



Influences de l'élevage et de la production de viande de ruminants sur le climat





Influences de l'élevage et de la production de viande de ruminants sur le climat

Centre d'Information des Viandes
Tour Mattei
207, rue de Bercy
75012 PARIS

Mise en page:
Jean-Baptiste Capelle
jeanbaptiste.capelle@gmail.com

Publication : novembre 2015



AVANT-PROPOS

L'influence des activités humaines sur le climat est aujourd'hui une préoccupation majeure de la plupart des acteurs économiques et politiques, et des citoyens. Nécessaire dans un monde de plus en plus urbain et artificialisé, cette prise de conscience se heurte cependant à la complexité des analyses à mener pour rendre compte de ces interactions. Cette complexité concerne tout particulièrement l'élevage de ruminants et sa production de viande, qui représentent une des principales sources d'émissions anthropiques de méthane, gaz à effet de serre (GES) réglementé par le Protocole de Kyoto. Mais, même si certains systèmes très intensifs peuvent conduire à parler d'industrie, l'élevage ne peut en aucune façon être ramené à une industrie de matière inerte. Or c'est bien pour ces dernières que sont conçues la plupart des méthodes de calcul d'émissions de GES. L'élevage, au contraire, traite du vivant. Il repose sur de la biologie et mobilise ses différents cycles. Qu'on se place au niveau de l'élevage stricto sensu ou de la filière viande dans son ensemble, c'est donc en termes de bilan qu'il faut raisonner.

L'intérêt de ce Cahier est de proposer les éléments nécessaires pour comprendre sur de solides bases scientifiques l'influence de l'élevage et de la production de viande de ruminants sur le climat. Premier Cahier produit par le CIV sur ce domaine de l'environnement, il s'inscrit dans la logique de la collection qui vise à faciliter la connaissance et la compréhension des sujets de société liés aux filières élevage et viande et s'appuie à cet effet sur les publications, rapports et articles scientifiques émanant d'institutions internationales, d'organismes de recherche et d'instituts techniques reconnus.

Dans sa première partie, ce Cahier rappelle les éléments de base de la contribution au changement climatique : nature des gaz impliqués, identification des sources d'émissions et panorama des émissions mondiales, européennes et françaises. La deuxième partie expose les leviers identifiés pour réduire les émissions sur l'élevage. La troisième partie décrit l'autre influence climatique de l'élevage, mettant en jeu les prairies qui participent à l'alimentation des ruminants et qui stockent du carbone dans leurs sols.

Par le biais de ce nouveau Cahier, le CIV espère contribuer utilement à une juste appréciation du bilan de l'impact de l'élevage de ruminants sur le climat.

Le CIV tient à remercier tout particulièrement les relecteurs externes de ce Cahier pour leur disponibilité : Jean-Baptiste DOLLE, chef du service environnement-bâtiment à l'Idèle (Institut de l'élevage) ; Michel DOREAU, directeur de recherche à l'Inra UMR1213 Herbivores ; Jean GUERRIER, chef de projet sur la sélection des bovins allaitants à l'Idèle ; Katja KLUMPP, ingénieur de recherche Inra à l'UREP (unité de recherche sur l'écosystème prairial) ; Élise LORINQUER, chef de projet émissions gazeuses à l'Idèle et Étienne MATHIAS, chargé des projets agriculture au Citepa (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique). Le CIV remercie aussi Anne MOTTET, chargée des politiques d'élevage à la FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture), pour ses explications sur les méthodes utilisées par son institution dans l'évaluation des GES de l'élevage et ses filières.

Pierre-Michel ROSNER
Directeur du CIV



Influences de l'élevage et de la production de viande de ruminants sur le climat



SOMMAIRE

1^{re} partie: Les émissions de gaz à effet de serre de l'élevage et de la production de viande de ruminants	8	3^e partie: Le stockage de carbone par les prairies et ses leviers d'amélioration	30
1. Les gaz à effet de serre émis par l'élevage de ruminants.....	8	1. De la photosynthèse au stockage de carbone.....	30
1.1. Le dioxyde de carbone.....	8	1.1. Synthèse de matière organique par les végétaux.....	30
1.2. Le méthane.....	8	1.2. Accumulation et dégradation de carbone organique dans les sols.....	30
1.3. Le protoxyde d'azote.....	10	2. Durée de stockage du carbone organique dans les sols.....	31
1.4. Contribution du méthane et du protoxyde d'azote aux émissions globales.....	11	2.1. Stockage et déstockage, des flux simultanés à des vitesses différentes.....	31
1.5. Part des émissions liées à l'élevage de ruminants pour chaque gaz à effet de serre.....	11	2.2. La durée de stockage augmente en lien avec la profondeur.....	31
2. Les émissions de gaz à effet de serre de l'élevage et de la production de viande bovine et ovine.....	12	2.3. L'argile protège le carbone de la dégradation.....	32
2.1. Évaluer les émissions: par inventaire pour un secteur et par ACV pour un produit.....	12	3. Les leviers d'amélioration du stockage de carbone par les prairies.....	33
2.2. Les émissions mondiales.....	13	3.1. Conserver les stocks existants.....	33
2.3. Les émissions européennes.....	15	3.2. Augmenter les restitutions de carbone au sol.....	35
2.4. Les émissions françaises.....	15	3.3. Peu d'influence du labour.....	38
2^e partie: Les leviers de réduction des gaz à effet de serre	18	Conclusion	39
1. Émissions et efficacité des systèmes d'élevage de ruminants français.....	18	Bibliographie.....	40
1.1. État des lieux des émissions sur l'exploitation d'élevage.....	18	Glossaire.....	47
1.2. Améliorer l'efficacité du système de production.....	19	Acronymes.....	49
2. Leviers techniques spécifiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre.....	21	Liens utiles.....	50
2.1. Agir sur l'alimentation des animaux.....	21		
2.2. Les déjections: une gestion globale.....	23		
2.3. Le pâturage, une étape clef.....	26		



Influences de l'élevage et de la production de viande de ruminants sur le climat



1^{RE} PARTIE



LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE DE L'ÉLEVAGE ET DE LA PRODUCTION DE VIANDE DE RUMINANTS

1. Les gaz à effet de serre émis par l'élevage de ruminants

L'élevage de ruminants (bovins, ovins, caprins) exerce une influence sur le climat à travers l'émission de gaz à effet de serre (GES) qui, en augmentant leurs concentrations atmosphériques, participent au réchauffement climatique. Trois GES sont émis dans le cadre des activités liées à l'élevage de ruminants, et plus largement en agriculture : le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O).

1.1. LE DIOXYDE DE CARBONE

Le dioxyde de carbone est le plus important gaz à effet de serre réglementé par le Protocole de Kyoto (1997). En tant que principal GES d'origine humaine, son potentiel de réchauffement global (PRG) sert de référence et est donc fixé à 1. Le dioxyde de carbone découle principalement de la combustion d'énergie fossile ou de biomasse (cf. Encadré n° 1). En élevage, les sources d'émissions sont la fabrication et le transport des intrants (engrais, aliments du bétail,

semences, produits phytosanitaires), ainsi que la consommation d'énergie directe sur l'exploitation (fioul, électricité, gaz).

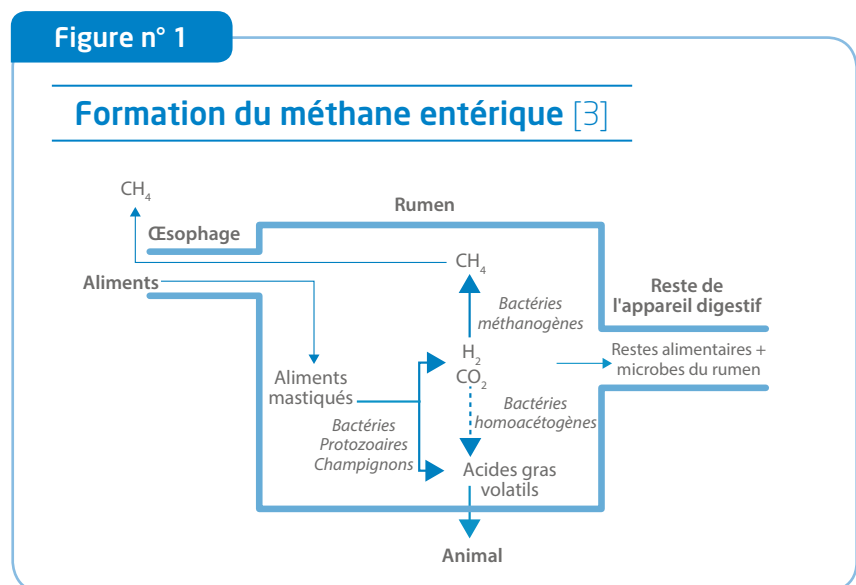
1.2. LE MÉTHANE

Le méthane est le deuxième plus important GES réglementé par le Protocole de Kyoto à contribuer au réchauffement de la planète après le dioxyde de carbone. Son PRG est de 25 fois celui du CO_2 . Les sources terrestres de méthane proviennent

principalement des fuites de combustibles fossiles, des fermentations anaérobies dans les sols inondés de milieux naturels (marais, tourbières, étangs) ou cultivés (rizières), des décharges, ainsi que d'animaux comme les termites et les ruminants (domestiques et sauvages), des cultures sur brûlis et des fermentations provenant des déjections des animaux [1]¹ (cf. Encadré n° 2).

En élevage de ruminants, le méthane peut avoir deux origines :

Figure n° 1



1. Les nombres entre crochets correspondent aux références bibliographiques listées p 40 et suivantes.



■ **Le méthane entérique** se forme dans le rumen, quand l'hydrogène libéré par des micro-organismes fermentaires est utilisé par d'autres micro-organismes, les *Archaea* méthanogènes, dans la réduction du dioxyde de carbone [2]. Ce processus intestinal est indispensable aux herbivores, spé-

cialisés dans la digestion de la cellulose des végétaux, pour la transformer en nutriment (cf. Figure n° 1). Le gaz est ensuite rejeté dans l'atmosphère, essentiellement par voie orale (95 %) au cours d'éruclatations régulières ou par les poumons, après passage dans le sang.

■ **Le méthane peut aussi avoir une origine non entérique**, il se forme alors de la dégradation anaérobie de la matière organique contenue dans les déjections animales.

Le méthane issu de l'élevage de ruminants provient pour deux tiers de la

Encadré n° 1

LE CYCLE DU CARBONE

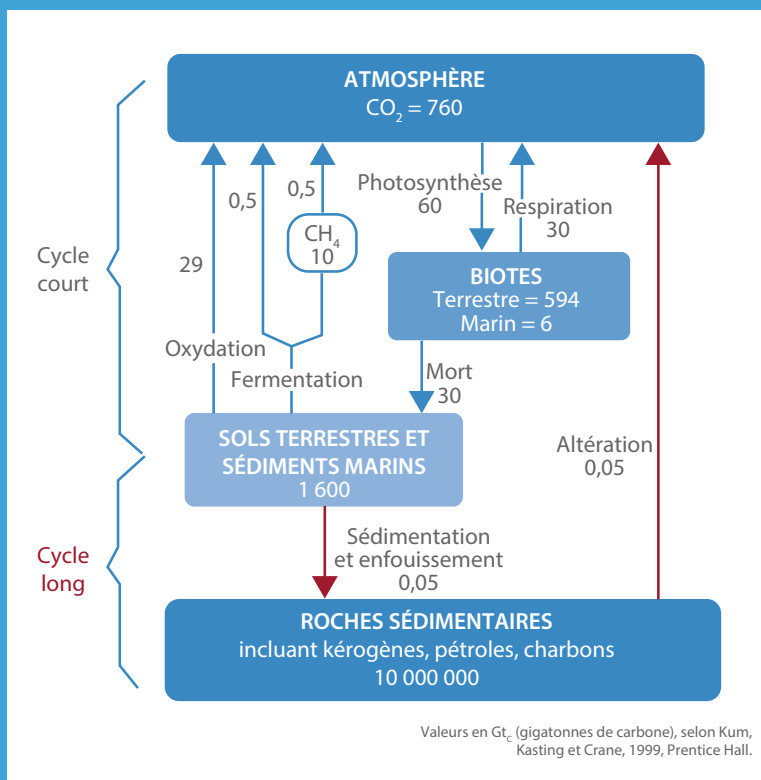
Le carbone est présent dans l'atmosphère, dans la biosphère, dans les océans et dans les sédiments et roches de la lithosphère. Entre ces quatre réservoirs, le carbone transite sous forme de molécules: CO₂, CH₄, CaCO₃... L'ensemble de ces échanges constitue le cycle global du carbone, qui se divise en deux sous-cycles: un cycle court et un cycle long.

Le cycle court du carbone se déroule sur un pas de temps inférieur au siècle. Il concerne les échanges entre l'atmosphère, la biosphère et les océans, qui s'effectuent par l'intermédiaire de processus essentiellement biologiques: photosynthèse, respiration et fermentation.

Le cycle long du carbone s'étale sur plusieurs millions d'années et concerne le remplissage des roches et sédiments de la lithosphère. Les processus en jeu sont d'ordre géologique: dépôt et enfouissement de matière organique, transformation en combustibles fossiles et altération (par oxygénation). L'extraction et la combustion des énergies fossiles transforment une partie de ce cycle long en cycle court: du carbone qui se trouve dans un réservoir stable (le charbon, le pétrole et le gaz naturel) va être libéré dans un réservoir à échange rapide, l'atmosphère. Ce sont donc de nouveaux atomes de

carbone qui viennent participer au cycle court et, ainsi, le perturbent.

Sources: Département de géologie et de génie géologique de l'Université de Laval, Québec (http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html); cycleducarbonate.ipsl.jussieu.fr.





Encadré n° 2

LES DIFFÉRENTES SOURCES DE MÉTHANE [4]

Trois processus principaux expliquent la production de méthane sur la planète.

■ Le plus important est la **fermentation anaérobie** qui conduit à une formation biogénique du méthane. Cette fermentation est assurée par des micro-organismes méthanogènes de la famille des *Archaea*. Elle se produit aussi bien dans le monde végétal (zones humides), dans le monde animal (ruminants essentiellement) que dans le monde des Hommes (décharges, déchets agricoles, eaux usées), dans des proportions respectives de 50, 30 et 20 %.

■ Le second processus découle d'une **combustion incomplète de la biomasse**, c'est la source pyrogénique du méthane.

■ Enfin, le troisième processus est lié à la **formation des combustibles fossiles** (charbon, pétrole, gaz naturel) au cours des ères géologiques passées. Ce méthane, dit thermogénique, peut aussi être d'origine anthropique, par exemple dans le cas de l'exploitation des mines de charbon ou du gaz naturel.

Les flux de méthane issus de sources naturelles* sont estimés à 238 Mt/an et à 336 Mt/an pour les sources anthropiques**.

*Zones humides, termites, océans, hydrates, sources géologiques, animaux sauvages, feux naturels.

**Mines de charbon, gaz, pétrole, industries, décharges, ruminants, riziculture.

fermentation entérique et pour un tiers des déjections animales.

1.3. LE PROTOXYDE D'AZOTE

Le protoxyde d'azote est le troisième plus important gaz à effet de serre réglementé par le Protocole de Kyoto. Son PRG est 298 fois celui du CO₂. Les émissions de protoxyde d'azote résultent en grande partie de la transformation des produits azotés sur les terres agricoles: engrais, fumier, lisier, résidus de récolte. Le solde des émissions provient du trafic routier (particulièrement les pots catalytiques) et de quelques procédés industriels. Il existe deux voies de production de protoxyde d'azote liées à la mise en cultures des sols (cf. Figure n° 2). La première se déroule directement après l'apport de matière azotée dans le sol: dès l'azote incorporé, une partie s'échappe dans l'atmosphère

Figure n° 2

Schéma du cycle de l'azote agricole (adapté de [7])

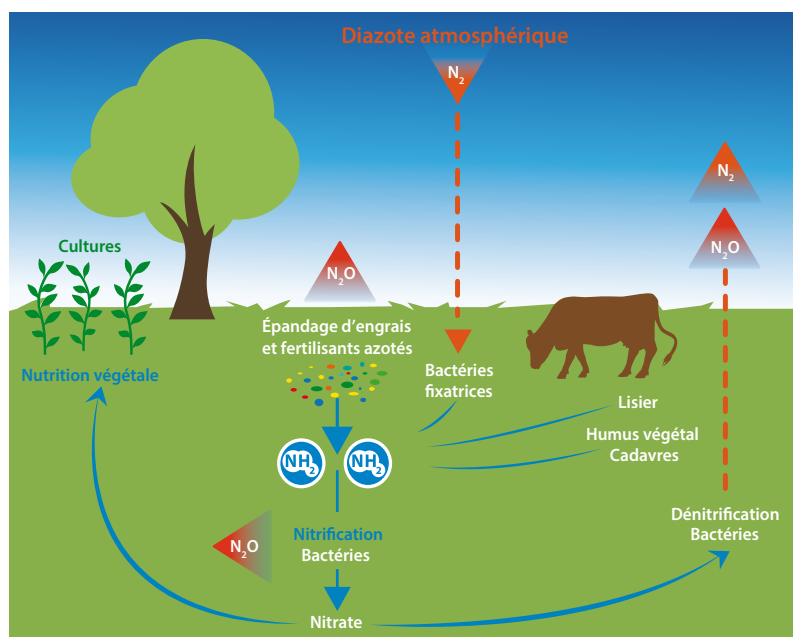
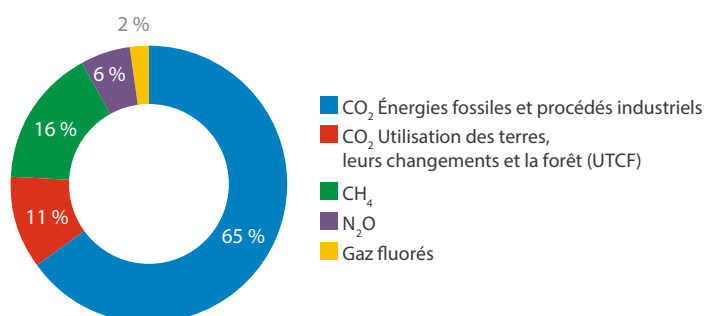




Figure n° 3

Contribution des différents gaz à effet de serre aux émissions globales en 2010 [8]



les cultures contribue en outre aux émissions de N₂O [6].

1.4. CONTRIBUTION DU MÉTHANE ET DU PROTOXYDE D'AZOTE AUX ÉMISSIONS GLOBALES

La Figure n° 3 illustre la contribution des différents GES aux émissions globales pour l'année 2010 : le méthane et le protoxyde d'azote participent à hauteur de 22 % des émissions mondiales, la plus grosse part étant constituée de CO₂ émis par l'utilisation d'énergies fossiles et par les procédés industriels (65 %).

sous forme de gaz N₂O. La seconde voie met en jeu plusieurs bactéries spécifiques du sol qui dégradent puis transforment les substances azotées en nitrate (NO₃⁻), diazote (N₂) et protoxyde d'azote. Les processus chimiques en jeu sont la nitrification (oxydation de l'ammonium en nitrate) et la dénitrification (réduction des nitrates en azote diatomique). Le protoxyde d'azote a aussi une origine agro-industrielle :

la production d'engrais nécessite de brûler de l'acide nitrique, ce qui provoque des émissions de protoxyde d'azote et d'oxyde nitreux.

En élevage de ruminants, les émissions de protoxyde d'azote sont liées à la gestion des déjections animales, majoritairement lors de l'épandage et du pâturage des animaux [5]. L'utilisation d'engrais minéraux riches en azote pour fertiliser les prairies et/ou

1.5. PART DES ÉMISSIONS LIÉES À L'ÉLEVAGE DE RUMINANTS POUR CHAQUE GAZ À EFFET DE SERRE

Les contributions de l'élevage de ruminants aux émissions de dioxyde de carbone, de méthane et de protoxyde d'azote à l'échelle du monde, de l'Europe et de la France sont déclinées sur la Figure n° 4.

Figure n° 4

Part des émissions liées à l'élevage de ruminants dans les émissions globales de méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O) et dioxyde de carbone (CO₂)



Sources : FAOSTAT pour valeurs monde (données 2010), EEA pour valeurs Europe (données 2010) et Citepa pour valeurs France (données 2013).



Le méthane et le protoxyde d'azote sont des GES intimement liés à l'activité agricole et d'élevage. Alors que le méthane est plutôt un gaz issu de l'élevage (ruminants), le protoxyde d'azote provient de la mise en culture des sols et est donc principalement associé aux productions végétales : en France en 2013, 100 % du méthane agricole sont issus de l'élevage et 91 % du protoxyde d'azote agricole proviennent des cultures [9].

L'élevage de ruminants émet donc principalement du méthane, subsidiairement du protoxyde d'azote et un peu de dioxyde de carbone. Afin d'évaluer la pression totale qu'exerce l'ensemble des gaz à effet de serre sur l'atmosphère, et ainsi estimer la contribution de l'élevage au changement climatique, les émissions sont ramenées à la même unité de référence, le CO₂ équivalent (CO₂e).

2. Les émissions de gaz à effet de serre de l'élevage et de la production de viande bovine et ovine

Cette deuxième partie présente une synthèse actualisée des données disponibles sur les émissions de GES liées à l'activité d'élevage, dont les ruminants, et à la production de viande bovine et ovine dans le monde, en Europe et en France.

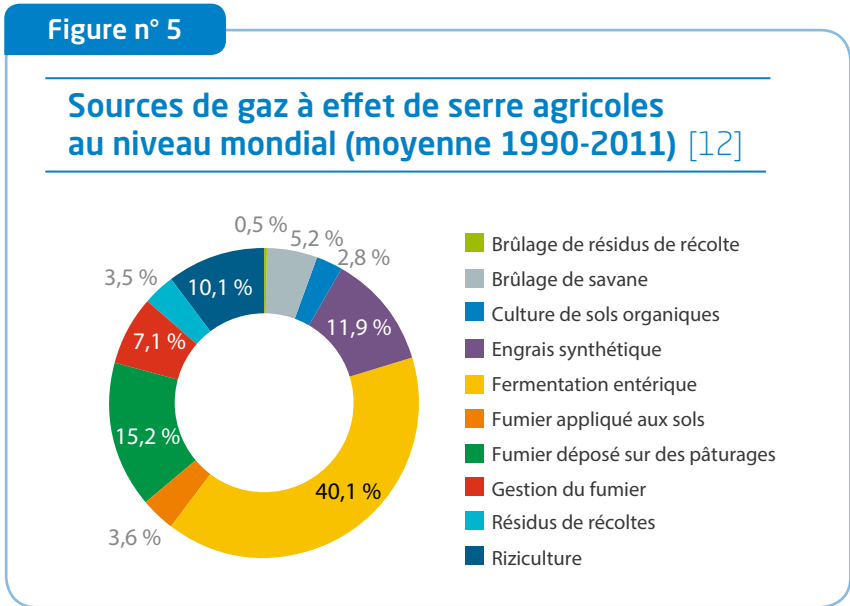
2.1. ÉVALUER LES ÉMISSIONS : PAR INVENTAIRE POUR UN SECTEUR D'ACTIVITÉ ET PAR ACV POUR UN PRODUIT

L'évaluation des émissions de GES peut se faire selon deux approches :

Encadré n° 3

LE DIOXYDE DE CARBONE DE LA RESPIRATION ET DE LA PHOTOSYNTÈSE

Les flux de dioxyde de carbone en rotation courte liés aux plantes et animaux (respiration, photosynthèse) ne sont pas comptabilisés dans les émissions car ils sont fixés de façon transitoire dans la biomasse et ainsi considérés comme faisant partie intégrante du cycle naturel.



la première consiste à réaliser un inventaire des GES directement émis sur le territoire par l'ensemble des acteurs et répartis par secteur d'activité. Cette méthode est utilisée par le Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) pour évaluer la contribution de chaque secteur économique aux émissions anthropiques annuelles. La seconde méthode vise à apprécier l'impact d'un produit, d'un service ou d'un système en comptabilisant l'ensemble de ses émissions, directes et

indirectes et ce, en considérant toutes les étapes de sa vie (« du berceau à la tombe »). Cette méthode, basée sur l'analyse de cycle de vie (ACV), est utilisée par la FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture) pour évaluer les émissions générées par l'élevage et ses filières.

Alors que la première méthode renseigne sur les émissions de l'élevage – c'est-à-dire générées pendant la phase de production agricole sur l'exploitation d'élevage –, la seconde



Encadré n° 4

ÉLEVAGE ET TRANSPORTS : UNE COMPARAISON FAUSSÉE

« Dans le monde, l'élevage émet plus de gaz à effet de serre que les transports. » Cette affirmation largement médiatisée provient d'une comparaison entre les chiffres du Giec* et ceux de la FAO**. Pour l'un, les émissions du secteur des transports représentent 14 % des gaz à effet de serre mondiaux [8]. Pour l'autre, 14,5 % des émissions mondiales sont imputables à l'élevage et ses filières [10]. Problème : ces deux institutions ne mesurent pas les mêmes impacts, ce qui fausse la comparaison.

Dans ses rapports d'évaluation, le Giec calcule les émissions anthropiques de gaz à effet de serre par grand secteur d'activités : énergie, transport, industrie, bâtiment, agriculture et UTCF (Utilisation des terres, leurs changements et la forêt). Les émissions agricoles, incluant l'élevage, concernent uniquement la phase de production, c'est-à-dire sur le périmètre de l'exploitation d'élevage. Pour les transports, seules les émissions liées à l'utilisation sont évaluées : modalités, types de carburant, fréquence et distance. Pour estimer l'impact de l'élevage et ses filières sur le climat, la FAO utilise un outil de modélisation basé

sur une approche d'analyse de cycle de vie (ACV) qui reprend les équations du Giec (de niveau 2) pour les sources d'émissions de gaz à effet de serre (GLEAM pour Global Livestock Environmental Assessment Model). En d'autres termes, la FAO comptabilise les émissions de gaz à effet de serre tout au long de la filière : de l'alimentation du bétail jusqu'à la fabrication des emballages pour distribuer la viande, le lait ou les œufs au consommateur. Ce sont donc les phases de production, transformation et distribution qui sont considérées.

Le périmètre d'évaluation de la FAO se révèle donc bien plus large que la seule activité d'élevage : il englobe des émissions liées aux secteurs du bâtiment, de l'industrie, des transports et de l'énergie (qui fournissent des intrants, transforment les produits, etc.). Sa comparaison avec le chiffre du Giec n'est donc pas valable.

*Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

**Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.

permet d'appréhender l'ensemble des GES émis pour produire, par exemple, un kilo de viande bovine : depuis la culture qui servira à nourrir le bétail jusqu'à la fabrication des emballages pour distribuer le steak au consommateur, c'est toute la filière de production qui est prise en compte. Cette différence de périmètre empêche toute comparaison rapide entre les chiffres de la FAO et du Giec (cf. Encadré n° 4).

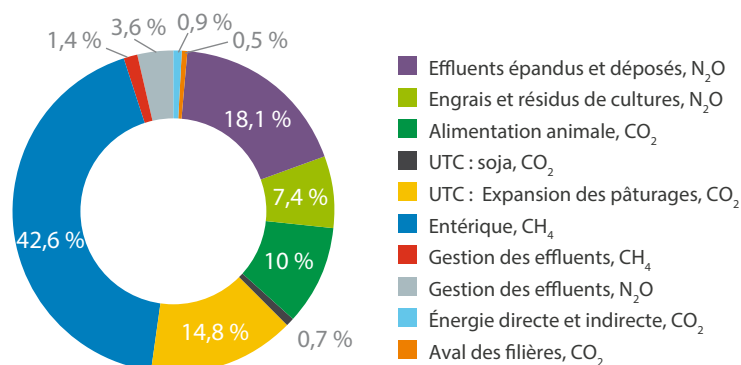
2.2. LES ÉMISSIONS MONDIALES

2.2.1 La part de l'élevage

En 2010, l'agriculture a contribué à hauteur de 11 % des émissions anthropiques mondiales [11]. Les

Figure n° 6

Émissions mondiales de gaz à effet de serre de la filière viande bovine, par catégorie d'émissions [10]





émissions de GES liées à l'activité d'élevage sont majoritaires: la fermentation entérique et la fertilisation des pâtures par les déjections animales regroupent plus de la moitié des émissions agricoles dans le monde (cf. Figure n° 6 page précédente). En ajoutant les émissions liées à la gestion du fumier et à son application sur les sols cultivés, l'élevage participe à hauteur de 66 % des émissions mondiales agricoles [12]. Au total, cela hisse la part de l'élevage à hauteur

de 7 % des émissions mondiales de GES liées à l'activité humaine. Cependant, dans le cadre des évaluations du Giec, les émissions liées à l'épandage et au pâturage sont attribuées au sous-secteur des cultures et non à l'élevage, car considérées comme des émissions issues des sols cultivés. Les émissions attribuées à l'élevage concernent donc uniquement la fermentation entérique et la gestion des déjections animales, au bâtiment et au stockage. En accord avec cette

méthodologie, l'élevage mondial totalise un peu plus de 5 % des émissions mondiales anthropiques [13].

2.2.2. La production de viande bovine et ovine

L'élevage mondial assure la fourniture de viande, lait et œufs pour l'alimentation humaine. Afin de calculer l'impact global de cette production, la FAO a développé un modèle qui évalue l'efficacité, dans l'utilisation des ressources et les impacts environnementaux, de l'élevage selon la méthode d'analyse de cycle de vie (cf. Encadré n° 4). En comptabilisant les GES depuis la culture qui alimente le bétail jusqu'à la fabrication des emballages qui servent à distribuer la viande, le lait ou les œufs au consommateur, la FAO évalue à 14,5 % la contribution de l'élevage et ses filières aux émissions mondiales pour l'année 2005 [10].

Concernant plus particulièrement la production de viande bovine, la FAO évalue à 2,9 Gt CO₂e les émissions pour l'année 2005, soit 6 % des émissions anthropiques mondiales. La répartition de ces émissions selon les différents postes d'activité tout au long de la filière de production est représentée sur la Figure n° 6 (page précédente), qui met en évidence l'importance de la fermentation entérique (≈ 43 %) et des déjections animales (≈ 23 %) sur le bilan des émissions mondiales de la viande bovine. Ramené au kilogramme de poids de carcasse, l'intensité d'émissions, ou poids carbone, est en moyenne de 46,2 kg CO₂e pour le bœuf et de 23,8 kg CO₂e pour la viande de petits ruminants (ovins et caprins), dont la production totalise 0,3 Gt CO₂e.

Figure n° 7

Variations régionales de la production de viande bovine et des intensités d'émissions de gaz à effet de serre [10]

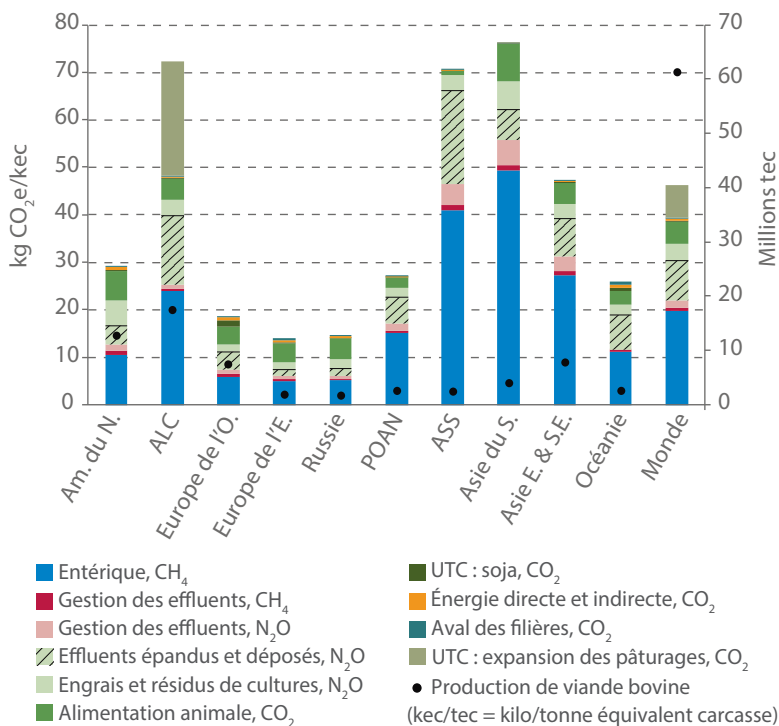
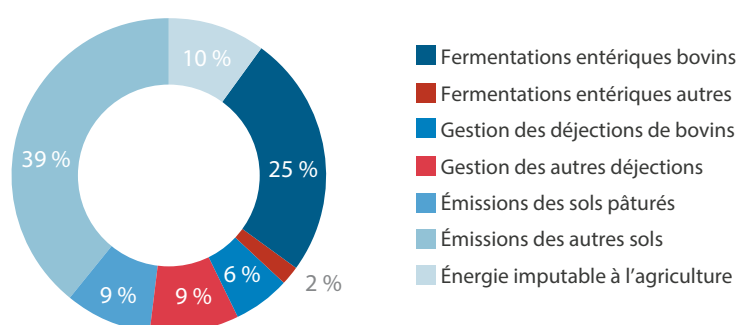




Figure n° 8

Contribution des différentes sources aux émissions de GES agricoles en 2011 [12]



2.3. LES ÉMISSIONS EUROPÉENNES

2.3.1. La part de l'élevage

Les émissions générées par l'élevage européen de ruminants contribuent à la moitié des émissions agricoles, soit 5 % des GES de l'Europe pour l'année 2012 [14]. Cette contribution se répartit comme suit : 3,2 % liés à la fermentation entérique (147 Mt CO₂e) et 1,7 % associé à la gestion des déjections (pour 79 Mt CO₂e).

2.3.2. La production de viande bovine et ovine

Le Joint Research Centre (JRC), laboratoire de recherche scientifique et technique de la Commission européenne, a calculé la contribution des principaux produits animaux (viande, lait et œuf) aux émissions européennes. Estimées entre 623 et 852 Mt CO₂e, ces émissions représentent 14 à 19 % des GES émis en Europe pour l'année 2004. Parmi celles-ci, la production de viande

de bœuf compte pour 28-29 % et la viande de petits ruminants à hauteur de 4 % [15]. Rapportée aux émissions communautaires, la contribution de la viande bovine s'élève à environ 5 % et moins de 1 % pour la viande ovine. Dans son rapport de 2013, la FAO réalise une comparaison des émissions de GES par kilo de viande bovine entre les différentes grandes régions du monde (Figure n° 7). L'Europe y apparaît comme la région dont la production est la plus efficace en termes d'intensité d'émissions au kilo produit.

2.4. LES ÉMISSIONS FRANÇAISES

2.4.1. La part de l'élevage

Selon l'inventaire national, les émissions françaises s'élèvent à 477 millions de tonnes CO₂e (hors UTCF - Utilisation des terres, leurs changements et la forêt) pour l'année 2013 [9]. L'agriculture représente 19 % des émissions nationales, soit 89 millions de

tonnes hors UTCF. Au sein du secteur agricole, l'élevage totalise 46 % des émissions, ce qui représente 9 % au niveau national.

En élargissant le périmètre d'évaluation et en intégrant une partie des émissions des sols pâturés, des autres sols et celles liées à l'utilisation d'énergie, le total de la contribution bovine avoisine 60 % des GES agricoles en 2011 (Figure n° 8) [12].

2.4.2. La production de viande bovine et ovine

La base de données Agribalyse®, développée par l'Ademe pour le calcul des impacts environnementaux de l'agriculture par inventaire de cycle de vie, évalue le poids carbone moyen d'un kilogramme de viande bovine en sortie de ferme à 11,9 kg CO₂e et à 18 kg CO₂e pour un kilo de viande ovine (moyenne pour une brebis allaitante de réforme, conventionnelle en système bergerie) [16]. En intégrant les émissions de la phase aval jusqu'à la distribution (étapes d'abattage et de transport), l'empreinte carbone moyenne de viande de gros bovin est d'environ 23 kg CO₂e/kg de viande transformée et celle d'ovine de 19 kg CO₂e (Figure n° 9 page suivante).

La variation du poids carbone de la viande entre l'amont et l'aval s'explique par une succession de rendements de découpe, de l'animal vif à la carcasse (54 %) puis à la viande nette commercialisable (68 %), ainsi que par l'absence d'allocation d'émissions sur les coproduits (toutes les émissions GES sont rapportées uniquement à la viande). La phase aval pèse peu dans le poids carbone final comme



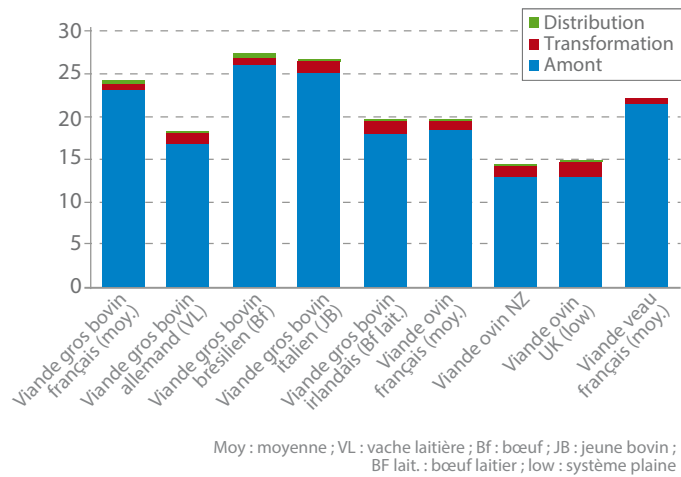
le montre la Figure n° 9, qui compare les intensités d'émissions au kilo de viande bovine et ovine de plusieurs pays producteurs (Allemagne, Italie, Irlande, Royaume-Uni, Brésil).

16

L'élevage de ruminants et la production de viande bovine et ovine émettent donc des gaz à effet de serre (CH_4 , N_2O et CO_2), qui sont évalués selon deux méthodes (inventaire vs ACV) et à plusieurs échelles géographiques (pays, continent, planète). Le réchauffement climatique étant un enjeu global, tous les secteurs économiques participent à l'effort de réduction. Pour atténuer les émissions de l'élevage de ruminants, deux voies se dégagent : optimiser l'efficacité des systèmes de production et mettre en place des leviers techniques spécifiques pour réduire les gaz à effet de serre.

Figure n° 9

Émissions de GES de la production de viandes bovine, ovine et de veau dans différents pays (en kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$ de viande transformée) [17]





2^E PARTIE



LES LEVIERS DE RÉDUCTION DES GAZ À EFFET DE SERRE

18

1. Émissions et efficacité des systèmes d'élevage de ruminants français

La réduction des émissions de GES passe tout d'abord par une optimisation des différents systèmes de production et par une amélioration de leur efficacité, en accord avec les performances techniques et économiques.

1.1. ÉTAT DES LIEUX DES ÉMISSIONS SUR L'EXPLOITATION D'ÉLEVAGE

1.1.1. Émissions directes et indirectes de l'exploitation d'élevage

Les principaux postes d'émissions de GES, directes et indirectes, sur une exploitation d'élevage de bovins et ovins allaitants sont représentés sur la Figure n° 10. Trois grands postes se distinguent :

- la fermentation entérique, source de CH₄ (59 % pour les bovins et 49 % pour les ovins) ;

- la gestion des déjections et les apports azotés, sources de CH₄ et de N₂O (27 % pour les bovins et 32 % pour les ovins) ;

- les intrants (engrais, produits phytosanitaires, semences et aliments du bétail) et la consommation d'énergie directe sur la ferme (fioul, gaz, électricité), sources de CO₂ (14 % pour les bovins et 19 % pour les ovins).

1.1.2. Variabilité des résultats d'émissions entre élevages français

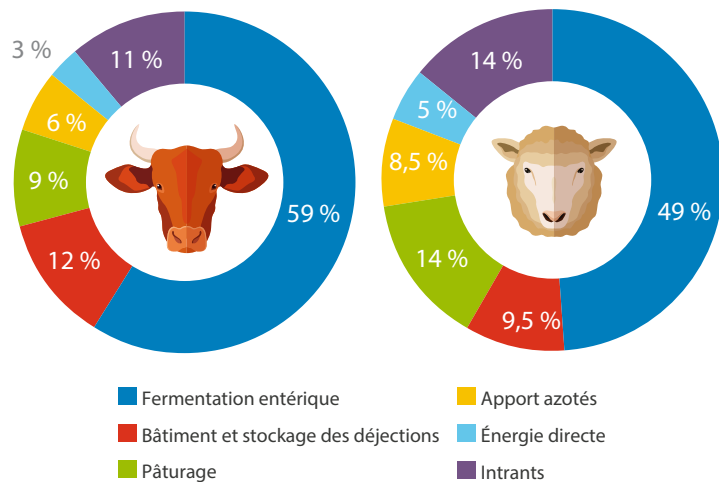
L'analyse des empreintes carbone des différents systèmes bovins allaitants²

révèle une forte variabilité entre les élevages au sein d'un même système de production, plus qu'entre les différents systèmes (Figure n° 11).

Le système « naisseur-engraisseur de bœufs » regroupe des élevages dont l'empreinte carbone varie de 12 à 18 kg CO₂e/kg de poids vif, soit un écart à hauteur de 50 % de la valeur finale référencée par l'Ademe (12 kg CO₂e, cf. 1^{re} partie). Ce résultat

Figure n° 10

Les émissions de gaz à effet de serre des élevages allaitants (bovins, ovins) en France [18; 19]

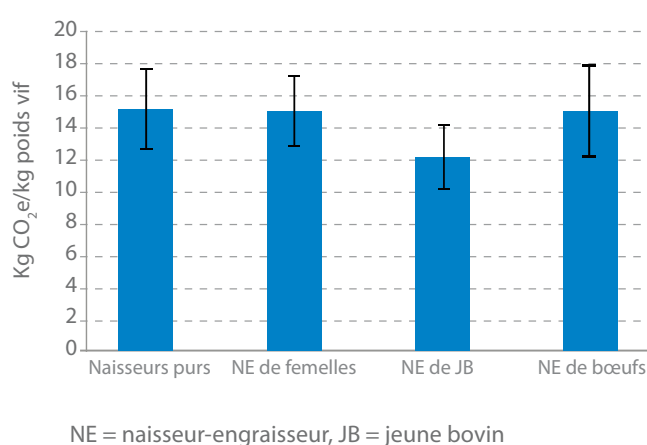


2. Exploitation de la base de données Inosys Réseaux d'élevage conduite en partenariat par l'Idele et les Chambres d'Agriculture.



Figure n° 11

Empreinte carbone de la viande de quatre systèmes bovins allaitants français [18]



montre que des progrès peuvent encore être réalisés, au sein de chaque système de production, pour améliorer l'efficacité des exploitations.

À l'inverse, les valeurs de l'empreinte carbone entre les différents systèmes de production sont relativement proches. Le système « naisseur-engraisseur de jeunes bovins » montre une empreinte carbone moindre du fait d'un animal produit plus lourd (le jeune bovin pèse plus que le brouillard) sur une durée de vie plus courte que le bœuf grâce à un engraissement rapide.

1.2. AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DU SYSTÈME DE PRODUCTION

Sur un plan opérationnel, deux leviers permettent d'optimiser les systèmes d'élevage de ruminants et d'améliorer l'efficacité de réduction des GES : la

conduite du troupeau et la gestion des surfaces cultivées et pâturées.

1.2.1. Un troupeau performant, tant en reproduction qu'en croissance

Globalement, l'amélioration de la conduite du troupeau revient à optimiser le développement de l'animal en fonction de sa croissance, des ressources disponibles et de son impact sur l'environnement. En d'autres termes, il s'agit de **réduire le nombre d'animaux improductifs, tout en ajustant l'alimentation.**

Sur le plan de la reproduction, l'efficacité passe par plusieurs voies : maîtriser la **productivité numérique** (nombre de veaux ou agneaux produits), **limiter la mortalité des veaux ou agneaux et réduire l'âge au premier vêlage/agnelage** afin de diminuer les effectifs présents sur l'exploitation (et donc les

émissions de méthane et protoxyde d'azote). Le Tableau n° 1 (page suivante) montre les gains environnementaux et économiques de ces trois leviers pour un élevage bovin allaitant.

Une voie d'optimisation de la conduite du troupeau consiste aussi à **réformer le plus tôt possible les animaux improductifs**, qui contribuent aux émissions de méthane, aux rejets azotés et à la consommation d'intrants, tout en ne produisant pas. C'est par exemple le cas des vaches non-gestantes qui sont conservées en vue d'être mises à la reproduction la campagne suivante. Ces situations se rencontrent lorsque le taux de mortalité est élevé et/ou le taux de gestation faible [20].

1.2.2. La bonne gestion des surfaces agricoles associées à l'élevage

À travers la bonne gestion des surfaces en herbe et en cultures, l'éleveur agit sur l'autonomie alimentaire de son exploitation, sur l'adaptation des rations à ses objectifs de production et aux besoins des animaux, ainsi que sur la valorisation agronomique des déjections animales (fertilisation).

■ Viser l'autonomie alimentaire

La recherche de l'autonomie alimentaire de l'élevage vise à diminuer les consommations de concentrés achetés en produisant des fourrages et/ou concentrés en quantité et qualité suffisantes au pâturage et pour l'hivernage. Si l'équilibre de la ration implique l'achat de concentrés énergétiques, alors il doit privilégier les coproduits issus de la transformation des végétaux (tourteaux, pulpes...) plutôt que les céréales,



Tableau n° 1

Quantification des conséquences environnementales (GES) et économiques de leviers d'action sur la conduite du troupeau bovin allaitant [20]

Action	Effet sur la production de viande/UGB	Effet sur les GES nets/UGB*	Effet sur les GES nets/kgvv*	Effet sur les résultats économiques
Maîtriser la conduite de la reproduction taux de gestation 82 % → 94 %	+ 7 %	- 3 %	- 11 %	- 3 % charges opérationnelles/ha
Limiter la mortalité des veaux 16 % → 7 %	+ 10 %	- 1 %	- 12 %	+ 5 % produit/ha + 7 % charges opérationnelles/ha
Réduire l'âge au premier vêlage 100 % de V 3 ans → 60 % de V 2 ans	+ 8 %	+ 1 %	- 7 %	+ 3 % produit/ha + 5 % charges opérationnelles/ha

* calcul effectué en comptabilisant le stockage de carbone dans les sols (cf. 3^e partie)
UGB = unité gros bétail; kgvv = kg de viande vive; ha = hectare

20

et préférentiellement des aliments d'origine européenne pour minimiser l'impact environnemental.

■ **Maximiser le pâturage**

En maximisant le temps passé à la pâture, l'éleveur limite sa consommation d'intrants (fioul, concentrés) grâce à la réduction des volumes de

fourrages stockés. Il diminue aussi les émissions de méthane et de protoxyde d'azote lors du stockage et de l'épandage des déjections. En outre, le pâturage comme les cultures sont des surfaces sur lesquelles l'éleveur peut valoriser le potentiel agronomique des effluents: leur épandage diminue fortement l'achat d'engrais

minéraux et économise les émissions de GES associées (CO₂, N₂O). L'implantation de légumineuses ou l'association graminées-légumineuses, à travers la fixation naturelle de l'azote atmosphérique dans le sol, participe également à entretenir la fertilité des sols et, ainsi, à réduire l'utilisation d'engrais de synthèse.

Encadré n° 5

ÉNERGIE : RÉDUIRE LE FOSSILE ET DÉVELOPPER LE RENOUVELABLE

La réduction de la dépendance énergétique constitue un enjeu fort dans la recherche d'un moindre impact environnemental de l'élevage. Les voies de progrès pour réduire la consommation d'énergie fossile et les émissions de gaz à effet de serre associées se situent principalement au niveau des engins agricoles, en limitant les travaux et en adaptant les modes d'utilisation: simplification des pratiques culturales, conduite économe, réglage du tracteur, limitation du transport. Le passage du tracteur au banc d'essais, juste par un réglage moteur, peut réduire

de 10 % les consommations de fioul (1 % sur les gaz à effet de serre) [20].

Outre la diminution de la dépendance énergétique, l'exploitation d'élevage présente des atouts pour développer la production d'énergies renouvelables: des bâtiments qui offrent des toits pour l'installation de panneaux photovoltaïques et des déjections animales méthanisables permettant de chauffer et produire de l'électricité tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (CH₄, N₂O).



2. Les leviers techniques spécifiques pour réduire les émissions de GES

Une fois le système de production optimisé et son efficacité améliorée, il existe des pratiques et techniques spécifiques pour réduire les émissions de GES. Alors que l'optimisation va dans le sens de meilleures performances techniques et économiques, cette seconde voie de progrès implique dans certains cas une technicité particulière et un coût supplémentaire [18]. Les processus les plus émetteurs au sein de l'activité d'élevage étant la fermentation entérique (CH_4) et la gestion des déjections (CH_4 , N_2O), l'intensité des émissions va dépendre des choix opérés par l'éleveur pour l'alimentation (type de ration en bâtiment, durée et qualité de pâturage à l'extérieur) et pour les techniques de stockage et d'épandage des effluents.

2.1. AGIR SUR L'ALIMENTATION DES ANIMAUX

L'alimentation des animaux peut constituer un levier de réduction des émissions de méthane entérique mais aussi de méthane et de protoxyde d'azote lié aux déjections: la composition de la ration influe sur le taux de fermentation entérique et sur la teneur des déjections en azote. Le protoxyde d'azote émis lors de la gestion des effluents résulte de l'azote alimentaire non fixé par l'animal, qui

est excrété par voies fécale et urinaire. L'enjeu est ainsi d'améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments de la ration par l'animal pour limiter les rejets, liquides ou gazeux, carbonés ou azotés.

Dans le cas du protoxyde d'azote, cet enjeu se traduit par moins de protéines apportées mais de meilleure qualité. Cependant, cette voie ne peut s'appliquer aux bovins allaitants car leur alimentation à base d'herbe pâturée et conservée (plus de 80 % de la ration [21]) apporte des quantités importantes non modifiables d'azote dégradable [22].

Pour le méthane, l'enjeu se situe au niveau de la fermentation dans le rumen: les glucides de la ration (amidon, cellulose) sont dégradés en acides gras volatils, source d'énergie pour l'animal, avec production simultanée de méthane. De nombreuses pistes ont été étudiées quant à la réduction du méthane entérique: ajout d'inhibiteurs de la méthanogénèse, d'extraits végétaux riches en tannins ou en saponine, d'enzymes, de lipides ou encore défaunation et manipulation des populations microbiennes du rumen [23]. L'ensemble de ces pistes sont rassemblées et comparées dans le Tableau n° 2 (page suivante). Elles continuent de faire l'objet de recherches, aucune solution ne montrant pour le moment une efficacité forte et certaine [24]. Concernant les apports de la génétique pour réduire le méthane entérique, les leviers sont présentés dans l'encadré n° 6, p. 23.

2.1.1. Au bâtiment: une ration enrichie

L'étude de l'Inra sur la contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre identifie les deux principaux leviers d'atténuation du méthane entérique via l'alimentation des bovins en bâtiment³: la substitution d'une fraction des glucides par des lipides et l'ajout d'un additif à base de nitrate dans la ration [22].

■ Avec plus de lipides

Le premier levier consiste à substituer à des glucides des lipides insaturés: selon l'étude, l'ajout de 3,5 % de lipides dans la ration entraîne une réduction de 14 % en moyenne de la production de méthane. Dans le rumen, la présence de lipides insaturés va réduire la production de dihydrogène et favoriser sa consommation par la flore digestive: la production de CH_4 se trouve ainsi diminuée (cf. Figure n° 1 p. 8). Le taux d'incorporation de lipides est cependant plafonné par des limites nutritionnelles, afin de ne pas modifier la composition en acide gras du lait et de la viande produits. Le choix des sources de lipides se fait en fonction du prix et de la disponibilité pour l'éleveur. Dans la pratique, cette action consiste à intégrer des graines de colza et/ou de lin, brutes ou extrudées, dans la ration du ruminant qui doit recevoir déjà un minimum de concentrés. Ce levier de réduction peut donc s'appliquer aux bovins allaitants qui reçoivent plus de 1 kg par jour de

3. Seuls les bovins sont visés ici car les autres ruminants, ovins et caprins, ne contribuent qu'à raison de 7 % des émissions de méthane entérique en France [22].



Tableau n° 2

Additifs alimentaires et stratégies de réduction du méthane entérique

(adapté de [23])

Stratégie de réduction		Potentiel de réduction du CH ₄	Effet à long terme étudié	Efficacité	Innocuité pour l'environnement ou pour l'animal	Recommandation
Inhibiteurs	Bromochlorométhane	Fort	non ?	oui	non	non
	2-bromo-éthane sulfonate					
	Chloroforme					
Récepteurs d'électrons	Nitrates	Fort	non ?	oui	?	oui
Ionophores		Faible	non ?	oui ?	oui ?	oui ?
Extraits végétaux	Tannins	Faible ?	non	oui	oui ?	oui ?
	Saponine			?		non ?
	Huiles essentielles			?		non
Enzymes exogènes		Non ou faible	non	non ?	oui ?	non ?
Défaunation		Faible	non	?	oui	non
Manipulation des <i>Archaea</i> et bactéries du rumen		Faible ?	non	?	oui ?	oui ?
Lipides alimentaires		Modéré	non ?	oui	oui	oui ?
Incorporation de concentrés		Faible à modéré	oui	oui	oui	oui ?
Amélioration de la qualité des fourrages		Faible à modéré	oui	oui	oui	oui
Gestion du pâturage		Faible	oui	oui ?	oui	oui ?
Transformation des aliments		Faible	oui	oui	oui	oui

?: incertitude due aux recherches limitées ou manque de données

concentrés, et ce, seulement au cours de la période où ils sont au bâtiment (4 à 6 mois dans l'année).

■ Avec du nitrate

Le second levier de réduction du méthane entérique via l'alimentation consiste à ajouter un additif, qui présente un effet démontré *in vivo* et à long

terme. Le seul dans ce cas est le nitrate, qui apporte une réduction de 10 % des émissions pour 1 % d'incorporation dans la ration. Il faudrait l'utiliser avec des rations pauvres en azote fermentescible, comme l'ensilage de maïs, afin d'éviter la production d'ammoniac dans le rumen, qui pourrait accroître l'azote urinaire. Et en cas de dosage excessif

ou d'apport trop brutal, l'animal peut être intoxiqué (méthémoglobinémie). C'est pourquoi ce levier ne concernerait que les bovins dont la ration est à base d'ensilage de maïs, c'est-à-dire essentiellement le cheptel laitier et les taurillons à l'engraissement du cheptel allaitant. Un autre inhibiteur de la méthanogénèse est testé depuis



Encadré n° 6

RÉDUIRE LA PRODUCTION DE MÉTHANE ENTÉRIQUE À TRAVERS LA GÉNÉTIQUE

La sélection génétique représente un levier de réduction des gaz à effet de serre : des variations dans les émissions de méthane entérique ont été rapportées entre animaux, parmi les races et au cours du temps. L'amélioration génétique peut ainsi réduire les émissions de méthane entérique selon trois voies [32] : l'intensification de la production, l'amélioration de l'efficacité du système et la sélection d'animaux peu émetteurs.

■ **L'intensification de la production par animal amène à réduire le nombre total d'animaux pour un même niveau de production**, et ainsi à diminuer les émissions à l'échelle du troupeau. L'efficacité alimentaire nette (ou RFI pour « *Residual Feed Intake* ») étant génétiquement corrélée aux émissions de méthane entérique [33], elle constitue aujourd'hui une voie de sélection prometteuse – les performances de croissance ne semblent pas être compromises [32] – mais incertaine, tant du point de vue des moyens financiers à déployer que de la précision de mesure des quantités ingérées par les animaux ainsi que des émissions de méthane évitées [34]. En France, la sélection sur le critère efficacité alimentaire (EFA) est opérationnelle pour 4 races allaitantes : Charolaise, Limousine, Rouge des Prés et Blonde d'Aquitaine.

■ **L'amélioration de l'efficacité du système passe aussi par une meilleure fertilité** : les mauvaises performances de reproduction sont associées à un nombre plus élevé de jeunes à élever, donc plus d'émissions de méthane entérique. Le taux de fertilité doit être suffisamment élevé pour assurer une mise à la reproduction efficace des femelles. En France, il existe des index fertilité pour les bovins allaitants (et laitiers).

■ **La sélection directe d'animaux présentant un niveau bas d'émissions de méthane entérique**. À travers notamment la composition de la microflore intestinale, la génétique permet de choisir des animaux qui présentent, en théorie, les plus bas potentiels émetteurs. Cette technique nécessite de fixer un seuil définissant les niveaux d'émissions haut et bas, mais aussi de connaître les différents régimes alimentaires et systèmes de production avec lesquels les animaux ont été évalués (puisque ces deux paramètres ont une influence sur les émissions de méthane). Cette technique demande beaucoup d'investissement en termes de temps et de moyens financiers afin de mesurer individuellement un grand nombre d'animaux dans le but de constituer une base de données opérationnelle [32].

2014, le 3-nitrooxypropanol (3NOP), qui a montré une réduction de 30 % des émissions de méthane entérique de vaches laitières [27]. Cependant son effet à long terme n'a pas encore été établi, la dernière expérimentation faisant état d'une persistance sur douze semaines.

2.1.2. Au pâturage : jouer la carte multi-espèces végétales

L'atténuation des émissions grâce à l'alimentation devient beaucoup plus difficile lorsque l'animal pâture, car il choisit lui-même la composition de

sa ration. Le levier principal consiste donc à implanter des espèces qui contribuent à réduire la formation de méthane lors de la digestion. Même si les recherches sur des légumineuses fourragères, des plantes riches en tannins ou en saponine ont donné des résultats concluants quant à la réduction du méthane [28; 23] – ce qui pourrait laisser penser que la composition végétale de la prairie joue un rôle significatif dans la réduction des émissions de méthane entérique au pâturage [29] – le manque de références *in vivo*, en particulier sur le

maintien de cette réduction au cours du temps, empêche toute conclusion quant à la possibilité d'emploi de ces ressources [24; 30]. Dans le cas des tannins par exemple, leur utilisation quotidienne peut réduire l'ingestion et ainsi le rendement de production et la composition du produit final [31].

2.2. LES DÉJECTIONS : UNE GESTION GLOBALE

Riches en éléments organiques et minéraux, les déjections sont valorisées pour leurs effets amendants et fertili-



Encadré n° 7

UN DOUBLE ENJEU POUR LA RATION DES RUMINANTS : CLIMAT ET NON-CONCURRENCE ALIMENTAIRE

En France, la place importante donnée à l'herbe dans les élevages allaitants (de 60 à 80 % de l'alimentation en élevage bovin et ovin [21 ; 25]) limite le potentiel de réduction du méthane entérique et incite à trouver des solutions associant l'enjeu d'atténuation des émissions à celui de la non-concurrence alimentaire entre Homme et animal. En effet, une alimentation à base d'herbe pourrait provoquer plus d'émissions de méthane entérique qu'une alimentation à base de maïs [26]. De ce fait, une solution de réduction des émissions de méthane

entérique de l'élevage de ruminants pourrait être de diminuer la part d'herbe et de la remplacer par du maïs ou des céréales. Mais c'est sans tenir compte du stockage de carbone par les prairies (cf. 3^e partie), des enjeux de concurrence alimentaire, de valorisation des espaces et de l'acceptabilité sociétale d'un élevage de ruminants essentiellement en bâtiment. L'objectif consiste donc à faire baisser la fermentation entérique tout en laissant le bétail valoriser des protéines non-consommables par l'Homme, en particulier l'herbe.

sants, afin de renouveler et entretenir la qualité des sols cultureux comme prairiaux. Pour y arriver, les déjections vont suivre des étapes dont l'enjeu est le maintien, voire l'amélioration, du pouvoir fertilisant et amendant de la matière, tout en limitant les pertes vers l'environnement [35]. Pendant la période hivernale, lorsque les animaux sont logés en intérieur, les grandes étapes se situent au bâtiment, puis au stockage, et enfin lors de l'épandage. Lors des périodes de pâturage les animaux excrètent directement leurs déjections sur les prairies.

Les principaux leviers de réduction d'émissions gazeuses liées à la gestion des déjections sont : la méthanisation, le compostage, la couverture des aires de stockage et l'enfouissement lors de l'épandage [36]. Ces leviers sont présentés ci-après par poste pour plus de lisibilité. Cependant, la réduction des émissions se gère de manière globale sur l'ensemble de la chaîne, ceci afin d'éviter qu'une diminution sur l'un des postes ne

provoque une augmentation des GES au poste suivant.

2.2.1. Des références en cours d'acquisition sur les émissions au bâtiment

Le type de déjections, fumier ou lisier, influe sur les processus biologiques et physico-chimiques des émissions de méthane et protoxyde d'azote, au bâtiment et au stockage. Cependant, très peu de références bibliographiques sont disponibles sur les émissions au bâtiment pour les systèmes de production français, que ce soit sur celles associées aux déjections sous forme de fumier [37] ou sur celles associées au lisier de bovins [38]. Des travaux sont en cours pour préciser les mécanismes et niveaux d'émissions de différentes pratiques de gestion des déjections. Ces projets étudient l'effet des régimes alimentaires sur la chaîne de gestion des déjections (projet Ademe EM2B et BTéP, Casdar Mages), la variabilité des émissions gazeuses sur site via des mesures

simplifiées, l'étude de différentes pratiques (dépôt au champ classique, bâchage, tassement + bâchage) au stockage des fumiers (projet Ademe Emafum), mais aussi lors de l'épandage des déjections (lisier buse palette ou pendillard, séparation de phase ou lisier sur prairie, compost ou fumier sur prairie).

2.2.2. Au stockage : diminuer le potentiel émetteur des effluents

Durant la phase de stockage, les effluents sont conservés dans l'attente d'être épandus. Le principal levier d'atténuation des émissions consiste à restreindre le temps de stockage et à réduire la surface de contact entre les déjections et l'air [39]. En fonction du type d'effluent, liquide (lisier) ou solide (fumier), les pratiques et leviers diffèrent.

2.2.2.1. Des résultats mitigés pour la couverture

Dans le cas des effluents liquides (lisier), la couverture des fosses peut



se faire selon deux techniques : en laissant une croûte naturelle se former grâce à l'apport de paille par l'éleveur ou en utilisant une couverture à l'aide d'un autre matériau (argile, plastiques). En élevage bovin, la formation d'une croûte naturelle est plus fréquente, ceci s'explique par la combinaison d'un apport de litière pour le couchage des animaux en bâtiment (paille le plus fréquemment), qui entraîne une teneur en matière sèche des déjections plus élevée, avec un brassage peu fréquent (avant épandage). L'analyse de la littérature montre que **la couverture par croûte naturelle induit une réduction des émissions de méthane de l'ordre de -40 % et une hausse des émissions de protoxyde d'azote par rapport à une fosse non couverte [38].** En ce qui concerne le taux d'adoption de cette pratique, l'analyse indique, à dire d'expert, qu'en 2010 35 % des fosses à lisier de bovins étaient couvertes par des croûtes naturelles, essentiellement en élevage laitier. La couverture par matériaux reste quant à elle peu utilisée du fait d'une absence de réglementation. D'autre part, cette technique peut entraîner un coût de mise en place conséquent. Dans le cas des effluents solides (fumier), le stockage se fait soit en fumière, soit au champ, sous la forme de tas en parcelle. Le levier de lutte contre les GES retenu dans la littérature réside dans la couverture des fumières et le bâchage des tas. Cependant, **très peu de références scientifiques sont disponibles sur**

le potentiel d'abattement apporté par cette technique et les études existantes se contredisent [40;41]. Des contraintes techniques, économiques et de temps de travail ont aussi été identifiées [38]. Pour toutes ces raisons, cette pratique reste très peu répandue pour les élevages bovins.

2.2.2.2. Traiter les effluents pour diminuer leurs émissions

Selon les contraintes de l'exploitation (pression azotée, zones non épandables en lisier) une étape de traitement peut s'avérer nécessaire afin de faciliter la gestion des déjections sur l'exploitation. Deux types de traitement des effluents montrent un intérêt dans la lutte contre les émissions de GES : le compostage et la méthanisation.

■ **Le compostage réduit le CH₄ mais augmente le N₂O.** Le compostage des déjections consiste à aérer la structure de stockage, par exemple en utilisant une membrane poreuse et des gaines de ventilation ou simplement en retournant les andains. Cette technique réduit les émissions de méthane par rapport au stockage en cuve (-30 %) ou en tas (-70 %), mais augmente les émissions de protoxyde d'azote [36]. Elle reste très peu pratiquée en élevage bovin, avec moins de 1 % en 2008 [35]. Le compostage offre la possibilité d'épandre les effluents sur prairies plus facilement et d'amener les bovins au pâturage assez rapidement après application (produits hygiénisés).

■ **La méthanisation : une solution efficace mais la technique est coûteuse.** La méthanisation présente le plus grand nombre d'avantages quant à la réduction des émissions de méthane avec un abattement de 85 % des émissions⁴, ainsi que la possibilité de produire de l'énergie (Encadré n° 8 page suivante). De plus, la production d'énergie renouvelable apporte une réduction des émissions de CO₂ par substitution aux énergies fossiles. Dans le cas du fumier, la méthanisation peut aussi conduire à une réduction des émissions de protoxyde d'azote [35]. Cependant, le développement de la méthanisation se heurte à deux contraintes majeures, l'une technique, l'autre financière. En premier lieu, les effluents d'élevage possèdent un faible pouvoir méthanogène, ce qui peut obliger l'exploitant à ajouter d'autres types de matières ou de déchets, issus de l'exploitation ou non : résidus de cultures, cultures énergétiques, déchets verts et résidus carbonés agro-alimentaires ou urbains. Des compétences techniques spécifiques sont donc nécessaires pour trouver le mélange au plus fort pouvoir méthanogène en fonction du système de production et des opportunités aux alentours de l'exploitation. En second lieu, la méthanisation demande une forte capacité d'investissement, ce qui freine grandement le développement de cette technologie sur l'exploitation agricole. Fin 2014, environ 200 unités de méthanisation à la ferme étaient en fonctionnement selon l'Ademe,

4. Chiffre retenu par le Citepa pour le calcul des émissions agricoles; issu des travaux réalisés sur les projets domestiques.



Encadré n° 8

LA MÉTHANISATION AGRICOLE

La méthanisation, aussi appelée digestion anaérobie, consiste à faire dégrader la matière organique par des micro-organismes en l'absence d'oxygène. L'opération se déroule dans une cuve, appelée « digesteur » qui va aboutir à la formation d'un produit humide, le digestat, et de biogaz, mélange composé d'environ 50 à 70 % de méthane et de dioxyde de carbone. Riche en matière

organique, le digestat pourra être épandu sur les terres agricoles sous réserve du respect des exigences de qualité agronomique et sanitaire. Une phase de compostage et de maturation pourra éventuellement s'avérer nécessaire. Une fois épuré et enrichi, le biogaz se valorise sous diverses formes en tant qu'énergie renouvelable : électricité, chaleur, carburant ou injection dans le réseau de gaz naturel.

dont environ la moitié à partir d'une activité d'élevage [42]. En fonction des opportunités d'approvisionnement aux environs de l'exploitation, ces deux problématiques peuvent amener l'éleveur à viser une méthanisation « agri-territoriale » [43] ou au contraire à privilégier la petite méthanisation à la ferme, notamment par voie sèche [44].

2.2.3. À l'épandage : enfouir les effluents

Les techniques de réduction des émissions de GES à l'épandage consistent à enfouir le plus rapidement possible les effluents dans le sol afin de limiter les contacts avec l'atmosphère : incorporation rapide ou immédiate des fumiers ou lisiers, injection des lisiers ou apports via pendillards sous couverts. Alors que l'injection consiste à introduire le lisier directement sous la surface du sol au moment de l'épandage, l'incorporation demande une seconde opération de recouvrement pour effectuer l'introduction dans le sol. Ces actions n'ont cependant pas montré aujourd'hui de réel potentiel d'abattement des émissions directes de protoxyde d'azote, bien

au contraire : concernant le lisier, toutes ces techniques impliquent soit une augmentation, soit un maintien des émissions de N_2O . Dans le cas des fumiers, l'incorporation semble diminuer les émissions de protoxyde d'azote ou ne pas avoir d'effet [38]. En réduisant la volatilisation de l'ammoniac, ces techniques participent tout de même à diminuer les émissions indirectes de N_2O . Surtout, elles contribuent à une meilleure valorisation des apports organiques, au plus près des besoins des plantes, ce qui permet de réduire les apports d'azote minéral et donc, par substitution, des émissions de CO_2 et de N_2O liés à la fabrication des engrais minéraux [37].

2.3. LE PÂTURAGE, UNE ÉTAPE CLEF

Les deux grands leviers de réduction de GES exposés ci-dessus, l'alimentation et la gestion des effluents, se retrouvent au cœur du pâturage : la prairie nourrit l'animal et recycle ses déjections. Les leviers que contrôle l'éleveur à cette étape sont la durée de la période de pâturage, la durée de vie des prairies temporaires, la

composition végétale de la prairie et la fertilisation. La prairie joue un second rôle dans la lutte contre le réchauffement climatique, en stockant du carbone dans son sol (cf. 3^e Partie).

2.3.1. Allonger la durée de pâturage

Dans le cas des ruminants, les émissions gazeuses sont fortement réduites au pâturage car le couvert prairial utilise directement l'azote des déjections [45]. Une piste majeure de réduction des émissions de GES peut donc consister à réduire les quantités d'effluents stockés en augmentant le temps passé au pâturage [37 ; 22]. En tenant compte des critères zootechniques et des contraintes logistiques, la durée d'allongement préconisée par les études est de 20 jours, en sortant les herbivores plus tôt au printemps et en les rentrant plus tard à l'automne [22]. De manière générale, les systèmes de production herbagers, notamment ceux valorisant les légumineuses, car ils permettent de réduire fortement les émissions liées à la fabrication, au transport et à l'utilisation des aliments pour animaux et



engrais azotés, contribuent à réduire les émissions de GES [46]. Une solution plus technologique existe pour diminuer les émissions de protoxyde d'azote au pâturage : l'utilisation d'un inhibiteur de nitrification qui peut apporter une réduction des émissions provenant de l'urine animale de 61 à 91 %, avec en sus une augmentation du rendement de la prairie pouvant aller jusqu'à 36 % [47]. L'analyse de la littérature montre que, même si les résultats varient, l'efficacité de cette solution est démontrée pour les systèmes à pâturage intensif mais qu'elle reste fortement dépendante des paramètres pédoclimatiques [39]. Cependant, cette technique soulève la question du temps de résidence de l'inhibiteur dans le sol, de la possible ingestion par les animaux et du devenir du produit dans la viande et le lait.

2.3.2. Des prairies temporaires plus longues

En allongeant la durée de vie des prairies temporaires, l'éleveur diminue la fréquence des retournements de prairies. Cette action a pour incidence de réduire les émissions de dioxyde de carbone, liées à la mécanisation, et de protoxyde d'azote, lié au relargage dans l'atmosphère des produits de l'activité microbienne du sol (nitrification/dénitrification). Cette action montre un intérêt certain dans le stockage de carbone (cf. 3^e partie).

2.3.3. Légumineuses et fertilisation

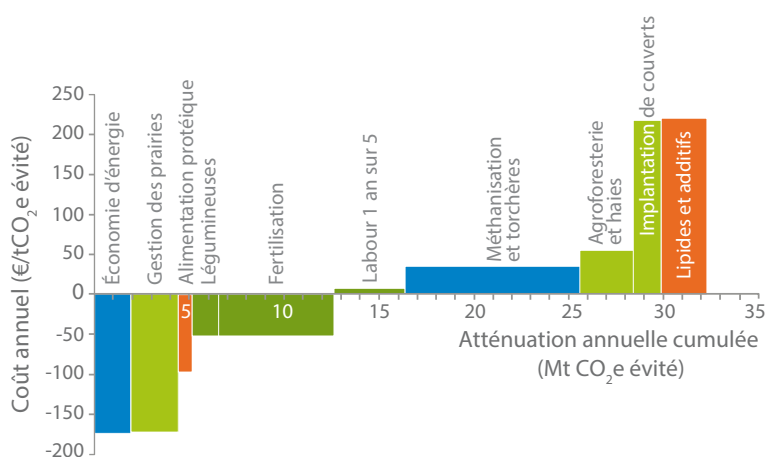
La composition végétale de la prairie ainsi que la fertilisation vont avoir des effets sur les émissions de protoxyde

d'azote liées à l'activité du sol, ainsi que, par substitution, sur celles liées à la fabrication des engrais (N_2O et CO_2). La présence de légumineuses, qui fixent l'azote de l'air pour le restituer au sol, va permettre de réduire les émissions de N_2O du fait d'un moindre besoin en fertilisation minérale. Cette diminution de la fertilisation ne devrait avoir que peu d'impact sur la production d'herbe dans la mesure où les apports actuels d'azote sur prairies sont souvent excédentaires [22]. Dans le cas d'un ajout d'azote minéral en plus d'une fertilisation organique, les émissions de N_2O sont réduites si l'apport d'azote minéral a lieu au moins trois jours après l'effluent, plutôt que simultanément [47]. Il ne faut pas oublier que le respect des conditions

d'application des engrais minéraux ou organiques, tant sur la dose que sur la période, participe aussi à réduire les émissions de protoxyde d'azote grâce à un apport ciblé au plus près des besoins de la plante, dans des conditions optimales d'application. L'ensemble des leviers présentés ont été comparés par l'Inra sur la base de leur coût (hors coûts de transaction privés) et de la réduction des émissions de GES permise, calculé sur l'assiette atteinte en 2030 [22]. Les résultats sont présentés sur la Figure n° 12 qui rassemble les dix leviers identifiés par l'Inra pour l'ensemble du secteur agricole (cultures et élevage) : pour chaque catégorie de levier, la hauteur du rectangle indique le coût par tonne de CO_2e évité et sa largeur l'atténuation des émissions.

Figure n° 12

Coût et potentiel d'atténuation annuel des GES après 2030 à l'échelle du territoire national [22]





Des leviers existent pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre sur l'exploitation d'élevage. En premier lieu, l'optimisation et l'amélioration de l'efficacité du système de production peut participer à l'augmentation des

performances environnementales comme économiques : réformer les animaux improductifs, limiter la mortalité des jeunes, réduire l'âge au vêlage, rechercher l'autonomie alimentaire. En second lieu, des leviers techniques

spécifiques ont été identifiés pour réduire les émissions, en particulier au pâturage, pendant que des références scientifiques et techniques sont en cours d'acquisition sur les émissions au bâtiment et au stockage.



3^E PARTIE



LE STOCKAGE DE CARBONE PAR LES PRAIRIES ET SES LEVIERS D'AMÉLIORATION

30

À travers les surfaces en prairies qui participent à l'alimentation des animaux (via le pâturage et le fourrage/ensilage), l'élevage de ruminants exerce une seconde influence sur le climat. En effet, en maintenant plus de carbone dans les sols qu'elles n'en restituent par la respiration, les prairies contribuent au stockage de carbone, via le retour au sol de la biomasse aérienne et racinaire (production issue de la photosynthèse), et l'apport de matières organiques exogènes. Les prairies représentent donc un véritable levier d'atténuation du réchauffement climatique.

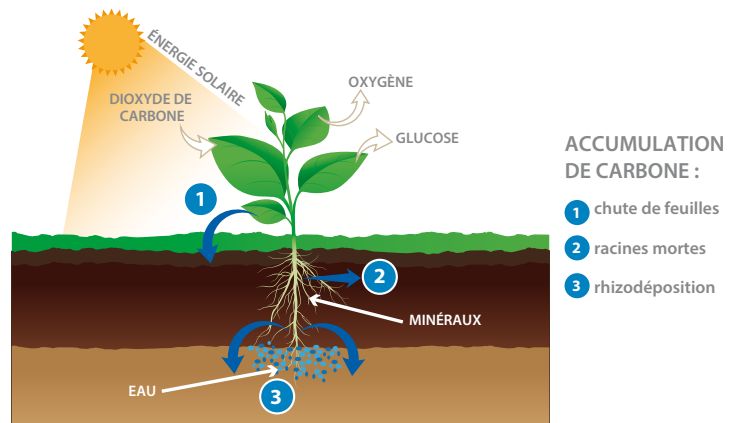
1. De la photosynthèse au stockage de carbone

1.1. SYNTHÈSE DE MATIÈRE ORGANIQUE PAR LES VÉGÉTAUX

À l'instar de toutes les plantes, les espèces végétales de la prairie synthétisent de la matière organique à partir du dioxyde de carbone qu'elles assimilent dans l'atmosphère grâce à l'énergie solaire : c'est la photosynthèse. Une partie de ce carbone (plusieurs dizaines de pourcents [48]) retourne rapidement dans l'atmosphère à travers le phénomène de respiration des végétaux (aérienne et racinaire). La différence entre le flux entrant (la photosynthèse) et

Figure n° 13

Photosynthèse et accumulation de carbone dans les sols [50]



sortant (la respiration) constitue la production de carbone organique de la végétation.

1.2. ACCUMULATION ET DÉGRADATION DE CARBONE ORGANIQUE DANS LES SOLS

La matière organique carbonée entre dans le sol sous trois formes complémentaires (Figure n° 13) [50] : des feuilles sénescentes ou non exploitées par les animaux, l'accumulation des racines mortes et l'activité des racines vivantes qui fournit une partie

de ce carbone directement dans le sol pendant toute la croissance du végétal (rhizodéposition). Une fois dans le sol, une grande partie de cette biomasse est soumise à différentes transformations et dégradations, essentiellement par des organismes vivants du sol : microfaune (fragmentation de la matière) et micro-organismes (champignons et bactéries) pour la minéralisation. Ces organismes vont décomposer la matière organique : ils restituent 60 % du carbone à l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone par le biais de la



respiration⁵ (et participent ainsi à l'effet de serre) et en assimilent aux alentours de 40 %. La matière organique est d'abord transformée en fractions labiles (glucides, lipides, phospholipides, protéines) puis plus stables et peu dégradables (lignine), avant de rentrer dans les fractions protégées de la décomposition, qui présentent une durée de vie comprise entre 25 ans (substances humiques) et des décennies ou plus de 1 000 ans pour les fractions stables, qui constituent la fraction dominante des matières organiques des sols [48]. Le stockage du carbone représente ainsi un continuum de dégradation, depuis les litières fraîchement allouées au sol jusqu'aux formes les plus évoluées. Ces différentes étapes de dégradation peuvent être caractérisées par la taille des particules et leurs temps de résidence différents en fonction de leur taux de dégradation [51 ; 52]. À chaque étape de dégradation, une partie du carbone fixé est relâchée dans l'atmosphère et participe à l'effet de serre. La question du temps de résidence du carbone organique dans les sols se révèle de ce fait très importante au regard de l'enjeu de lutte contre le réchauffement climatique: tant que le carbone est piégé dans le sol, il ne rejoint pas l'atmosphère et ne participe donc pas à augmenter le forçage radiatif (équilibre entre rayonnement solaire entrant et émissions infrarouges sortant de l'atmosphère). L'effet de réchauffement climatique est ainsi réduit. Les stocks de carbone organique en fonction de l'usage des sols sont représentés sur la Figure n° 14.

2. Durée de stockage du carbone organique dans les sols

2.1. STOCKAGE ET DÉSTOCKAGE, DES FLUX SIMULTANÉS À DES VITESSES DIFFÉRENTES

Dans les sols, le carbone se distribue verticalement en régime dynamique, entre les apports par la végétation et la minéralisation par les micro-organismes [48]. Stockage et déstockage sont simultanés et continus: à tout instant du carbone organique est transféré dans le sol par les végétaux (vivants ou morts ou par un apport organique externe de type fumier) et du carbone minéral est émis par voie gazeuse sous l'action de la respiration des micro-organismes qui dégradent la matière organique. Cependant, les deux phénomènes n'ont pas la même

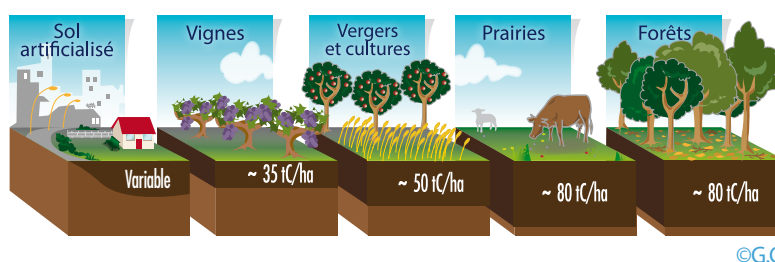
cinétique [56]. Un sol déstocke plus vite qu'il ne stocke: pour une durée de 20 ans, la vitesse de déstockage est deux fois plus rapide que celle de stockage [57 ; 58].

2.2. LA DURÉE DE STOCKAGE AUGMENTE EN LIEN AVEC LA PROFONDEUR

La durée de stockage du carbone est plus ou moins longue selon les conditions du milieu (sol, pratiques, cultures, climat), particulièrement en fonction des températures annuelles moyennes et de la respiration des micro-organismes du sol [59 ; 60]. Le temps de résidence dans le sol va donc surtout dépendre de la vitesse de dégradation/minéralisation, qui diminue fortement avec la profondeur [61 ; 62]. Les matières organiques issues des processus de dégradation microbienne deviennent de plus en

Figure n° 14

Stocks de carbone et usages des sols en France (0-30 cm) [73]



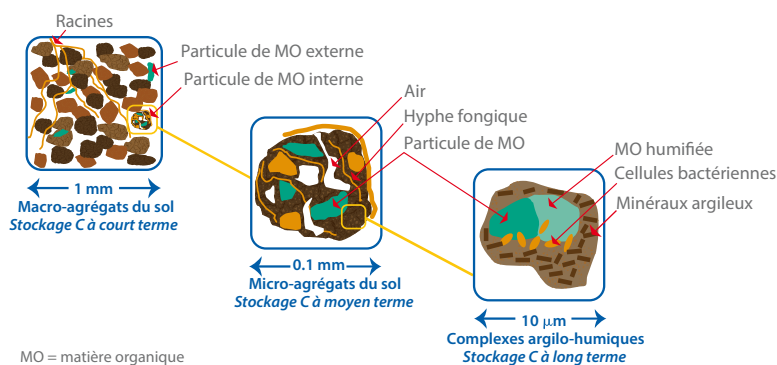
©G.C.

5. Deux types de respiration entrent en ligne de compte dans la compréhension des flux de CO₂ vers l'atmosphère: en premier lieu, la respiration des végétaux, puis la respiration des micro-organismes.



Figure n° 15

Agrégats et place de la matière organique au sein de la matrice du sol et temps de résidence [68]



66]. Dans le cas des cultures céréalières avec un horizon du sol travaillé (labour 0-40 cm), la répartition du carbone est divisée en quatre compartiments homogènes, dont le premier, très labile, est biodégradé dans l'année (75 % du carbone apporté), le reste étant réparti en trois compartiments de temps moyens de résidence respectifs de 4, 40 et plus de 1 000 ans [67]. Dans le cas des prairies du Massif Central, un carbone âgé de plus de 2 500 ans a été mis en évidence entre 60 et 80 cm de profondeur [61].

2.3. L'ARGILE PROTÈGE LE CARBONE DE LA DÉGRADATION

plus récalcitrantes et vont en partie être stockées dans le sol du fait de leurs liaisons et associations avec les minéraux. Le carbone qui n'est pas lié aux minéraux reste dans la solution du sol (carbone organique dissout) et pourra être entraîné par les eaux de drainage vers les couches profondes

du sol [63] ou lessivé [64]. Plus le carbone sera transféré vers les couches profondes, moins il sera dégradé. **Le temps de stockage moyen du carbone organique augmente donc considérablement avec la profondeur, pouvant atteindre jusqu'à 10 000 ans dans les couches de sol les plus profondes [65 ;**

La minéralisation des matières organiques dépend de nombreux facteurs [57] : contexte pédoclimatique (température, humidité et aération du sol, acidité, teneur en argile, minéralogie...), nature des composés organiques (molécules plus ou moins biodégradables) et de leur localisation

Encadré n° 10

STOCKAGE MOYEN D'UNE PRAIRIE PERMANENTE ET D'UN LINÉAIRE DE HAIES

L'évaluation du stockage de carbone et plus généralement des flux de carbone entre le sol et l'atmosphère demande du temps. Depuis 2002, plusieurs projets européens ont permis de constituer un large réseau de mesures de stockage de carbone *in situ*. Au total, ce sont 39 sites répartis sur 15 pays européens pendant 11 ans (totalisant un nombre de mesures de 213 sites par année) qui ont permis d'établir une **valeur moyenne du stockage carbone pour la prairie tempérée de 76 +/- 11 g C/m²/an, soit 760 kg par hectare et par an [71].** Ce chiffre correspond au bilan net des échanges entre le sol et l'atmosphère, c'est-à-dire à

la différence entre les quantités stockées et déstockées tout au long de l'année d'un écosystème prairial. Ramené à l'unité de référence des émissions de GES, ce stockage équivaut à 2,8 t CO₂e/ha/an.

Haies et bosquets sont rencontrés dans les exploitations d'élevage et représentent 10 à 15 % de la surface agricole utile [72]. Le potentiel de stockage annuel de carbone est **estimé à 125 kg C/ha/an sur la base de 100 mètres linéaires [48].** Ce potentiel s'explique par l'augmentation et le maintien à long terme des restitutions de matières organiques au sol.

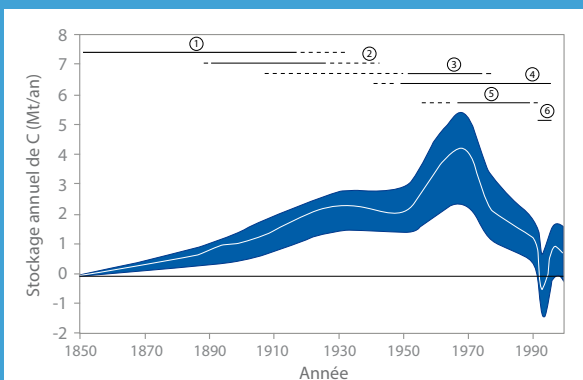


Encadré n° 9

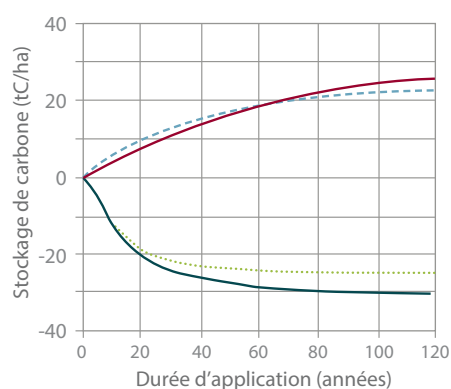
L'USAGE D'UN SOL ET SON INFLUENCE SUR LE STOCKAGE DE CARBONE [49]

L'usage qui est fait d'un sol – cultures, prairie ou forêt – explique l'hétérogénéité du stockage de carbone organique en son sein : les régions dominées par les forêts et prairies se caractérisent par une teneur en carbone organique plus importante comparées aux régions céréalières [53 ; 54]. Le stockage de carbone étant dépendant d'un bilan

entre les entrées et les sorties de carbone de la parcelle, les changements d'usage des sols liés à la mise en place de prairies ou de forêts favorisent le stockage de carbone. Les forêts et les prairies constituent des puits nets de carbone, tandis que les cultures représentent une source de carbone dans tous les pays d'Europe [55].



1. Disparition de la jachère. 2. Hausse des prairies permanentes. 3. Boisement. 4. Augmentation des surfaces artificielles (zones urbaines, routes, industries). 5. Conversion de prairies en cultures. 6. Jachères nues (selon PAC). La zone en couleur correspond à l'amplitude de variation des estimations.



- Culture > Forêt
- - Culture > Prairie
- Forêt > Culture
- ... Prairie > Culture

(accessibilité de ces composés aux micro-organismes...). Les différents travaux de recherche menés sur le sujet mettent notamment en lumière le rôle de l'argile dans la capacité d'un sol à stocker du carbone à long terme [48 ; 68] : une grande partie de la matière organique des sols est physiquement protégée de la décomposition par des minéraux argileux, enveloppés au sein d'agrégats (Figure n° 15) [69]. Le carbone organique ainsi complexé aux argiles est considéré comme du carbone stocké [70]. La

minéralisation demande donc de l'énergie pour dégrader le carbone, qui plus est lorsqu'il se retrouve complexé à une phase minérale. Or, les plantes fournissent la matière organique facilement dégradable à la surface, et en profondeur, le carbone est déjà dégradé et donc récalcitrant (pauvre en énergie). Limités par l'énergie disponible (ou en d'autres termes, la matière organique fraîche facilement dégradable), les micro-organismes exercent une activité restreinte de dégradation, ce qui explique la sta-

bilité du carbone, et donc l'allongement de sa durée de stockage en profondeur [61].

3. Les leviers d'amélioration du stockage de carbone par les prairies

3.1. CONSERVER LES STOCKS EXISTANTS

Tout l'enjeu du stockage de carbone comme outil d'atténuation

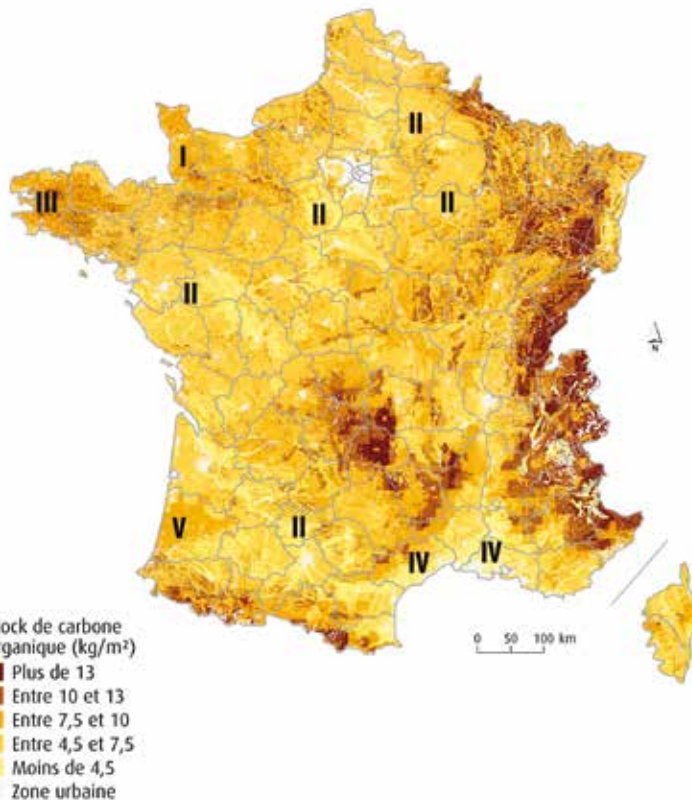


Encadré n° 12

DISTRIBUTION SPATIALE DES QUANTITÉS DE CARBONE ORGANIQUE DU SOL [53]

Les conditions pédoclimatiques expliquent en grande partie la distribution spatiale du carbone en France, principalement à travers le taux de précipitations, la texture du sol et la roche mère [53]. Les conditions humides favorisent le stockage à travers la progression de la couverture végétale : le taux de croissance des plantes augmente, ce qui a pour conséquence d'accroître la production primaire, donc d'apporter plus de matière organique dans le sol. C'est notamment pour cela que les stocks de matière organique sont élevés dans les forêts, les prairies et les pelouses d'altitude, mais par exemple faibles en viticulture et dans les zones méditerranéennes et de cultures [54].

La température présente aussi un effet sur le stockage de carbone, via la faune du sol [76 ; 77]. Sous l'influence d'un climat plus chaud (et sec), l'activité des micro-organismes du sol augmente, favorisant l'accélération de la dégradation de la matière organique, ce qui a pour conséquence d'augmenter la minéralisation et donc les émissions de CO₂ vers l'atmosphère. De plus, des conditions sèches et des vagues de chaleur réduisent la production primaire et entraînent une diminution de la quantité de matière organique entrant dans le sol [78]. Une hausse des températures favorise donc le déstockage de carbone par les sols.



Cette carte montre que le climat et l'utilisation des sols déterminent l'organisation spatiale du carbone organique en France. La plupart des régions montagneuses à fortes précipitations sont caractérisées par une importante teneur en carbone organique. De plus, les faibles concentrations en carbone sont associées aux régions de cultures (II) comme aux vignes méditerranéennes (IV), alors que des concentrations plus élevées sont détectées dans les zones de prairies en Normandie (I) et dans les forêts du Sud-Ouest (Landes, V). En Bretagne (III), les hautes teneurs en carbone organique peuvent être liées aux fortes précipitations ainsi qu'à l'épandage important de déjections sur les sols.



du réchauffement climatique réside dans l'accumulation et le maintien du carbone dans les sols à long terme. Pour y parvenir, deux actions doivent être menées simultanément : **conserver les stocks présents et favoriser un retour de matières organiques dans les sols**. Le fait que la vitesse de déstockage soit plus rapide que celle de stockage (cf. *supra*) implique le maintien des pratiques favorisant le stockage : même une interruption momentanée de ces pratiques (plusieurs années) provoque assez rapidement un relargage de dioxyde de carbone dans l'atmosphère [49 ; 74]. Une seconde conséquence est qu'il peut se révéler plus important de tenter de protéger les stocks existants plutôt que de chercher à en créer de nouveaux [57 ; 75].

3.2. AUGMENTER LES RESTITUTIONS DE CARBONE AU SOL

Les facteurs déterminant la quantité de carbone stocké dans un sol sont : le taux de matière organique entrant dans le sol, son niveau de décomposition, la profondeur à laquelle le carbone organique est transféré et sa protection physique par agrégat ou complexe organo-minéral (Figure n° 16) [68]. Le mode de gestion des prairies va donc avoir une influence sur la capacité du sol à stocker du carbone à long terme [79] : selon l'âge/type de prairie (temporaire ou permanente), son niveau de fertilisation, son utilisation (pâturage, fauche, mixte) et l'intensité de cette utilisation (chargement à l'hectare, nombre de fauches), les quantités

de carbone stockées ne seront pas les mêmes.

■ Par une fertilisation modérée

À travers l'augmentation de la production de fourrage, la fertilisation présente un fort potentiel d'accroissement de la matière organique dans le sol [80]. La Figure n° 17 (page suivante) montre l'influence de la fertilisation azotée sur le stockage de carbone en fonction du type de prairie (permanente ou temporaire) et de l'utilisation qui en est faite (pâturée ou fauchée). Dans chacun des cas, la fertilisation, supérieure à 40 unités par hectare, accroît le stockage.

Au regard des émissions de GES liées à l'utilisation d'engrais minéraux (cf. 1^{re} partie), les apports organiques (déjections animales) sont à privilé-

gier du fait d'un apport (recyclage) de carbone (supplémentaire) sur la parcelle. Ce résultat a été confirmé par le projet européen Catch-C, qui identifie l'apport de fumier comme meilleure pratique de travail du sol dans le cadre de la lutte contre le changement climatique [82]. En ce qui concerne la diversité végétale, l'introduction de légumineuses permet de maintenir les stocks de carbone car elles fixent leur propre azote et le rendent ensuite disponible pour d'autres plantes. Une carence en azote, outre une production primaire faible et des prairies pauvres, peut provoquer un déstockage de carbone car les micro-organismes du sol puisent dans les réserves humiques du sol [83]. À l'inverse une surfertilisation en lien avec un fort usage du couvert végétale (défoliation fréquente) peut

Figure n° 16

Leviers d'augmentation de la matière organique du sol au sein d'un écosystème prairial [68]

Augmenter les entrées de C

1. Accroître la biomasse
Productivité fourragère
Sélection variétale
Fertilisation
Irrigation
Introduction de légumineuses
2. Remplacer une culture annuelle par une culture pérenne
3. Adapter le taux de chargement
4. Introduire des vers de terre
5. Réduire les biodégradations

Matière organique du sol (C, N)

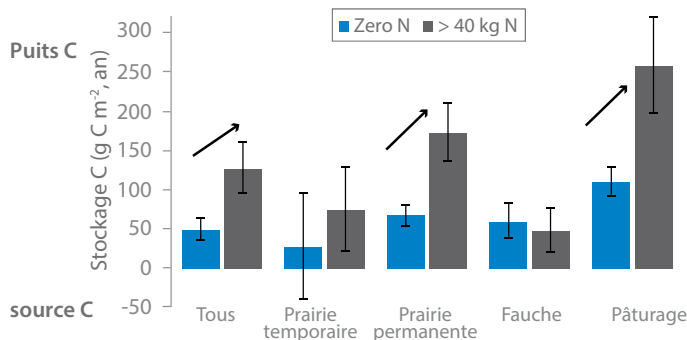
Diminuer les pertes de C

1. Conversion en prairie et allongement de la durée des prairies temporaires
2. Réduire la lixiviation, l'érosion et la minéralisation
3. Fertiliser modérément
4. Améliorer la structure du sol



Figure n° 17

Fertilisation azotée et stockage de carbone par les prairies (adapté de [81])



intensification d'utilisation de la prairie : pâturage, fauche, fertilisation azotée. Les résultats montrent que le pâturage stocke plus que la fauche sans fertilisation du fait d'une plus faible intensité d'utilisation, et que la fauche intensive (avec fertilisation) provoque un déstockage net de carbone (la prairie devient source) [84 ; 85]. Dans le cas d'une poursuite de l'intensification, pour maximiser la production animale, la production de biomasse de la prairie, déjà au maximum, doit être complétée par d'autres aliments. Des prairies ainsi exploitées, de manière très intensive, perdent du carbone.

36

moins alimenter en carbone que la minéralisation et engendrer un déstockage de carbone [72].

■ **Le pâturage, mieux que la fauche**
La Figure n° 19 (page 38) montre le lien entre stockage carbone et

■ **Intensifier modérément les prairies**

Selon les conditions climatiques et en fonction du taux de chargement, une

Encadré n° 14

LE PROGRAMME 4 POUR MILLE

Lancé en mars 2015 à la suite de la conférence Climate Smart Agriculture, le programme 4 pour mille consiste à faire reconnaître l'importance des sols dans les échanges globaux de carbone, au travers de sa capacité de stockage. L'objectif est clair : augmenter les stocks de carbone de tous les sols de 4 ‰ pour compenser les émissions de gaz à effet de serre.

Les stocks, les émissions et les puits annuels

Chaque année environ 4 milliards de tonnes de carbone s'ajoutent dans l'atmosphère. Cette quantité résulte du bilan entre les émissions de gaz à effet de serre et les puits de carbone annuels. Le flux émetteur le plus important se situe au niveau des zones industrielles et urbaines avec environ 9 milliards de tonnes de carbone issues de la combustion

des énergies fossiles et de la production de ciment. À cela s'ajoutent les émissions liées au changement d'affectation des sols et à la déforestation pour 1 milliard de tonnes. Ces émissions sont partiellement compensées par le bilan de la photosynthèse et de la respiration des végétaux (près de 3 milliards de tonnes) ainsi que par la dissolution du carbone dans les océans (2,6 milliards de tonnes).

Le calcul du 4 ‰

Les émissions de GES provenant de l'utilisation de carbone fossile représentent 8,9 milliards de tonnes de carbone. Afin de limiter l'augmentation de température à + 1,5-2 °C, ces émissions devraient être compensées par le stockage du carbone. Les puits de carbone (terrestres et océaniques) sont actuellement de 5,4 Gt C/an, ce qui fait une augmentation du stock de C de 3,5 Gt C/an pour compenser ces émissions.



Encadré n° 14 (suite)

Les stocks de C des sols de la planète jusqu'à 40 cm de profondeur sont de 820 Gt de carbone. La compensation est en conséquence $3,5/820 = 4,3 \text{ ‰}$
 Donc une augmentation de $\approx 4 \text{ ‰}$ des stocks de carbone des sols de la planète aurait un impact majeur sur l'effet de serre (<http://agriculture.gouv.fr/agriculture-et-foret/environnement-et-climat>).

Est-ce que l'objectif est atteignable ?

En France, les stocks moyens sont de 50 t C/ha [54], une augmentation de 4 ‰ correspond à 0,2 t C/ha/an (densité apparente moyenne de 1,3 g/cm³). En regardant les estimations liées aux changements de pratiques [22], une augmentation des stocks de carbone des sol pourrait être faite par :

- ✓ l'implantation de cultures intermédiaires = + 0,24 t C/ha ($\pm 0,11$),
- ✓ l'implantation de semis direct continu = + 0,15 t C/ha ($\pm 0,15$, donc = 0),
- ✓ le labour occasionnel 1 an/5 = 0,10 t C/ha
- ✓ le labour occasionnel 1 an/2 = 0,05 t C/ha

- ✓ durée de vie de prairie temporaire 3 ans = 0,08 t C/ha
- ✓ durée de vie de prairie temporaire 5 ans = 0,25 t C/ha
- ✓ l'implantation d'agroforesterie = + 0,30 t C/ha (0,03 à 0,41 t C/ha).

La contribution de la filière bovine au 4 ‰

Selon une estimation de l'Institut de l'élevage, sur la base d'un stock de carbone de 80 t/ha sous les prairies permanentes mobilisées par l'élevage bovin laitier et viande spécialisée (5,6 Mha hors estive), le stockage additionnel assuré par les prairies et les haies associées représente un **accroissement moyen annuel du taux de carbone de 8 ‰**.

Sur la base d'un stock de carbone de 40 t/ha sous les terres cultivées mobilisées par l'élevage bovin (4,6 Mha), le stockage de carbone des prairies temporaires en rotation avec les cultures annuelles, des haies associées, des cultures intermédiaires, des déjections animales et le déstockage de carbone associé à une conversion de prairies permanentes en terres cultivées permet un **accroissement moyen annuel du taux de carbone de 2,7 ‰**.

Stocks dans les sols, émissions et puits annuels de carbone

(adapté de Martial Bernoux, données issues de [91])

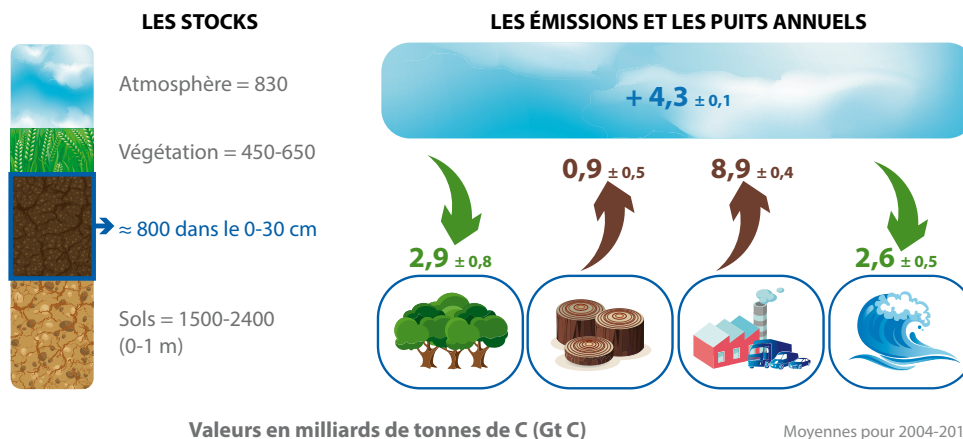
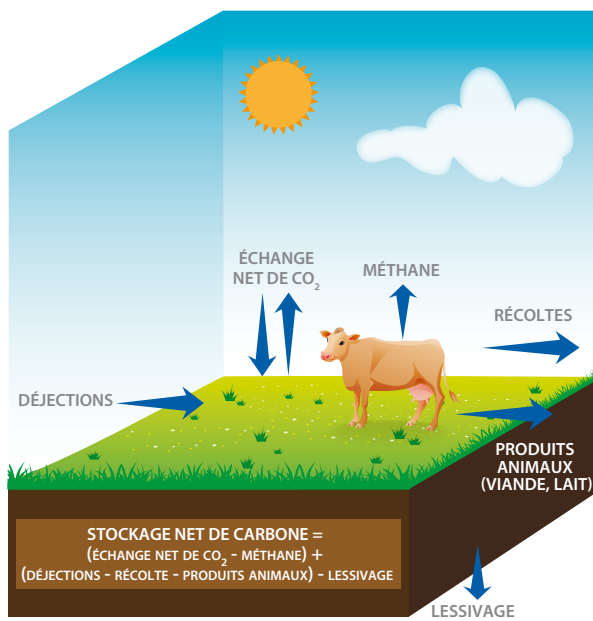




Figure n° 18

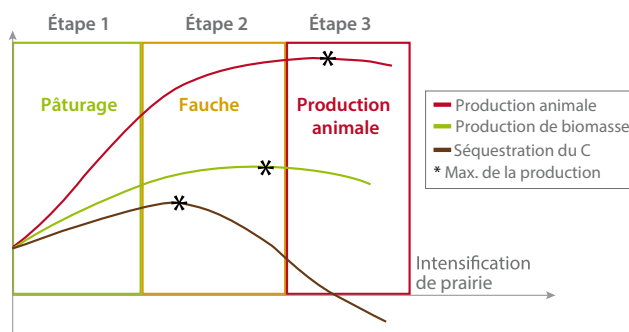
Bilan carbone de l'écosystème prairial [83; 85]



prairie peut tendre vers la « neutralité carbone », c'est-à-dire la compensation par son stockage des émissions de méthane entérique et de protoxyde d'azote lié au sol [86] : en considérant l'apport de déjections animales sur la parcelle, et une durée de pâturage de 200 jours, le chargement optimal pour atteindre une prairie « neutre en carbone » est de 1,2 UGB/ha pour 200 jours de pâturage. Au niveau national, l'intensification modérée des prairies permanentes peu productives (pacages, alpages et landes) permet d'accroître le stockage de carbone en stimulant la production végétale par un prélèvement d'herbe modéré et un apport accru de déjections [87]. Pendant la première étape de l'intensification, les gains de production sont associés à une augmentation du stockage de carbone par le sol [81]. Cependant, plus d'intensification amène à réduire les stocks de carbone et très rapidement à détériorer la balance GES de la prairie.

Figure n° 19

Effet de l'intensification de l'utilisation de la prairie sur la production animale, la biomasse et le stockage de carbone (adapté de [81])



Allonger la durée des prairies temporaires

La mise en culture d'une prairie conduit au déstockage du carbone du sol. Une augmentation de la durée de vie des prairies temporaires (50 % des prairies temporaires françaises ont une durée de vie inférieure à deux ans selon Agreste 2010) prolonge la phase de stockage de carbone grâce à la réduction de la fréquence de retournement [87; 72].

3.3. PEU D'INFLUENCE DU LABOUR

Concernant le travail du sol et l'avantage des techniques simplifiées pour



augmenter le stockage de carbone, les études montrent qu'il est plus efficace d'accroître les entrées de matière organique, par implantation d'espèces ligneuses 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 [88]. Même si la plupart des comparaisons entre les systèmes de travail du sol conventionnels (labour) et les techniques culturales simplifiées (TCS) montrent une augmentation des teneurs en matière organique des couches les plus superficielles du sol avec l'abandon du labour [89], le plus

souvent les teneurs en profondeur restent comparables et montrent même parfois une inversion de tendance [57]. Néanmoins, une augmentation de la fréquence des cultures (avec diversité des cultures et des rotations) semblerait stocker du carbone supplémentaire (11 %) dans les couches 0-60 cm [90].

Conclusion

L'élevage de ruminants et la production de viande bovine et ovine exercent deux influences sur le climat. À travers l'émission de gaz à effet de serre, tels que le méthane, le protoxyde d'azote et le dioxyde de carbone, l'activité d'élevage de ruminants contribue au réchauffement climatique comme tout secteur d'activité. En termes de proportion, la participation du sous-secteur économique que représente l'élevage s'élève à 5 % des émissions mondiales et européennes et à 9 % des émissions françaises (en moyenne, la moitié des émissions du secteur agricole). Pour réduire cette contribution, des leviers existent : d'abord travailler sur l'optimisation du système de production et son efficacité – leviers gagnant-gagnant avec les performances économiques – puis appliquer des leviers techniques spécifiques de réduction. Alors que la modification de la ration alimentaire semble être peu adaptée dans le cas des élevages allaitants de ruminants (taux d'herbe important, pâturage fréquent et non-concurrence alimentaire avec l'Homme), la gestion des déjections et le pâturage représentent des étapes clés dans la lutte contre le réchauffement climatique.

La seconde influence sur le climat concerne l'absorption de gaz à effet de serre à travers le stockage de carbone dans les sols des prairies. Fruit de la photosynthèse et de la respiration, le stockage de carbone

constitue un levier d'atténuation du changement climatique : tant que le carbone est piégé dans le sol, il ne rejoint pas l'atmosphère et ne participe donc pas à augmenter l'effet de réchauffement. Stockage et déstockage étant des flux continus qui se déroulent à des vitesses différentes, tout l'enjeu d'atténuation climatique réside dans l'accumulation et le maintien de carbone dans les sols à long terme : la conservation des stocks de carbone déjà existants dans les sols est tout aussi importante que l'augmentation de la capacité de stockage des prairies. Là aussi, des leviers sont identifiés pour améliorer le stockage, tant sur la fertilisation que sur l'utilisation de la prairie (pâturage, fauche) et son intensité (chargement à l'hectare, nombre de fauches).

Qu'il s'agisse de la neutralité carbone au niveau d'une prairie ou du programme 4 pour mille pour la planète, le stockage de carbone est aujourd'hui suffisamment compris pour être reconnu comme levier de compensation des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, sa prise en compte dans l'évaluation de la contribution de l'élevage de ruminants au changement climatique n'est toujours pas effective, alors qu'elle constitue un élément indispensable à la réalisation du bilan de l'influence climatique et à un calcul rigoureux de l'empreinte carbone de la viande bovine et ovine.



BIBLIOGRAPHIE

- 1. Journet M., Dulphy J.P., Geay Y., Liénard G., 2013.** Les herbivores et la planète, *Courrier de l'Environnement* 63, 87-102.
- 2. Popova M., Morgavi D.P., Doreau M., Martin C., 2011.** Production de méthane et interactions microbiennes dans le rumen. *INRA Prod. Anim.* 5, 447-460.
- 3. Buddle B.M., Denis M., Attwood G.T., Altermann E., Janssen P.H., Ronimus R.S., Pinares-Patiño C.S., Muetzel S., Wedlock D.N., 2011.** Strategies to Reduce Methane Emissions from Farmed Ruminants Grazing on Pasture – Review. *The Veterinary Journal* 188, 11-17.
- 4. Académie des technologies, 2014.** Le méthane : d'où vient-il et quel est son impact sur le climat ? Rapport. EDP Sciences, 170 p.
- 5. Gac A., Béline F. Bioteau T., Maguet K., 2007.** A French Inventory of Gaseous Emissions (CH_4 , N_2O , NH_3) from Livestock Manure Management Using a Mass-Flow Approach. *Livestock Science* 112, 252-260.
- 6. Mosier A., Kroeze C., Nevison C., Oenema O., Seitzinger S., van Cleemput O., 1998.** Closing the Global N_2O Budget: Nitrous Oxide Emissions through the Agricultural Nitrogen Cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 52, 225-248.
- 7. INRA, 2015.** Le climat change, la nature et l'agriculture aussi. Éditions INRA.
- 8. IPCC, 2014.** Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- 9. CITEPA, 2015.** Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Format SECTEN
- 10. Gerber P.J., Steinfeld H., Henderson B., Mottet A., Opio C., Dijkman J., Faluccci A., Tempio G., 2013.** Tackling Climate Change through Livestock – A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- 11. Tubiello F., Salvatore M., Córdor Golec R.D., Ferrara A., Rossi S., Biancalani R., Federici S., Jacobs H., Flammini A., 2014.** Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks. 1990 – 2011 Analysis. ESS Working Paper No. 2, Mar 2014, FAO, Rome.
- 12. Gac A., Agabriel J., Dollé J.-B., Faverdin P., Van Der Werf H., 2014.** Le potentiel d'atténuation des gaz à effet de serre en productions bovines. *Innovations Agronomiques* 37, 67-81.
- 13. Smith P., Bustamante M., Ahammad H., Clark H., Dong H., Elsiddig E.A., Haberl H., Harper R., House J., Jafari M., Masera O., Mbow C., Ravindranath N.H., Rice C.W., Robledo Abad C., Romanovskaya A., Sperling F., Tubiello F., 2014.** Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 14. EEA, 2015.** GHG Data Viewer (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>).
- 15. Weiss F., Leip A., 2012.** Greenhouse Gas Emissions from the EU Livestock Sector: A Life Cycle Assessment



Carried out with the CAPRI Model. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 149, 124-134.

16. Agribalyse® version 1.2, mars 2015. www.ademe.fr/agribalyse.

17. Gac A., Lorinquer E., Moreau S., Manneville V., Dollé J.-B., Château L., Devillers P.H., 2015. Empreinte environnementale des viandes bovines et ovines françaises et étrangères : revue bibliographique et évaluations des impacts environnementaux potentiels. Coll. Résultats, Institut de l'Élevage, 178 p.

18. Dollé J.-B., Moreau S., Brocas C., Gac A., Raynal J., Duclos A., 2015. Élevage de ruminants et changement climatique. Institut de l'Élevage, Coll. L'Essentiel.

19. Bechu T., Dollé J.-B., Gac A., Leclerc M.-C., Lorinquer E., Manneville V., Moreau S., Guinot C., Orlianges M., 2014. Comprendre les enjeux environnementaux de l'élevage ovin : un Vademecum pour la filière allaitante. Institut de l'Élevage, 24 p.

20. Moreau S., Devun J., Manneville V., 2013. Concilier production et environnement en systèmes bovins allaitants : état des lieux et pistes de progrès, Institut de l'Élevage, 12 p.

21. Devun J., Brunshwig P., Guinot C., 2012. Alimentation des bovins : rations moyennes et autonomie alimentaire. Institut de l'Élevage, Coll. Résultats.

22. 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. Rapport d'étude, INRA (France), 454 p.

23. Hristov A.N., Oh J., Firkins J.L., Dijkstra J., Kebreab E., Waghorn G. et al., 2013. Special Topics—Mitigation of Methane and Nitrous Oxide Emissions from Animal Operations: I. A Review of Enteric Methane Mitigation Options. *J Anim Sci* 91, 5045-5069.

24. Doreau M., Martin C., Eugène M., Popova M., Morgavi D.P., 2011. Leviers d'action pour réduire la production de méthane entérique par les ruminants. In: Gaz à effet de serre en élevage bovin : le méthane. Doreau M., Baumont R., Perez J.M. (Eds). Dossier, INRA *Prod. Anim.* 24, 461-474.

25. Jousseins C., Tchakérian E., Morin E., de Boissieu C., Turini T., 2014. Alimentation des ovins : rations moyennes et autonomie alimentaire. Institut de l'Élevage, Coll. Résultats.

26. Doreau M., van der Werf H., Micol D., Dubroeuq H., Agabriel J., Rochette Y., Martin C., 2011. Enteric Methane Production and Greenhouse Gases Balance of Diets Differing in Concentrate in the Fattening Phase of a Beef Production System. *J Anim Sci* 89, 2518-2528.

27. Hristov A.N., Oh J., Giallongo F., Frederick T.W., Harper M.T., Weeks H.L., Branco A.F., Moate P.J., Deighton M.H., Williams R.O., Kindermann M., Duval S., 2015. An Inhibitor Persistently Decreased Enteric Methane Emission from Dairy Cows with No Negative Effect on Milk Production. *PNAS* 34, 10663-10668

28. Beauchemin K.A., Kreuzer M., O'Mara F., McAllister T.A., 2008. Nutritional management for enteric methane abatement : a review. *Aust. J. Ep. Agric.* 48, 21-27.

29. Huyghe C., 2009. La multifonctionnalité des prairies en France – II. Conciliation des fonctions de production et de préservation de l'environnement. Synthèse, *Cah. Agric.* 18, 7-16.



- 30. Cieslak A., Zmora P., Pers-Kamczyc E., Szumacher-Strabel M., 2012.** Effects of Tannins Source (*Vaccinium vitis idaea* L.) on Rumen Microbial Fermentation in Vivo. *Animal Feed Science and Technology* 176, 102-106.
- 31. Grainger C., Clarke T., Auldist M.J., Beauchemin K.A., McGinn S.M., Waghorn G.C., et al., 2009.** Potential Use of *Acacia mearnsii* Condensed Tannins to Reduce Methane Emissions and Nitrogen Excretion from Grazing Dairy Cows. *Can. J. Anim. Sci.* 89, 241-251.
- 32. Cassandro M., Mele M., Stefanon B., 2013.** Genetic Aspect of Enteric Methane Emission in Livestock Ruminants. *Ital. J. Anim. Sci.*, 73, 450-458.
- 33. de Haas Y., Windig J.J., Calus M.P.L., Dijkstra J., de Haan M., Bannink A., Veerkamp R.F., 2011.** Genetic Parameters for Predicted Methane Production and Potential for Reducing Enteric Emissions through Genomic Selection. *J. Dairy Sci.* 94:6122-6134.
- 34. Hristov A.N., Ott T., Tricario J., Rotz A., Waghorn G., Adesogan A., Dijkstra J., Montes F., Oh J., Kebreab E., Oosting S.J., Gerber P.J., Henderson B., Makkar H.P.S., Firkins J.L., 2014.** Special Topics—Mitigation of Methane and Nitrous Oxide Emissions from Animal Operations: III. A Review of Animal Management Mitigation Options. *J Anim Sci* 91:5095-5113
- 35. Ademe, 2015.** Fiches Références Agriculture & Environnement.
- 36. Tubiello F., Loudjani P., 2010.** Technological Abatement Measures for Livestock Rearing Emissions. In: Evaluation of the Livestock Sector's Contribution to the EU Greenhouse Gas Emissions (GGELS) – Final Report (eds Leip A., Weiss F., Wassenaar T., Perez I., Fellmann T., Loudjani P., Tubiello F., Grandgirard D., Monni S., Biala K.), pp. 190-199. JRC European Commission, Ispra, Italy.
- 37. Dollé J.-B., Agabriel J., Peyraud J.-L., Faverdin P., Manneville V., Raison C., Gac A., Le Gall A., 2011.** Les gaz à effet de serre en élevage bovin: évaluation et leviers d'action. In: Gaz à effet de serre en élevage bovin: le méthane. Doreau M., Baumont R., Perez J.M. (Eds). Dossier, INRA *Prod. Anim.* 24, 415-432.
- 38. Martin E., Mathias E., 2013.** Analyse du potentiel de 10 actions de réduction des émissions d'ammoniac des élevages français aux horizons 2020 et 2030 – Synthèse. Éd ADEME, Angers, France.14 p.
- 39. Montes F., Meinen R., Dell C., Rotz A., Hristov A. N., Oh J., Waghorn G., Gerber P. J., Henderson B., Makkar H.P.S., 2013.** Mitigation of Methane and Nitrous Oxide Emissions from Animal Operations: II. A Review of Manure Management Options. *J. Anim. Sci.* 91, 5070–5094.
- 40. Newell Price J.P., Harris D., Taylor M., Williams J.R., Anthony S.G., Duethmann D., Gooday R.D., Lord E.I., Chambers B.J., Chadwick D.R., Misselbrook T.H., 2011.** An Inventory of Mitigation Methods and Guide to their Effects on Diffuse Water Pollution, Greenhouse Gas Emissions and Ammonia Emissions from Agriculture. Prepared as part of Defra Project WQ0106.
- 41. Oenema O., Velthof G., 2012.** Emissions from Agriculture and their Control Potentials - TSAP Report #3 - Version 2.1.
- 42. CNE, 2013.** Élevages herbivores et énergies renouvelables: pour le développement du solaire photovoltaïque. Note, 4 p.
- 43. CGAAER, 2015.** Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique. Rapport de synthèse, 51 p.



- 44. Meier Wawrzyniak V., Viard N., 2009.** La méthanisation en voie sèche: fonctionnement biologique, technique et état des lieux des technologies disponibles. Rapport Trame, Paris. 106 p.
- 45. Peyraud J.-L., Cellier P., Donnars C., Réchauchère O., 2012.** Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA, 68 p.
- 46. Peyraud J.-L., Dupraz P., Samson E., Le Gall A., Delaby L., 2010.** Produire du lait en maximisant le pâturage pour concilier performances économiques et environnementales. *Renc. Rech. Rum.* 17, 17-24.
- 47. Eckard R.J., Grainger C., de Klein C.A.M., 2010.** Options for the Abatement of Methane and Nitrous Oxide from Ruminant Production: A review. *Livestock Science* 130, 47-56.
- 48. Arrouays D., Stengel P., Balesdent J., Soussana J.-F., Jayet P.-A., Germon J.C., Guichard L., 2002.** Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? INRA Expertise Scientifique Collective: INRA Éditions.
- 49. Seguin B., Arrouays D., Balesdent J., Soussana J.-F., Bondeau A., Smith P., Zaehle S., de Noblet N., Viovy N., 2007.** Moderating the Impact of Agriculture on Climate. *Agricultural and Forest Meteorology* 142, 278-287.
- 50. Balesdent J., Chenu C., Balabane M., 2000.** Relationship of Soil Organic Matter Dynamics to Physical Protection and Tillage. *Soil & Tillage Research* 53, 215-230.
- 51. Six J., Callewaert P., Lenders S., De Gryze S., Morris S.J., Gregorich E.G., Paul E.A., Paustian K., 2002.** Measuring and Understanding Carbon Storage in Afforested Soils by Physical Fractionation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1981-1987.
- 52. Loiseau P., Louault F., Le Roux X., Bardy M., 2005.** Does Extensification of Rich Grasslands Alter the C and N Cycles, Directly or Via Species Composition? *Basic and Applied Ecology* 6, 275-287.
- 53. Meersmans J., Martin M.P., Lacarce E., De Baets S., Jolivet C., Boulonne L., Lehmann S., Philippe N., Saby A., Bispo A., Arrouays D., 2012.** A High Resolution Map of French Soil Organic Carbon. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 841-851.
- 54. GIS Sol (2011).** L'état des sols de France, Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.
- 55. Janssens I.A., Freibauer A., Schlamadinger B., Ceulemans R., Ciais P., Dolman A.J., Heimann M., Nabuurs G.-J., Smith P., Valentini R., Schulze E.-D., 2005.** The Carbon Budget of Terrestrial Ecosystems at Country-Scale – a European Study. *Biogeosciences* 2, 15-26.
- 56. 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 Manage.* 20, 219-230.
- 57. Arrouays D., 2008.** Changement climatique et évolution du stockage de carbone dans les sols: enjeux et incertitudes. *OCL* 5, 314-316.
- 58. Poeplau C., Don A., Vesterdal L., et al. 2011.** Temporal Dynamics of Soil Organic Carbon after Land-Use Change in the Temperate Zone-Carbon Response Functions as a Model Approach. *Global Change Biology* 17, 2415-2427.
- 59. Schimel D.S., Braswell B.H., Holland E.A., McKeown R., Ojima D.S., Painter T.H., Parton W.J., Townsend A.R., 1994.** Climatic, Edaphic, and Biotic Controls over Storage Turnover of Carbon in Soils. *Global Biogeochem. Cycles* 8, 279-293.



- 60. Kirschbaum M.U.F., 1994.** The Temperature Dependence of Soil Organic Matter Decomposition, and the Effect of Global Warming on Soil Organic C Storage. *Soil Biol. Biochem.* 27, 753-760.
- 61. 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.
- 62. Beniston J.W., DuPont S.T., Glover J.D., Lal R., Dungait J.A.J., 2014.** Soil Organic Carbon Dynamics 75 Years after Land-Use Change in Perennial Grassland and Annual Wheat Agricultural Systems. *Biogeochemistry* 120, 37-49.
- 63. Rasse D.P., Mulder J., Moni C., Chenu C., 2006.** Carbon Turnover Kinetics with Depth in a French Loamy Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 2097-2105.
- 64. Kindler R. et al. 2011.** Dissolved Carbon Leaching from Soil is a Crucial Component of the Net Ecosystem Carbon Balance. *Global Change Biology* 17, 1167-1185.
- 65. Martel Y.A., Paul E.A., 1974.** The Use of Radiocarbon Dating of Organic Matter in the Study of Soil Genesis. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38, 501-506.
- 66. Schöning I., Kögel-Knabner I., 2006.** Chemical Composition of Young and Old Carbon Pools Throughout Cambisol and Luvisol Profiles under Forests. *Soil Biol. Biochem.* 38, 2411-2424.
- 67. Balesdent J. et Recous S., 1997.** Les temps de résidence du carbone et le potentiel de stockage de carbone dans quelques sols cultivés français. *Canadian Journal of Soil Science* 77, 187-193.
- 68. Jones M.B., Donnelly A., 2004.** Carbon Sequestration in Temperate Grassland Ecosystems and the Influence of Management, Climate and Elevated CO₂. *New Phytologist* 164, 423-439.
- 69. John B., Yamashita T., Ludwig B., Flessa H., 2005.** Storage of Organic Carbon in Aggregate and Density Fractions of Silty Soils under Different Types of Land Use. *Geoderma* 128, 63-79.
- 70. Dexter A.R., Richard G., Arrouays D., Czyz E.A., Jolivet C., Duval O., 2008.** Complexed Organic Matter Controls Physical Soil Properties. *Geoderma* 144, 620-7.
- 71. Soussana J.-F., Klumpp K., 2014.** Mitigating GHG Emissions from Ruminant Livestock Systems through the Management of Carbon Sequestration in Grasslands. Proceedings of the Livestock, Climate Change and Food Security Conference, Madrid, Spain, p. 80.
- 72. Dollé J.-B., Faverdin P., Agabriel J., Sauvant D., Klumpp K., 2013.** Contribution de l'élevage bovin aux émissions de GES et au stockage de carbone selon les systèmes de production. *Fourrages* 215, 181-191.
- 73. Ademe, 2014.** Carbone organique des sols – L'énergie de l'agro-écologie, une solution pour le climat.
- 74. Freibauer A., Rounsevell M.D.A., Smith P., Verhagen J., 2004.** Carbon Sequestration in the Agricultural Soils of Europe. *Geoderma* 122, 1-23.
- 75. Smith P., 2014.** Do Grasslands Act as a Perpetual Sink for Carbon? *Global Change Biology* 20, 2708-2711.
- 76. Hobbie S.E., 1996.** Temperature and Plant Species Control over Litter Decomposition in Alaskan Tundra. *Ecological Monograph* 66, 503-522.
- 77. Trumbore S. E., Chadwick O. A., Amundson R., 1996.** Rapid Exchange between Soil Carbon and Atmospheric Carbon Dioxide Driven by Temperature Change. *Science* 270, 393-396.
- 78. Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Oge J., Allard V., Aubinet M., Buchmann N., Bern-**



- hofer C., Carrara A., Chevallier F., De Noblet N., Friend A.D., Friedlingstein P., Grunwald T., Heinesch B., Keronen P., Knohl A., Krinner G., Loustau D., Manca G., Matteucci G., Miglietta F., Ourcival J.-M., Papale D., Pilegaard K., Rambal S., Seufert G., Soussana J.-F., Sanz M.J., Schulze E.D., Vesala T., Valentini R., 2005. Europe-Wide Reduction in Primary Productivity Caused by the Heat and Drought in 2003. *Nature* 433, 529-533.
79. Mcsheery M. and Richie M., 2013. Effects of Grazing on Grassland Soil Carbon : a Global Review. *Global Change Biology* 19, 1347-1357.
80. Conant R.T., Paustian K., Elliott E.T., 2001. Grassland Management and Conversion into Grassland : Effects on Soil Carbon. *Ecological Applications* 11, 343-355.
81. Soussana J.-F., Lemaire G., 2014. Coupling Carbon and Nitrogen Cycles for Environmentally Sustainable Intensification of Grasslands and Crop-Livestock Systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 190, 9-17.
82. Spiegel H., Zavattaro L., Guzmán G., D'Hose T., Pecio A., Schlatter N., ten Berge H., Grignani C., 2014. Impacts of Soil Management Practices on Crop Productivity, on Indicators for Climate Change Mitigation, and on the Chemical, Physical and Biological Quality of Soil. Deliverable reference number : D3.371. Compatibility of Agricultural Management Practices and Types of Farming in the EU to enhance Climate Change Mitigation and Soil Health. *FP7 n° 289782*
83. Allard V., Soussana J.-F., Falcimagne R., Berbigier P., Bonnefond J.M., Ceschia E., D'hour P., Hénault C., Laville P., Martin C., Pinarès-Patino C., 2007. The Role of Grazing Management for the Net Biome Productivity and Greenhouse Gas Budget (CO₂, N₂O and CH₄) of Semi-Natural Grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 121, 47-58.
84. Pinter K., Balogh J., Konez P., Hidy D., Cserhalmi D., Papp M., Foti S., Nagy Z., Chabbi A., 2014. Carbon Sink Activity of Grasslands May Be Stronger Under Grazing than Under Mowing: Results from a Paired Eddy Flux Towers Experiment. Proceedings of the Livestock, Climate Change and Food Security Conference, Madrid, Spain, p. 79.
85. 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.
86. Soussana J.-F., Klumpp K., Ehrhardt F., 2014. The Role of Grassland in Mitigating Climate Change. Proceedings of EGF at 50: The future of European grasslands, *Grassland Science in Europe* 19, 75-87.
87. Klumpp K. 2013. Optimiser la gestion des prairies pour favoriser le stockage de carbone et réduire les émissions de N₂O. Eds S. Pellerin et al. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? (France), Chp 6.
88. Chenu C., Klumpp K., Bispo A., Angers D., Colenne C., Metay A., 2014. Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. *Innovations Agronomiques* 37, 23-37.
89. 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.
90. Luo Z., Wang E., Osbert J.S., 2010. Can No-Tillage Stimulate Carbon Sequestration in Agricultural Soils? A Meta-Analysis of Paired Experiments. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139, 224-231.



91. Le Quéré C., Moriarty R., Andrew R. M., Peters G.P., Ciais P., Friedlingstein P., Jones S.D., Sitch S., Tans P., Arneeth A., Boden T.A., Bopp L., Bozec Y., Canadell J.G., Chevallier F., Cosca C.E., Harris I., Hoppema M., Houghton R.A., House J.I., Jain A., Johannessen T., Kato E., Keeling R.F., Kitidis V., Klein Goldewijk K., Koven C., Landa C.S., Landschützer P., Lenton A., Lima I.D., Marland G., Mathis J.T., Metzl N., Nojiri Y., Olsen A., Ono T., Peters W., Pfeil B., Poulter B., Raupach M.R., Regnier P., Rödenbeck C., Saito S., Salisbury J. E., Schuster U., Schwinger J., Séférian R., Segschneider J., Steinhoff T., Stocker B.D., Sutton A.J., Takahashi T., Tilbrook B., van der Werf H.G.R., Viovy N., Wang Y.P., Wanninkhof R., Wiltshire A., and Zeng N., 2014. Global Carbon Budget 2014, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* 7, 521-610.



GLOSSAIRE

Aérobic: se dit de micro-organismes ou de réactions chimiques qui nécessitent de l'oxygène pour se multiplier ou se produire.

Allaitant(e): qui allaite les veaux pour la production de viande. Peut se dire d'une vache ou d'un élevage dont l'objectif de production est la viande.

Amendant: qui améliore ou rééquilibre la structure du sol et l'enrichit de manière diffuse, sur le long terme. Se différencie du fertilisant qui agit à court terme pour favoriser ou accélérer la pousse des végétaux et leur floraison.

Anaérobic: se dit de micro-organismes ou de réactions chimiques qui se multiplient ou se produisent en l'absence d'oxygène.

Anthropique: qui résulte de l'activité humaine.

Biomasse: désigne la masse totale des êtres vivants, végétaux comme animaux, qui occupe un milieu naturel défini et stable. Peut aussi s'employer dans le domaine de l'énergie pour désigner tout matériel végétal ou animal utilisé à des fins énergétiques.

Biosphère: ensemble des êtres vivants et leurs milieux.

Concentrés: se dit des aliments d'origine végétale et minérale, riches en protéines (tourteaux), en énergie (céréales, maïs, pulpes de betteraves) ou minéraux (calcium, phosphore ajoutés au fourrage ou sous forme de « pierre à lécher ») qui viennent compléter les fourrages pour équilibrer la ration.

Coproduit: matière créée en même temps que le produit principal au cours d'un même processus de fabrication (ex: huile et tourteau).

Dénitrification: décomposition des nitrates du sol en nitrites puis en azote élémentaire, qui rend à l'atmosphère une partie de l'azote qui avait été fixé.

Efficacité et efficience: l'efficience est la mise en œuvre de moyens de manière optimale pour atteindre le résultat escompté. L'efficacité atteint le résultat, peu importe les moyens utilisés.

Effluent: au sens strict, en élevage, les effluents sont le fumier (litière, urine, excréments), le lisier (urine et excréments purs) et le purin (jus s'écoulant des fumiers).

Ensilage: procédé de conservation des fourrages frais par voie humide utilisant la fermentation lactique anaérobie.

Fermentation: transformation que subissent certaines matières organiques sous l'action d'enzymes secrétées par des micro-organismes.

Fourrage: matière végétale constituée par la partie aérienne de certaines plantes, servant d'alimentation aux animaux après avoir été coupée et conservée (foin, ensilage) ou immédiatement après avoir été fauchée (fourrage vert).

Humus: couche supérieure du sol composée de matière organique décomposée présente dans le sol sous forme plus ou moins élaborée.

Hygiénisé: qui est débarrassé de tout agent pathogène.

Lithosphère: partie superficielle de la Terre, comprenant la croûte et une partie du manteau, formant les plaques rigides océaniques et continentales (tectonique).

Matière organique (MO): ensemble hétérogène constitué de feuilles mortes, de débris végétaux en cours de décomposition, de résidus de cultures, de racines vivantes, d'animaux de tailles diverses.

Minéralisation: dégradation des molécules organiques qui conduit à la libération de molécules inorganiques (minérales).



Nitrification: oxydation biochimique de l'azote ammoniacal contenu dans le sol en azote nitrique (nitrate) assimilable par les plantes.

Niveau 2/Tier 2: dans les inventaires gaz à effet de serre réalisés par le Giec, plusieurs niveaux de précision existent concernant le calcul des facteurs d'émission. Alors que le niveau 1 utilise un facteur d'émission par défaut (*i.e.* proposé par le Giec) pour tous les pays, le niveau 2 augmente la précision de l'évaluation grâce à un facteur d'émission spécifique au pays, et ce, pour chaque gaz.

Organique: qui contient du carbone et provient directement ou indirectement de tissus ou d'organismes.

Pâturer: prendre sa nourriture dans les champs, sur les parcours, en forêt, etc. Le pâturage peut aussi bien désigner l'action de pâturer, que les terrains, notamment les prairies, où pâture le bétail.

Pédoclimatique: relatif au climat interne du sol, caractérisé par les conditions saisonnières de température, d'hydromorphie, d'aération, de pression partielle en CO₂.

Poids vif, poids de carcasse, viande nette commercialisable: le poids vif (*vide*) correspond à la masse du corps de l'animal vivant avant abattage. Le poids de carcasse (*froide*) est la masse après l'abattage (rendement abattage = 54 %). La viande nette commercialisable constitue la masse de viande débarrassée des os, gras et déchets (rendement de découpe = 68 %). Cette dernière est conditionnée puis transportée jusqu'au réseau de distribution afin d'être vendu.

Potentiel de réchauffement global (PRG): indicateur définissant la capacité d'un gaz à absorber les rayons infrarouges émis par la Terre, sur une durée de 100 ans. Il sert à regrouper sous une seule valeur l'effet cumulé de toutes les substances contribuant à l'accroissement de l'effet de serre.

Protocole de Kyoto: accord international visant la réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'aide d'objectifs obligatoires pour les pays économiquement forts qui l'ont accepté. Le texte du Protocole de Kyoto, adopté à l'unanimité le 11 décembre 1997 et entré en vigueur le 16 février 2005, précise les engagements assignés à chaque État signataire. La France et l'Union européenne l'ont approuvé le 31 mai 2002.

Ruminant: mammifère ongulé, possédant à chaque patte deux doigts principaux égaux, dont l'estomac est subdivisé en plusieurs compartiments et qui pratique la rumination avec mastication retardée.

Rumination: Action de ramener dans la bouche, pour les mâcher, les aliments qui ont déjà séjourné dans le rumen.

Rumen: une des quatre poches de l'estomac des mammifères ruminants, qui sert à l'accumulation de la nourriture. Appelé aussi panse, le rumen est en fait un des trois pré-estomacs placés en avant de la caillette, l'estomac vrai.

Sédiments: dépôt meuble laissé par les eaux, le vent et les autres agents d'érosion et qui, selon son origine, peut être fluviatile, glaciaire, lacustre ou marin.

Tourteaux: coproduit solide obtenu après extraction de l'huile des graines oléagineuses. En France, les principaux tourteaux utilisés en élevage sont ceux de soja, de colza, de tournesol ou de lin.

Unité gros bétail (UGB): unité employée pour comparer ou agréger des effectifs animaux d'espèces ou de catégories différentes.

Viande transformée: correspond à la viande nette commercialisable, c'est-à-dire prête à être vendue au consommateur.



ACRONYMES

ACV: Analyse de cycle de vie

Ademe: Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

C: Carbone

Casdar: Compte d'affectation spéciale « développement agricole et rural »

Citepa: Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique

CGAAER: Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux

CO₂e: Équivalent CO₂

EEA: Agence européenne de l'environnement (European Environment Agency)

FAO: Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

FAOSTAT: Division statistiques de la FAO

GES: Gaz à effet de serre

Giec: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Gt: Gigatonne ou milliard de tonnes

Ha: Hectare

Inra: Institut national de la recherche agronomique

JB: Jeune bovin

JRC: Joint Research Centre – Service scientifique et technique de la Commission européenne

Kec/tec: Kilogramme équivalent carcasse/tonne équivalent carcasse

Kg_{vv}: Kilogramme de viande vive

Mha: Million d'hectares

Mt: Mégatonne ou million de tonnes

N: Azote

NE: Naisseur-engraisseur

PRG: Potentiel de réchauffement global

TCS: Techniques culturales simplifiées

UGB: Unité gros bétail

UTCf: Utilisation des terres, leurs changements et la forêt (**UTC:** Utilisation des terres et leurs changements)



+ LIEN UTILES

50

Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie): www.ademe.fr

Citepa (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique): www.citepa.org

CIV (Viande, Sciences et Société): www.civ-viande.org

EEA (Agence européenne de l'environnement): www.ea.europa.eu

FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture): www.fao.org

FranceAgriMer (Établissement national des produits de l'agriculture et de la mer): www.franceagrimer.fr

Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat): www.ipcc.ch

GIS Sol (Groupement d'intérêt scientifique consacré à l'étude du sol): www.gissol.fr

Idele (Institut de l'élevage): www.idele.fr

Inra (Institut national de la recherche agronomique): www.inra.fr

Interbev (Association nationale interprofessionnelle du bétail et des viandes): www.interbev.fr

JRC (Joint Research Centre – Service scientifique et technique de la Commission européenne): www.ec.europa.eu/jrc

Ministère de l'Agriculture: www.agriculture.gouv.fr

SOeS (Service statistique du ministère du Développement durable): www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr



Le CIV – Viande, Sciences et Société – est une association de loi 1901 qui a pour mission de contribuer, sur une base scientifique, à la connaissance et à la mise en débat des questions sociétales relevant des filières élevage et viande (bœuf, veau, agneau, chèvre, porc, viande chevaline et produits tripiers). Sont particulièrement traitées les questions de sécurité sanitaire, santé et bien-être animal, nutrition et alimentation humaine, impacts environnementaux et sociétaux.

Sur ces sujets, le CIV produit une information reposant sur une veille et une analyse des tendances techniques, scientifiques et sociales, et sur des collaborations avec des acteurs publics, privés et de la société civile reconnus pour la solidité de leurs approches. Cette information est destinée à des publics professionnels ou avertis, intéressés ou concernés par les impacts sociétaux de la production et de la consommation des viandes.

Le CIV combine ainsi des fonctions d'édition de documents scientifiques, de mise à jour d'un site internet faisant office de centre de ressources documentaires, d'animation de débats et participation à des conférences, congrès et événements scientifiques.

Créé en 1987, à l'initiative conjointe d'Interbev (l'association nationale interprofessionnelle du bétail et des viandes) et d'un établissement public FranceAgriMer, le CIV mène ses activités sous le patronage d'un Conseil Scientifique et d'Orientation.

Plus d'informations sur : www.civ-viande.org