sols est plus ou moins important et la conservation des stocks résultants plus ou moins longue. Une fois séquestré, le carbone peut résider dans le sol de quelques heures à plusieurs milliers d'années (carbone profond⁶). Son temps de résidence et/ou sa perte dépendent non seulement de sa position dans les horizons du sol mais aussi des facteurs environnementaux (température, travail du sol, décomposabilité des apports végétaux, feux, déforestation, déficit en eau et nutriments, etc.).

Un déstockage de carbone (déforestation, retournement de prairies, utilisation des combustibles fossiles) conduit à une libération massive de CO_2 et contribue à l'augmentation de l'effet de serre. Les puits de carbone terrestres constituent donc un enjeu pour la stabilité et la protection du climat. **Les voies de limitation de l'effet de serre concernent ainsi l'augmentation des stocks de carbone dans les sols mais aussi, et avant tout, la protection des puits de carbone terrestres existants que sont les forêts primaires ou anciennes, les écosystèmes prairiaux et les tourbières.**

Les sols agricoles : un potentiel important de puits de carbone

Les principaux puits de carbone terrestres sont les forêts et les prairies. Néanmoins, le stockage pérenne dans le sol représentant seulement moins de 10 % du carbone fixé par la photosynthèse, il correspond donc à un phénomène en marge du flux majeur constitué par le couple photosynthèse/respiration. Les stocks importants dans

⁵ 7,9 Gt = 6,3 Gt provenant de la combustion des énergies fossiles du fait des activités humaines + 1,6 Gt dues à la déforestation et aux pratiques agricoles trop intensives.

⁶ Fontaine et al., 2007

Tableau 3 : Stock de carbone dans le sol par hectare, sur l'horizon 0-30 cm, en fonction du type d'occupation du sol

Type de couvert	Stock de carbone (t C/ha)
Terre arable	43
Prairie	70
Forêt mélangée	70
Pelouse d'altitude	93

Source : Arrouays et al., 2002

les sols prairiaux et forestiers (Tableau 3) s'expliquent par un flux de carbone entrant plus important (davantage de racines et débris, couvert permanent et plus dense au niveau du sol), une décomposition plus lente de la matière organique du sol en l'absence de labour et d'aération du sol et enfin, une dégradation plus faible des racines riches en lignines.

Sur prairies, le retour au sol des déjections animales, seules ou avec litière, ainsi que l'apport de composts, contribuent également à l'accroissement des stocks de matières organiques. Ces restitutions s'ajoutent aux apports de carbone par les résidus d'herbe et les débris racinaires.

Concernant les surfaces en grandes cultures, la restitution des résidus de culture, l'implantation d'engrais verts, la diminution du travail du sol ainsi que l'épandage de déchets organiques contribuent à alimenter les stocks de carbone des sols.

Enfin, il ne faut pas négliger le stockage du carbone dans le sol sous les haies et les bosquets, très fréquemment présents dans les fermes d'élevage d'herbivores. Leur surface peut représenter entre 10 et 15 % de la SAU de ces exploitations.

Stockage et déstockage du carbone des sols : des dynamiques bien différentes

En fonction des caractéristiques du sol (teneur en matière organique initiale, teneurs en argile et en calcaire, etc.), de son activité biologique et des événements qui l'affectent (fertilisation, labour, etc.), le carbone peut être stocké, par rétention sous forme organique, ou déstocké sous forme de CO₂, par libération dans l'atmosphère de carbone minéral. Le sol est donc tout à la fois un puits ou une source de carbone.

Le stockage du carbone est non linéaire. Rapide durant les 30 à 40 premières années, il ralentit ensuite (Figure 3). Il dépend en effet de la cinétique de décomposition de la matière organique par la communauté microbienne du sol, et tend à terme

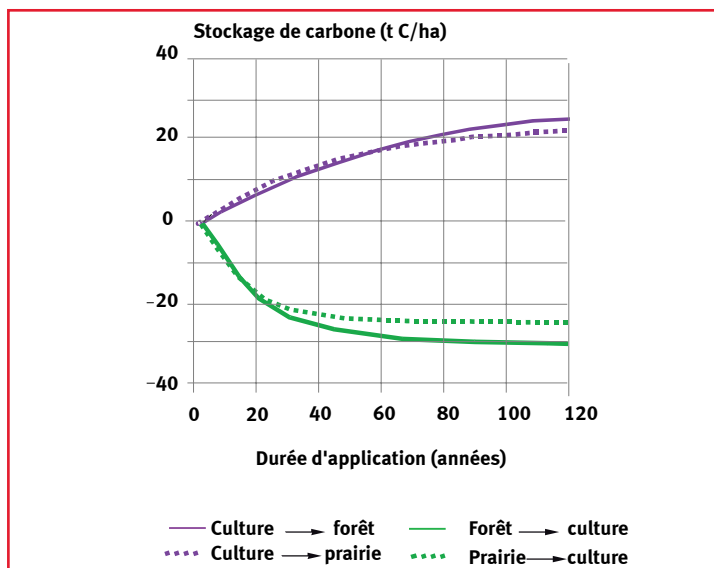


Figure 3 : Évolutions du stock de carbone dans le sol associées aux pratiques provoquant des stockages ou déstockages de carbone. Incertitude : +/- 40 %

Source : Arrouays et al., 2002

vers un équilibre où les entrées et les sorties se compensent. Cependant, il ne semble pas y avoir de limite temporelle au stockage du carbone, des prairies très anciennes pouvant continuer à stocker du carbone sur de très longues périodes⁷.

Par ailleurs, la **conversion** d'une prairie (ou d'une forêt) en culture, du simple fait du travail du sol, engendre un déstockage de carbone deux fois plus rapide et deux fois plus important durant les 20 premières années que le stockage induit par la conversion inverse (Figure 3). En effet, ces conversions engendrent des conditions qui conduisent à une perte du carbone stocké par le sol, libéré dans l'atmosphère sous forme de CO₂ (aération du sol, accroissement de la minéralisation, etc.).

Au final, deux voies sont identifiées pour limiter les pertes de carbone par les sols et favoriser leur capacité à compenser l'effet de serre :

- maintenir les stocks de carbone actuels par la conservation des surfaces en prairie permanente existantes et éviter leur retournement ;
- favoriser l'accroissement annuel des stocks de carbone, tout en tenant compte des caractères réversibles et vulnérables de ce processus.



Photo 1 : Les prairies sont des puits de carbone. En effet, la quantité de carbone absorbée est supérieure à la quantité émise durant la phase de croissance de la prairie.

⁷Système d'Observation et d'Expérimentation, sur le long terme, pour la Recherche et l'Environnement (SOERE) « Agro-écosystèmes Cycles Biogéochimiques et Biodiversité (ACBB) »
- Site de Laqueuille, UREP-Inra Clermont-Ferrand

Les facteurs d'influence du stockage de carbone dans les sols

La dynamique de stockage du carbone dans les sols est un phénomène complexe qui est influencé par plusieurs paramètres environnementaux ou en lien avec les pratiques agricoles.

› Les changements climatiques : des effets antagonistes

Les conditions et aléas climatiques (température et pluviosité) jouent un rôle dans la dynamique du carbone des sols. L'augmentation historique de la concentration en CO₂ atmosphérique accroît actuellement la capacité des couverts végétaux à fixer le carbone atmosphérique pour le convertir en biomasse par photosynthèse. En prairies, dans l'hypothèse où d'autres facteurs limitants (disponibilité en azote ou en eau) n'interviennent pas, cela peut se traduire par une augmentation des stocks de carbone dans la biomasse aérienne et racinaire et par une restitution importante au sol, donc par un **accroissement potentiel du stockage de carbone du sol**⁸.

Cependant, le changement climatique engendre également des événements extrêmes : périodes de sécheresse ou de fortes précipitations. Ainsi, à l'échelle de l'Europe, la canicule de 2003 a réduit de 500 millions de tonnes, comparativement aux résultats enregistrés en 2002, le stockage net de carbone dans les écosystèmes, ce qui équivaut à trois années d'émission de GES par un pays comme la France. Ceci s'explique par la diminution de la dissolution du CO₂ dans les océans rendus plus chauds, l'augmentation de la dégradation de la matière organique des tourbières provoquant un rejet de CO₂ et de méthane, et par l'accélération de la décomposition de la litière... Cependant, des résultats antérieurs ont montré qu'un simple réchauffement de 3 °C n'affectait pas significativement le stockage annuel de C⁹.

Il apparaît donc nécessaire de s'interroger sur la **vulnérabilité des stocks de carbone des sols prairiaux face au changement climatique**. De nombreux experts craignent un phénomène d'emballement des changements climatiques par l'effet combiné de sécheresses répétées et du réchauffement du climat qui serait responsable d'une accélération de la minéralisation de la matière organique stockée.

› Le changement d'usage des terres : les prairies permanentes à l'honneur

Le changement d'usage des terres (conversion d'un bois, d'une prairie ou d'une culture) s'accompagne

de modifications des caractéristiques physico-chimiques du milieu, du mode et du régime d'incorporation des entrées organiques et de la nature de la matière organique du sol. Les niveaux de stockage et déstockage qu'engendrent ces changements sont présentés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Estimation des impacts de changement d'usage des terres sur le stockage de carbone dans les sols

Conversion de terres	Flux additionnel annuel moyen en t C/ha/an (scénario à 20 ans)	Équivalences en CO ₂ émis ou capté (t eq. CO ₂ /ha/an) ¹⁰
	Stockage de carbone	Captage de CO ₂
Culture - > Prairie Permanente	0,49 ± 0,26	0,84 à 2,75
Culture - > Boisement	0,44 ± 0,24	0,73 à 2,49
Prairie permanente - > Boisement	inférieur à + 0,1 ± 0,2	- 0,1 à 0,3
	Déstockage de carbone	Émissions de CO ₂
Prairie permanente - > Culture	-0,95 ± 0,3	2,4 à 4,6
Bois - > Culture	-0,75	2,75
Bois - > Prairie permanente	-0,1 ± 0,1	0 à 0,7

Source : Arrouays et al., 2002.

› Les modalités de gestion des prairies : viser la pérennité du couvert, un apport d'azote raisonné et un pâturage optimal

La dynamique d'évolution du carbone dans le sol dépend des **pratiques de gestion des prairies** qui peuvent avoir un effet sur les conditions physico-chimiques du milieu et de la protection physique des matières organiques du sol (Tableau 5) :

- l'augmentation de la durée de la rotation impliquant des prairies temporaires ou la conversion de prairies temporaires en prairies permanentes augmente le stockage de carbone ;
- l'apport modéré d'azote organique accroît la séquestration du carbone (engrais, déjections) ; *a contrario*, une carence en azote peut provoquer un déstockage de carbone. Les microbes du sol puisent dans les réserves de l'humus du sol, lorsque le ratio C/N est faible, d'où un déstockage de carbone. Néanmoins, cette situation est très peu fréquente car le trèfle blanc s'installe progressivement dans une prairie ;
- la nature du couvert végétal influence la capacité d'un agrosystème à séquestrer du carbone : la présence de légumineuses permet une autorégulation en azote et donc le maintien du stock de carbone de l'humus (pas de carence)¹¹ ;
- le pâturage permet un meilleur stockage du carbone que la fauche *via* un apport direct de matière organique par les déjections et moins d'exportation de carbone du fait de l'herbe résiduelle¹². Inversement, la fauche exclusive et fréquente de la prairie peut conduire à des niveaux de prélèvement trop forts (exportations de carbone importantes et répétées) ;

⁸ Soussana et Lüscher, 2007

⁹ Loizeau et Soussana, 1999

¹⁰ CO₂ + 44/12 C, le poids en encadré d'une molécule CO₂ représente 1/3,66 du poids total de la molécule.

¹¹ Shahzad et Fontaine, à paraître

¹² Soussana et al., 2010

Tableau 5 : Estimation des impacts d'un changement de pratiques sur le stockage de carbone dans les sols prairiaux

Pratiques mises en place sur prairies	Flux de stockage additionnel annuel moyen/ha (scénario à 20 ans)
Augmentation de la durée des prairies temporaires et intensification raisonnée	0,1 à 0,5 ± 0,25 t C/ha/an
Conversion de prairies temporaires en prairies permanentes	+ 0,3 à 0,4 ± 0,25 t C/ha/an
Intensification modérée des prairies permanentes pauvres (fertilisation)	+ 0,2 ± 0,25 t C/ha/an

Source : Arrouays et al., 2002.

Prairie temporaire : prairie renouvelée depuis moins de 6 ans (en rotation avec des cultures)

Prairie permanente : prairie naturelle ou semée depuis plus de 6 ans (destinée à rester en place)

- l'intensité du pâturage joue également sur les niveaux de stockage, en lien avec l'herbe résiduelle. Les pâturages très ras laissent moins d'organes aériens, sources de litière puis de carbone, et le surpâturage peut engendrer une dégradation du couvert végétal. Inversement, les pâturages plus laxistes laissent davantage d'organes sénescents. Mais, il reste à établir le meilleur compromis entre performances animales et stockage de carbone par les prairies.

Au niveau des cultures, les principaux facteurs de variation sont les suivants :

- une diminution du travail du sol, voire un passage au non-travail, limite le phénomène de déstockage de carbone (l'effet bénéfique du passage au non-labour est toutefois réversible) ;

- la restitution au sol des résidus de la culture ou l'épandage de déchets organiques, de même que l'implantation de cultures intermédiaires (avec non-exportation des résidus pour éviter le sol nu) accroissent les apports de matières organiques.

À partir de l'expertise collective de l'INRA, des indications sur le flux de stockage additionnel annuel par hectare, en fonction des pratiques mises en place sur les prairies, peuvent être données (Tableau 5).

Pour les grandes cultures, la mise en œuvre des pratiques visant à limiter le travail du sol et enrichir le sol en matière organique sont également à préconiser pour conserver et accroître les stocks de carbone du sol. On rappellera également que la transition du non-labour au labour est à éviter, car le déstockage est deux fois plus rapide que le stockage¹⁴.

La quantification du stockage de carbone en systèmes prairiaux

De récents projets européens confirment le rôle de la prairie comme puits de carbone

Plusieurs travaux sur le stockage de carbone sous prairies ont été menés à grande échelle dans le cadre des projets européens GreenGrass¹⁵ et son successeur CarboEurope¹⁶.

Dans le cadre de ces projets, deux synthèses, réalisées à partir des résultats de 28 sites de prairies appartenant à un réseau européen, montrent que la productivité primaire brute (GPP) des prairies est comparable à celle des forêts en Europe, et que les prairies constituent des puits nets pour le CO₂ atmosphérique, stockant **de 500 à 1 200 kg C/ha/an** selon les modalités de gestion (chargement animal, mode d'utilisation, fertilisation). **Les niveaux de stockage net de carbone se situent en moyenne autour de 1 000 kg C/ha/an.**

Exprimée en équivalent CO₂, la **quantité de carbone stockée par la prairie permettrait globalement de compenser la quantité de méthane émise par les animaux valorisant cette même prairie.**

Les résultats sont convergents quelle que soit la méthode d'estimation : bilan des flux de GES (mesures sur sites à l'aide d'appareils sophistiqués) ou analyses de la matière organique du sol¹⁷. Malgré la variabilité des niveaux de stockage entre sites et l'incertitude sur les valeurs mesurées, ces résultats tendent donc à montrer que les niveaux de stockage sous prairie en Europe du Nord peuvent être de grande ampleur et confirment leur rôle de puits de carbone.



Photo 2 : Le stockage de carbone par les prairies permet de compenser le méthane émis sur ces mêmes prairies.

¹³ Le sol nu est plus vulnérable aux activités microbiennes et au lessivage

¹⁴ Arrouays et al., 2002

¹⁵ Soussana et al., 2007

¹⁶ Schulze et al., 2009

¹⁷ Soussana et al., 2010

Quelles valeurs retenir ?

Dans l'attente de travaux supplémentaires (Carboextrême, GHG-europe, Animal Change) pour préciser ces niveaux de stockage et réduire leur incertitude, des coefficients sont proposés pour les systèmes herbivores (Tableau 6). Ces valeurs sont basées sur les estimations de flux nets annuels de carbone pour différents types d'occupation des sols. Elles ont été reprises dans la méthodologie GES'TIM¹⁸ pour l'estimation de l'impact des activités agricoles sur l'effet de serre.

Ces niveaux de stockage proposés sont volontairement prudents et minimalistes au regard des dernières références publiées et citées précédemment. Ils constituent certainement une valeur moyenne au regard de la variabilité des situations (plaine, montagne, âge de la prairie, etc.) et des niveaux d'incertitude associés. Les évolutions méthodologiques et l'avancement des connaissances permettront à terme d'affiner ces coefficients et de les préciser selon les contextes. Dans cette attente, l'utilisation de ces valeurs permet dans l'immédiat de considérer l'intérêt du stockage de carbone par les prairies et le rôle majeur de l'agriculture dans la compensation des émissions de GES et l'atténuation du changement climatique.

Tableau 6 : Valeurs de flux nets annuels de stockage de carbone additionnel dans le sol, en fonction du mode d'occupation (par hectare, sur l'horizon 0-30 cm, scénario à 20 ans)

Type de couvert	Facteur moyen de stockage/déstockage
Prairie de moins de 30 ans	+ 500 kg C/ha/an
Prairie de plus de 30 ans	+ 200 kg C/ha/an
Parcours	+ 250 kg C/ha/an*
Retournement de prairie	- 1 000 kg C/ha/an
Culture	0 kg C/ha/an
Haies**	+ 125 kg C/100 m linéaires de haie
	+ 100 kg C/ha/an***

Source : GES'TIM, 2010

* Communication personnelle

** Haie : structure linéaire boisée caractérisée par une largeur inférieure à 15 m et une longueur supérieure à 25 m

*** À défaut de connaître le linéaire de haies, on applique un stockage moyen à l'ha de SAU, considérant 100 m linéaire/ha

FLUX DE CARBONE À L'ÉCHELLE D'UNE PRAIRIE

Dans les systèmes prairiaux, une partie du CO₂ fixé par les plantes est restituée à l'atmosphère par la respiration des animaux, après consommation des fourrages. Une petite partie est perdue sous forme de méthane, alors qu'une dernière partie retourne au sol, par l'intermédiaire des fèces (directement au pâturage ou sous forme de fumier et lisier). Ce retour au sol *via* les déjections animales s'ajoute aux apports de carbone par les litières, les résidus d'herbe et les racines. La différence entre ces apports et la respiration au niveau du sol constitue le stockage net de carbone au niveau d'un sol (Figure 4). Le flux total de carbone au niveau d'une prairie est donc très important, de l'ordre de 20 tonnes de carbone par hectare et par an. Le flux de carbone dû à l'émission de méthane est faible (de l'ordre de 0,2 t de carbone par ha et par an soit 1 % du flux total de carbone). Le carbone séquestré au niveau du sol est de l'ordre de 0,5 tonne de carbone par hectare, soit 2,5 % du flux total, et représente 1,83 tonnes de CO₂.

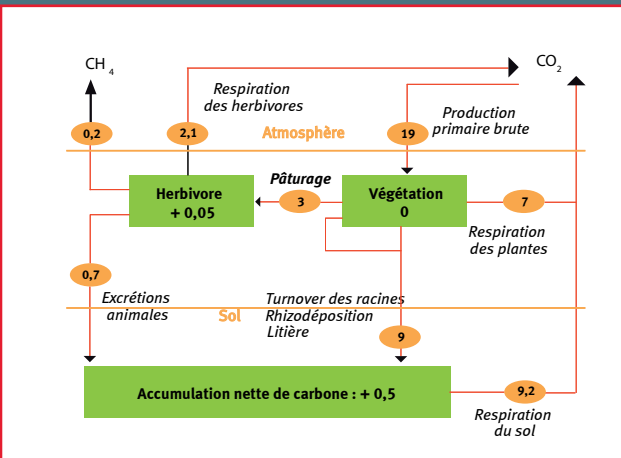
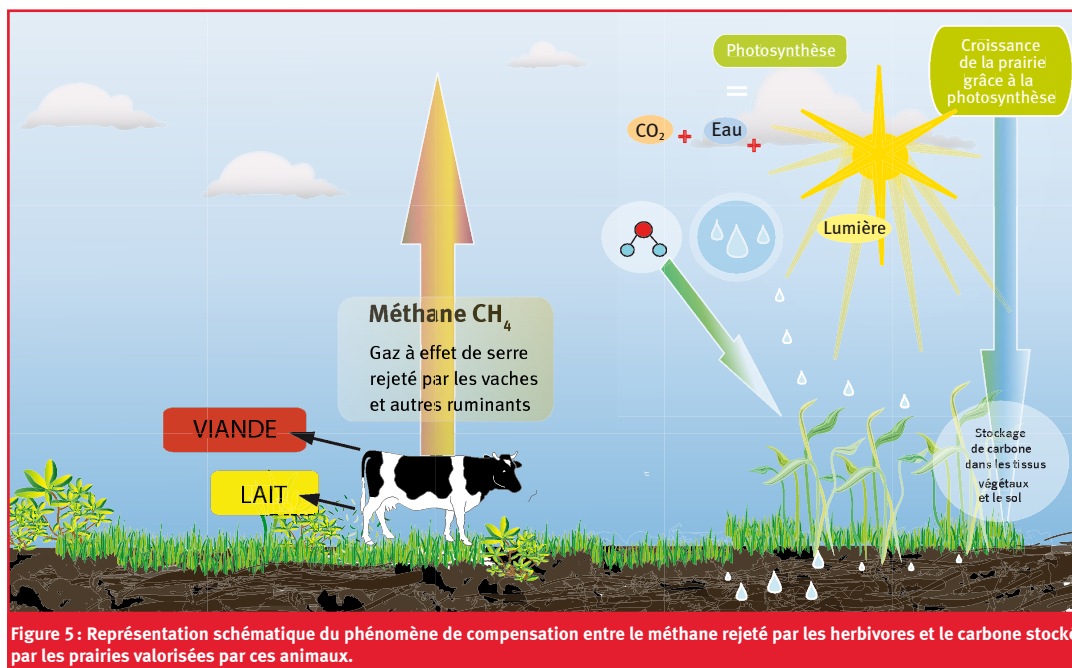


Figure 4 : Flux de carbone d'une prairie pâturée, en t C/ha/an

Source : Soussana et al., 2004

¹⁸ Gac et al., 2010



Le bilan effet de serre des élevages herbivores en France

Le bilan « effet de serre » de l'élevage herbivore considère d'une part les émissions de GES liées à l'activité d'élevage (méthane, protoxyde d'azote, dioxyde de carbone) et d'autre part le stockage de carbone par les sols. La balance carbone nette ainsi obtenue renseigne sur la contribution effective des exploitations d'élevage à l'effet de serre. La comptabilisation des émissions utilise le potentiel de réchauffement global (PRG) des différents gaz proposé par le GIEC.

La méthode GES'TIM élaborée par les instituts techniques¹⁹, permet l'estimation de l'impact sur l'effet de serre d'une exploitation ou d'un produit agricole au portail de l'exploitation, par une approche de type « analyse de cycle de vie » (ACV). Le périmètre considéré intègre les postes d'émission et les flux de matières qui ont lieu en direct sur le site de l'exploitation mais également en amont de celle-ci (intrants de l'élevage et des cultures). La méthode effectue le bilan de l'ensemble des émissions et du stockage de carbone par les sols (prairies, haies) selon les hypothèses retenues précédemment (Tableau 6) afin d'établir à la fois une empreinte carbone brute et une empreinte carbone nette.

Une quantification de l'impact environnemental « contribution au changement climatique » sur les systèmes spécialisés de production de lait et de viande a été conduite à l'Institut de l'Élevage²⁰ sur un large échantillon d'exploitations issues de la base de données des Réseaux d'Élevage²¹ (196 exploitations laitières et 350 exploitations allaitantes).

En élevage laitier, l'évaluation met en évidence des différences d'empreintes brutes peu marquées entre les systèmes (Figure 6 A). Les écarts se creusent lorsque l'on considère l'empreinte carbone nette (Figure 6 B) qui intègre la prise en compte du stockage de carbone par les prairies. Les systèmes les plus herbagers affichent ainsi des empreintes nettes inférieures, en lien avec la potentialité de leurs surfaces à stocker du carbone. Selon la part d'herbe dans le système, les systèmes laitiers étudiés affichent des empreintes carbone nettes comprises entre 0,8 à 1,1 kg éq. CO_2 .

Ainsi, le stockage de carbone sous les prairies et les haies permet une compensation comprise entre 5 et 30 % des émissions de GES des systèmes laitiers spécialisés, soit entre 10 et 70 % des émissions de méthane entérique.

Les niveaux de compensation constatés pour les élevages laitiers s'expliquent par le fait que les vaches ingèrent d'autres aliments (maïs fourrage, céréales) issus de terres arables qui ne stockent pas autant de carbone que les prairies.

¹⁹ Gac et al., 2010

²⁰ Gac et al., à paraître

²¹ Réseaux d'élevage : dispositif partenarial associant des éleveurs volontaires, les chambres d'Agriculture et l'Institut de l'Élevage.

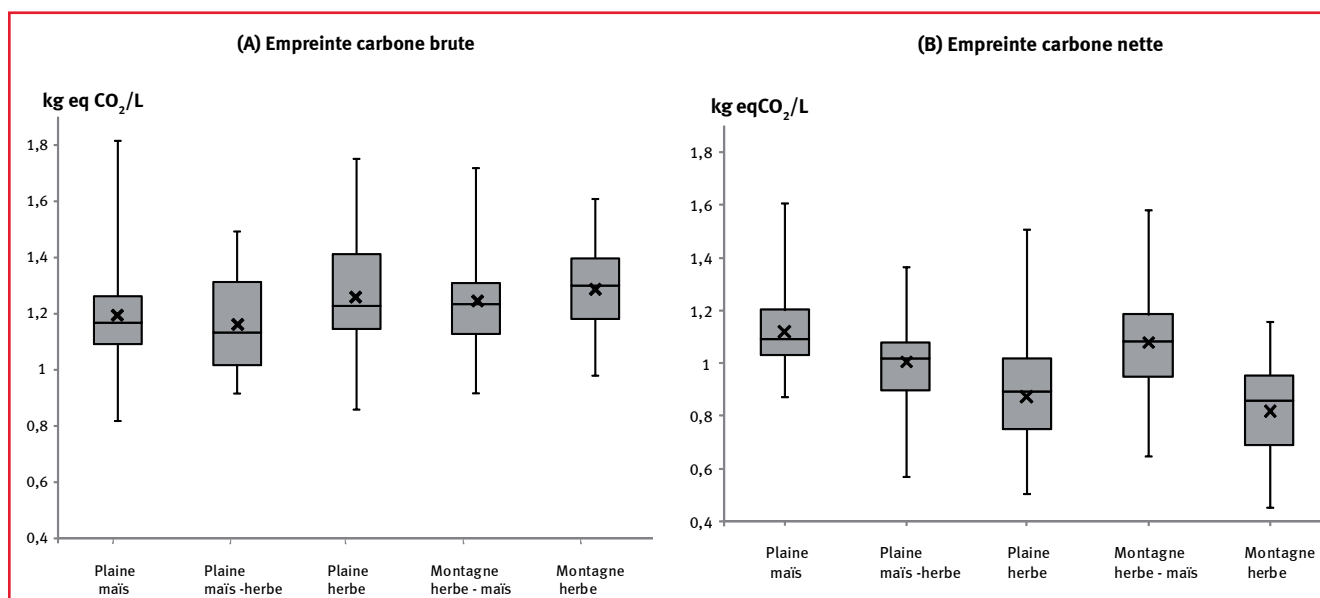


Figure 6 : Variabilité inter et intra-système des empreintes carbone brutes (A) et nettes (B) de systèmes laitiers spécialisés en France (en kg eq. CO₂/L de lait).
 Pour chaque classe typologique, les impacts sont représentés sous forme de box plot (ou boîte à moustaches). La moitié de la population se situe entre le 1^{er} et le 3^e quartile (dans la partie grisée). L'autre moitié de la population se situe au-dessus et en dessous de chaque quartile. Le trait noir représente la médiane (distribution équitable des valeurs de part et d'autre) et la croix représente la moyenne.

Source : Réseaux d'Élevage, 2008 - Traitements Institut de l'Élevage

En élevage allaitant, la prise en compte du stockage de carbone sous les prairies conjuguée à une plus faible intensification du système (durée d'engraissement et présence en bâtiment plus courtes, part de prairie plus élevée, moins d'intrants, rencontrée dans les systèmes herbagers, se traduit par une empreinte carbone nette plus faible comparative-ment aux autres systèmes (Figure 7).

Les empreintes carbone nettes des systèmes allaitants s'établissent entre 870 et 1 470 kg eq. CO₂ pour 100 kg de viande vive. **Dans ces systèmes,**

selon la part d'herbe, le stockage de carbone sous les prairies et les haies permet une compensation comprise entre 25 et 50 % des émissions de GES, soit de 60 à plus de 100 % des émissions de méthane entérique en systèmes allaitant.

Naturellement, ces valeurs pourraient être modifiées si les hypothèses de stockage de carbone par les prairies étaient modulées. Les résultats, en élevages laitiers et allaitants, montrent aussi une grande variabilité intra-système, qui laisse présager des marges de progrès dans tous les systèmes.

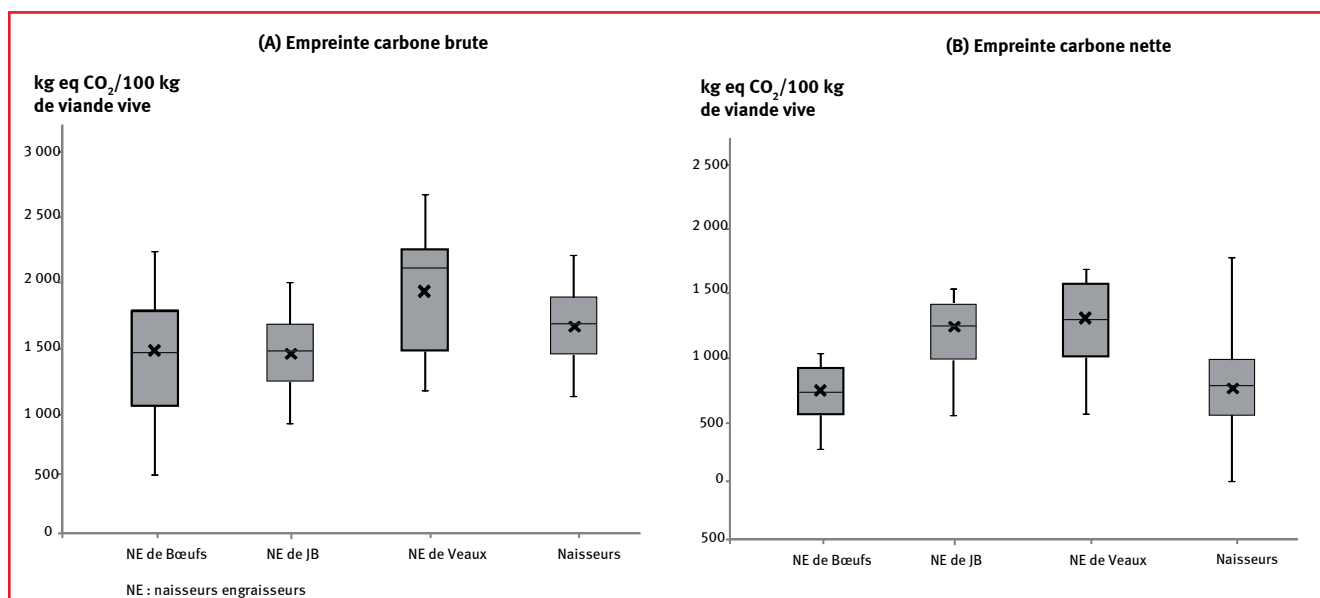


Figure 7 : Variabilité inter et intra-système des empreintes carbone brutes (A) et nettes (B) de systèmes allaitants spécialisés en France (en kg eq. CO₂/100 kg de viande vive).
 Pour chaque classe typologique, les impacts sont représentés sous forme de box plot (ou boîte à moustaches). La moitié de la population se situe entre le 1^{er} et le 3^e quartile (dans la partie grisée). L'autre moitié de la population se situe au-dessus et en dessous de chaque quartile. Le trait noir représente la médiane (distribution équitable des valeurs de part et d'autre) et la croix représente la moyenne.

Source : Réseaux d'Élevage, 2008 - Traitements Institut de l'Élevage

Pour en savoir plus...

Antoni V. et Arrouays D., 2007. Le stock de carbone dans les sols agricoles diminue. 4 pages. IFEN. N° 121.

Arrouays D., Balesdent J., Germon J.-C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P., 2002 : Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Rapport d'expertise collective, réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. Paris. 334 pages.

CITEPA, 2010. Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. CORALIE format CCNUCC. CITEPA, Paris.

FAO, 2002. Rapport sur les ressources en sols du monde, La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres. Rome. 59 pages.

FAO, 2009. Review of evidence on drylands pastoral systems and climate change. Implications and opportunities for mitigation and adaptation. Rome. 50 pages.

Fontaine S., Barot S., Barré P., Bdioui N., Mary B., Rumpel C., 2007. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 450, 277-281.

Gac A., Deltour L., Cariolle M., Dollé J.-B., Espagnol S., Flénet F., Guingand N., Lagadec S., Le Gall A., Lellahi A., Malaval C., Ponchant P., Tailleur A., 2010. GES'TIM, Guide méthodologique pour l'estimation des impacts des activités agricoles sur l'effet de serre. Version 1.2. 156 p. Institut de l'Élevage, Paris.

Gac A., Manneville V., Raison C., Charroin T., Ferrand M., 2010. L'empreinte carbone des élevages d'herbivores : présentation de la méthodologie d'évaluation appliquée à des élevages spécialisés lait et viande. 3R.

IPCC, 2007. Climate Change 2007 : Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Kump L., Kasting J.F., Crane R.G., 1999. The Earth System. Prentice Hall, 368 p.

Loiseau P., Soussana J.F., 1999. Elevated [CO₂], temperature increase and N supply effects on the turnover of below-ground carbon in a temperate grassland ecosystem. *Plant and Soil*, 212, 123-134.

Schulze E.D., Luyssaert S., Ciais P., Freibauer A., Janssens I.A., Soussana J.F., Smith P., Grace J., Levin I., Thiruchittampalam B., Heimann M., Dolman A.J., Valentini R., Bousquet P., Peylin P., Peters W., Rodenbeck C., Etiope G., Vuichard N., Wattenbach M., Nabuurs G.J., Poussi Z., Nieschulze J., Gash J.H., 2009. Importance of methane and nitrous oxide for Europe's terrestrial greenhouse-gas balance. *Nature Geoscience*, 2, 842-850.

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.

Soussana J.F., Allard V., Pilegaard K., Ambus P., Amman C., Campbell C., Ceschia E., Clifton-Brown J., Czobel S., Domingues R., Flechard C., Fuhrer J., Hensen A., Horvath L., Jones M., Kasper G., Martin C., Nagy Z., Neftel A., Raschi A., Baronti S., Rees R.M., Skiba U., Stefani P., Manca G., Sutton M., Tuba Z., Valentini R., 2007. Full accounting of the greenhouse gas (CO₂, N₂O, CH₄) budget of nine European grassland sites. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121, 121-134.

Soussana J.F., Lüscher A., 2007. Temperate grasslands and global atmospheric change : a review. *Grass and Forage Science*, 62 (2), 127-134.

Soussana J.F., Tallec T., Blanfort V., 2010. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal*, 4: 334-350.

Conclusion

Etre capable d'évaluer la contribution réelle à l'effet de serre des activités d'élevage est un enjeu majeur pour l'ensemble des filières qui en dépendent. Compte tenu des enjeux tant environnementaux qu'économiques ou sociétaux (maintien d'activité sur les territoires), il est fondamental de pouvoir fournir des estimations chiffrées fiables. Les études menées à ce jour permettent notamment de préciser le rôle des prairies dans le stockage de carbone.

Les premiers résultats présentés montrent tout l'intérêt d'un raisonnement global, seul à même de repositionner ce secteur sur la base de sa contribution réelle à l'effet de serre (raisonner par bilan). Ils permettent également de chiffrer la capacité de l'élevage herbivore à entretenir voire accroître la séquestration de carbone qui atténue l'effet de serre.

Enfin, de manière complémentaire, il apparaît que plusieurs leviers d'action disponibles en élevage pour réduire les émissions de GES peuvent être activés : alimentation, évolution des systèmes fourragers, productivité par vache, gestion des déjections, fertilisation, consommation d'énergie directe...

Par ailleurs, les systèmes prairiaux ont d'autres intérêts environnementaux au-delà du stockage de carbone. Ils contribuent également à rendre d'autres services écosystémiques tels que la régulation des cycles d'eau et la contribution à la préservation de la biodiversité et des paysages. Plus globalement, les thématiques environnementales étant interconnectées (émissions gazeuses, qualité de l'eau, biodiversité, etc.), elles doivent désormais être abordées de manière globale à l'échelle des systèmes de production. Ces questions doivent également être raisonnées au regard de l'ensemble des piliers de la durabilité : économie, écologie et social. Les systèmes basés sur la prairie sont souvent vertueux sur ces points.



Photo 3 : L'élevage herbivore permet de maintenir des prairies, puits de carbone.

Collection : L'Essentiel

Rédaction :

Armelle Gac, Jean-Baptiste Dollé et André Le Gall (Institut de l'Élevage, UMT RIEL), Kadja Klumpp et Thiphaine Tallec (UREP - INRA UR 874), Jérôme Mousset, Thomas Eglin et Antonio Bispo (ADEME - Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie), Jean-Louis Peyraud et Philippe Faverdin (UMR PL - INRA, UMT RIEL).

Crédit photos : Institut de l'Élevage

Conception : Bêta Pictoris - **Mise en page :** Marie-Thérèse Gomez

Édité par :

Institut de l'Élevage, - 149, rue de Bercy - 75 595 Paris CEDEX 12 - www.inst-elevage.asso.fr

Dépôt légal :

3e trimestre 2010 - © Tous droits réservés à l'Institut de l'Élevage

Novembre 2010 - Réf : 001033026/ISBN : 978-2-84148-994-7