

# **Les ruminants sont considérés comme responsables de mauvais bilans carbonés ; analysons cette allégation dans le cas des vaches laitières élevées à l'herbe ou en hors-sol dans un mode intensif**

Jean-Pierre Jouany

Directeur de recherche honoraire INRA

Vice-président de l'association GREFFE<sup>1</sup>

## **Résumé**

Les ruminants possèdent trois compartiments digestifs pré-gastriques parmi lesquels le rumen est le plus volumineux. Les conditions physico-chimiques du biotope ruminal sont particulièrement favorables au développement d'une biocénose anaérobie qui dégrade et fermente près de 50 % de la biomasse ingérée par les ruminants. Méthane, CO<sub>2</sub>, acides gras volatils sont les principaux produits de la fermentation des aliments dans le rumen. La formation de méthane est la voie majeure de l'élimination de l'hydrogène produit lors de la fermentation anaérobie. Outre le fait que le méthane entérique représente une perte d'énergie pour l'animal pouvant aller jusqu'à 10% de l'énergie ingérée, le méthane entérique agit comme un gaz à effet de serre (GES) et compte pour environ 3 % des GES impliqués dans le changement global.

Le gaz méthane a un pouvoir de réchauffement global 25 fois supérieur à celui du CO<sub>2</sub>. De ce fait, les ruminants sont fréquemment accusés d'avoir une part importante dans le phénomène de changement climatique. Des moyens existent pour réduire la méthanogenèse ruminale (Martin *et al* 2006 ; Martin *et al* 2007) mais un taux de réduction supérieur à 30 % entraîne une baisse de l'efficacité digestive des ruminants.

Afin de préciser la réelle contribution des ruminants au réchauffement de la planète, nous avons établi les bilans carbonés de vaches laitières dans deux modes d'élevage différents : un mode extensif à l'herbe et un mode intensif en hors-sol. Les résultats montrent que l'élevage à l'herbe avec un chargement modéré (1

---

<sup>1</sup> GREFFE est l'acronyme de GRoupe scientifique de réFlexion et d'inFormation pour un développement durable

UGB/ha) est neutre a un bilan carboné nul : la séquestration de C par l'herbe et par le sol des prairies compense la totalité des pertes carbonée ( $C-CH_4 + C-CO_2$ ) provenant des animaux. A l'inverse, le bilan carboné est très négatif dans le cas d'élevage intensif hors-sol de vaches laitières dont les sources de pertes en C sont nombreuses (aliments, bâtiments, déjections...), tandis que les possibilités de séquestration du C sont limitées à la photosynthèse lors de la croissance des végétaux utilisés dans la ration alimentaire (maïs, orge, soja).

### **Abstract**

Ruminants possess three pre-gastric compartments, of which the rumen has the largest volume. Physico-chemical conditions of the ruminal biotope promote the growth of an anaerobic microbial ecosystem, which degrades and ferments more than 50 % of feed ingested by ruminants. Methane and volatile fatty acids are the two major end products of ruminal fermentation. Methanogenesis is the main metabolic pathway involved in hydrogen sink in the rumen. In addition to the energy loss it represents for the animals (up to 10 % of ingested energy), enteric methane released in the atmosphere accounts for about 3 % of total greenhouse gases. The global warming power (GWP) of methane is 25 times the GWP of  $CO_2$ . Thus, ruminants are frequently accused of having a significant share in the climate change phenomenon. Means exist to reduce ruminal methanogenesis (Martin et al 2006, Martin et al 2007), but the reduction must be limited to a maximum of 30% in order to avoid a drop in the digestive efficiency of ruminants.

To clarify the real contribution of ruminants to global warming, we calculated the carbon balance of dairy cows in two extreme rearing systems: an extensive dairy farming on pasture-based system and an intensive indoor dairy farming. The results show that grass-rearing with a moderate load (1 LU / ha) is neutral: C sequestration by grass and grassland soils compensates for all carbon losses due to animals. Conversely, the carbon balance is very negative in the case of intensive indoor dairy farms whose sources of C losses are numerous (feed, livestock buildings, animal dungs ...), while the possibilities of C-sequestration are limited to photosynthesis during the growth of the plant ingredients used in feed (corn, barley, soya).

## **Introduction**

En France, l'agriculture représente 17% des émissions de gaz à effet de serre (GES). Elle se classe après le secteur du transport et avant le tertiaire qui représentent respectivement 29% et 15% des émissions des GES (CITEPA 2016). Les principaux gaz issus de l'agriculture qui agissent sur le changement climatique sont le méthane (CH<sub>4</sub>) pour l'élevage et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) pour les cultures. Tous deux ont des pouvoirs de réchauffement globaux (PRG) élevés qui sont respectivement 25 fois et 300 fois supérieurs à celui du CO<sub>2</sub>.

Nous proposons, dans la première partie de cette étude, de comprendre l'origine biologique du CH<sub>4</sub> et du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans le tube digestif des ruminants, et nous préciserons les bases moléculaires des échanges de « carbone (C) » et d'« hydrogène (H) » métaboliques mis en jeu au cours des processus digestifs et fermentaires chez le ruminant. Dans une deuxième partie, nous préciserons les aspects quantitatifs de la production de CH<sub>4</sub> et leurs facteurs de variation. Enfin, nous évaluerons les quantités de C échangés entre les différents acteurs dans deux systèmes extrêmes d'élevage de vaches laitières : (i)- Elevage à l'herbe ; (ii)- Elevage intensif hors-sol.

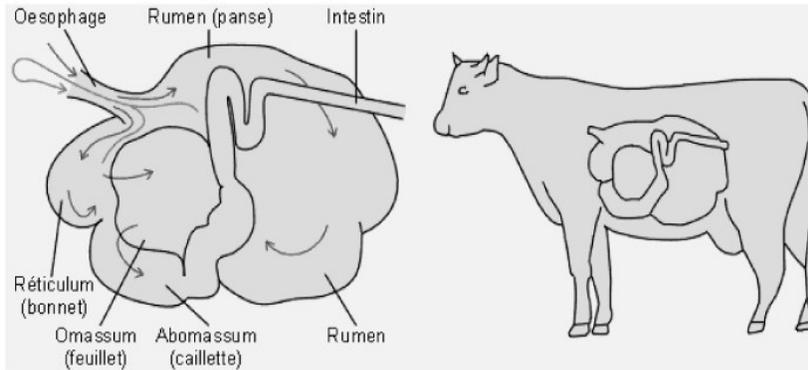
## **I- Origine du méthane produit par les ruminants**

### **1.1. Particularités anatomiques et digestives des réservoirs gastriques du ruminant**

Les ruminants ont la particularité de posséder trois compartiments digestifs appelés « pré-estomacs » : rumen (ou panse), réseau (ou réticulum, ou bonnet), feuillet (ou omasum), situés en avant de la caillette (ou abomasum), laquelle est l'équivalent de l'estomac du monogastrique (Figure 1). Le contenu digestif des pré-estomacs représente 70 à 75% du contenu total du tube digestif des ruminants. A lui seul, le rumen a un volume

voisin de 100 litres chez un bovin adulte pesant environ 600 kg, ce qui représente plus de 90% du volume de l'ensemble des pré-estomacs.

**Figure 1.** Anatomie des estomacs du ruminant (Jouany et Thivend 2008)



L'ensemble « rumen + réseau » présente toutes les caractéristiques d'un fermenteur anaérobie de type *chémostat*. Les conditions ambiantes se caractérisent par un contenu riche en eau (85 à 90%), un apport régulier de nutriments fournis à la fois par l'ingestion des aliments et la rumination qui intervient entre les phases ingestives, un pH neutre ou légèrement acide (de 6,4 à 7,0) tamponné par une sécrétion abondante de salive (200 litres par jour pour un bovin adulte), une température fixe de 39°C, une élimination continue des produits de la digestion par absorption à travers la paroi digestive et par vidage en aval vers l'intestin, et des échanges permanents par transport de métabolites de part et d'autre de la paroi ruminale. Le potentiel d'oxydo-réduction varie entre - 300 et - 400 mV, indiquant que le milieu est très réducteur.

Cet environnement est particulièrement favorable au développement d'un écosystème microbien caractérisé par sa variété et sa densité. On y trouve des bactéries essentiellement anaérobies au nombre de  $10^{10}$  à  $10^{11}$  par millilitre (ml) de contenu digestif, des protozoaires anaérobies dont les effectifs sont compris entre  $10^5$  et  $10^6$  cellules par ml, des champignons anaérobies au nombre de  $10^3$  à  $10^4$  par ml, et une population abondante

d'autres microorganismes qui ont été peu étudiés jusque-là (bactériophages, mycoplasmes, virus et bactéries pathogènes dont le rumen pourrait constituer un réservoir important).

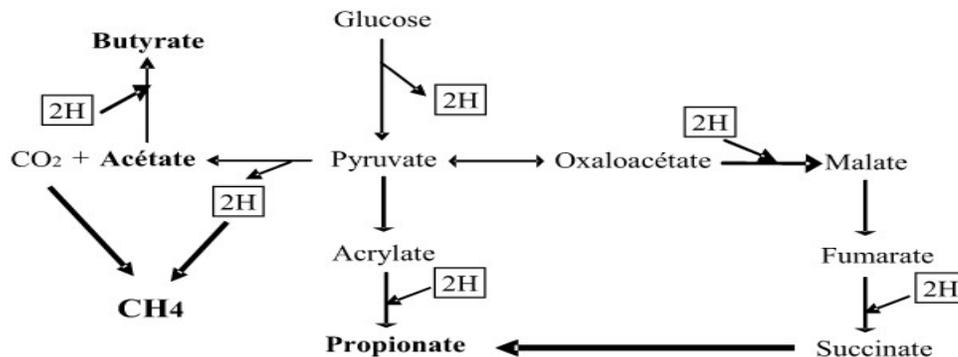
Les ruminants sont des herbivores. Leurs aliments sont composés majoritairement de végétaux riches en polymères glucidiques et protéiques qui doivent d'abord être dégradés en molécules plus simples pour être ensuite fermentées par les microorganismes du rumen. Environ la moitié des 15 - 20 kg de matière sèche alimentaire, représentant 100 kg d'herbe fraîche pâturée, sont ingérées chaque jour par une vache adulte et sont dégradés puis fermentés dans le rumen pour produire 6 - 7 kg d'acides à chaîne courte [acide acétique (ou C2), acide propionique (ou C3), acide butyrique (ou C4), appelés Acides Gras Volatils (ou AGV)], ainsi que 2,5 kg de biomasse microbienne et 1300 litres de gaz, dont 400 litres de méthane et 800 à 900 litres de CO<sub>2</sub>. Les fermentations génèrent de l'énergie sous forme d'adénosine triphosphate (ATP) qui est utilisé par les microorganismes pour couvrir leurs besoins d'entretien et de croissance. Les acides (AGV) issus des fermentations sont absorbés à travers la paroi du rumen et couvrent plus de 70% des besoins énergétiques du ruminant. Les microbes sont continuellement évacués hors du rumen avec le contenu digestif ; les protéines qu'ils contiennent (50 à 60% de la matière microbienne) sont dégradées dans l'intestin où elles fournissent de 50 à 90% de la totalité des acides aminés absorbés dans l'intestin du ruminant. La quasi-totalité des nutriments proviennent donc de la digestion et la fermentation des aliments dans le rumen.

### **1.2. Réactions biochimiques à l'origine du CH<sub>4</sub> et du CO<sub>2</sub> digestifs dans le rumen des ruminants**

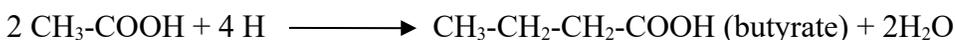
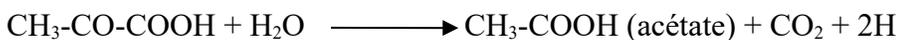
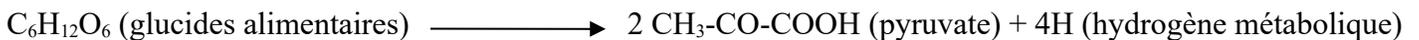
La production d'énergie au cours des processus fermentaires est le résultat de réactions d'oxydations qui, en milieu anaérobie (absence d'oxygène), se traduisent par la libération d'hydrogène métabolique (H) qui se retrouve dans les cellules microbiennes sous différentes formes de cofacteurs réduits comme le NADH, NADPH, FADH<sub>2</sub> (Figure 2). La forme oxydée de ces cofacteurs (NAD<sup>+</sup>, NADP<sup>+</sup>, FAD<sup>+</sup>) doit être ensuite régénérée pour que les fermentations puissent se poursuivre. Cette dernière étape conduit à la formation d'hydrogène libre (H<sub>2</sub>) dans le mélange gazeux du milieu fermentaire. Or, l'hydrogène formé doit être totalement éliminé au fur et à mesure de sa production. En effet, Miller (1995) a démontré qu'une élévation de

sa pression partielle inhibe l'action des déshydrogénases impliquées dans le processus de réoxydation des cofacteurs réduits, stoppant ainsi les processus fermentaires.

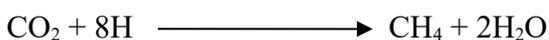
**Figure 2.** Métabolisme de l'hydrogène dans les différentes voies fermentaires du rumen



Le glucose issu de la digestion des aliments dans le rumen est fermenté en acide pyruvique selon la voie anaérobie d'Emden-Meyerhof. L'acide pyruvique est ensuite métabolisé en absence d'oxygène en acides acétique, propionique et butyrique selon les réactions stœchiométriques suivantes :



L'hydrogène métabolique produit lors de la formation du pyruvate et de l'acétate est majoritairement mobilisé par les *archaea* méthanogènes qui réduisent une partie du CO<sub>2</sub> en méthane (CH<sub>4</sub>) selon la réaction ci-dessous :



Ces réactions montrent que la formation d'acétate qui intervient principalement avec les régimes à base de fourrages grossiers riches en cellulose, s'accompagne de la production de méthane. A l'inverse, les régimes

riches en céréales, donc en amidon, orientent les fermentations vers la production de propionate qui mobilise de l'hydrogène métabolique ce qui entrainera une baisse de la méthanogenèse.

Comme pour la méthanogenèse, la production d'acétate par la voie de l'acétogénèse réductrice implique une réduction du CO<sub>2</sub> par l'H<sub>2</sub>, mais elle ne mobilise que 4H (au lieu de 8H) par mole de CO<sub>2</sub>.



La voie de l'acétogénèse a été mise en évidence dans le gros intestin du ruminant mais n'intervient qu'à un niveau faible dans le rumen (Jouany *et al* 1995). En revanche, elle est dominante dans le gros intestin de l'homme et de certains animaux (chevaux, rat, hamsters, lapins). La réduction des nitrates, des sulfates, ainsi que la saturation des acides gras insaturés, constituent d'autres voies de fixation de l'hydrogène, mais celles-ci sont considérées comme mineures au niveau du rumen.

Bien qu'anaérobies, les fermentations lactique et alcoolique, qui mettent en jeu également l'utilisation d'hydrogène, présentent peu d'intérêt au niveau de la production énergétique et sont normalement peu actives dans le rumen. Toutefois, en situation d'apport d'énergétique excessif (cas de rations riches en céréales ou en betteraves par exemple), les fermentations peuvent dévier vers une production anormalement élevée d'acide lactique entraînant une pathologie digestive appelée « acidose ruminale ». On estime que 70% des vaches laitières conduites en mode intensif, en France, sont en situation d'acidose. C'est la pathologie la plus traitée par les vétérinaires en zone d'élevage laitier intensif. Les pH bas observés avec ce type de régime, inhibent la croissance (Hegarty 1999) et l'activité des microorganismes méthanogènes (Lana *et al* 1998), ainsi que la croissance des bactéries cellulolytiques. De tels bouleversements de la population microbienne peuvent conduire à un arrêt des fermentations ruminales et, dans les cas extrêmes, à la mort des animaux.

**On peut donc considérer que la production de CH<sub>4</sub> qui accompagne le CO<sub>2</sub> fermentaire est une voie métabolique essentielle dans l'élimination absolument nécessaire de l'hydrogène métabolique ruminal.**

## **II- Quantification et facteurs de variation des émissions de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> fermentaires**

## 2.1. Méthodes de mesure des émissions de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> entériques

Deux techniques sont utilisées pour mesurer les productions de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> par les ruminants : (i)- la technique « des chambres respiratoires » au sein desquelles les animaux sont enfermés, ce qui permet de quantifier les échanges gazeux et de mesurer les quantités de CH<sub>4</sub> émises à la fois par le rumen et le gros intestin sans toutefois pouvoir les distinguer, ainsi que les quantités de CO<sub>2</sub> fermentaire et métabolique; (ii)- la technique au traceur SF<sub>6</sub> (voir la photo ci-dessous), basée sur le prélèvement continu des gaz de la zone bucco-nasale, mesure les émissions ruminales et pulmonaires de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> et exclue les gaz des fermentations intestinales ; cette technique peut être appliquée à des animaux en situation d'élevage (en stabulation ou au pâturage).

Ces méthodes ont permis d'établir un grand nombre de bases de données mondiales sur les émissions de gaz par les ruminants. Ainsi, il a été possible de préciser et de hiérarchiser les facteurs qui régulent la production de ces gaz par les ruminants.



Canister sous vide recueillant les gaz collectés pendant 24h

Capillaire reliant le dispositif de collecte au canister

Dispositif de collecte des gaz émis dans la zone bucco-nasale

## 2.2. Influence de la nature du régime alimentaire sur la production de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> entériques

Les émissions de gaz dépendent de deux facteurs issus de la nature de l'alimentation des ruminants : (i)- les quantités de matière organique fermentées dans le rumen ; (ii)- l'orientation des fermentations ruminales.

Ainsi, l'équation stœchiométrique proposée par Jouany *et al* (1995) utilisée pour quantifier les produits de la fermentation ruminale précise que CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> représentent, en moles, un nombre identique ou bien la moitié du nombre d'hexoses fermentés, respectivement.

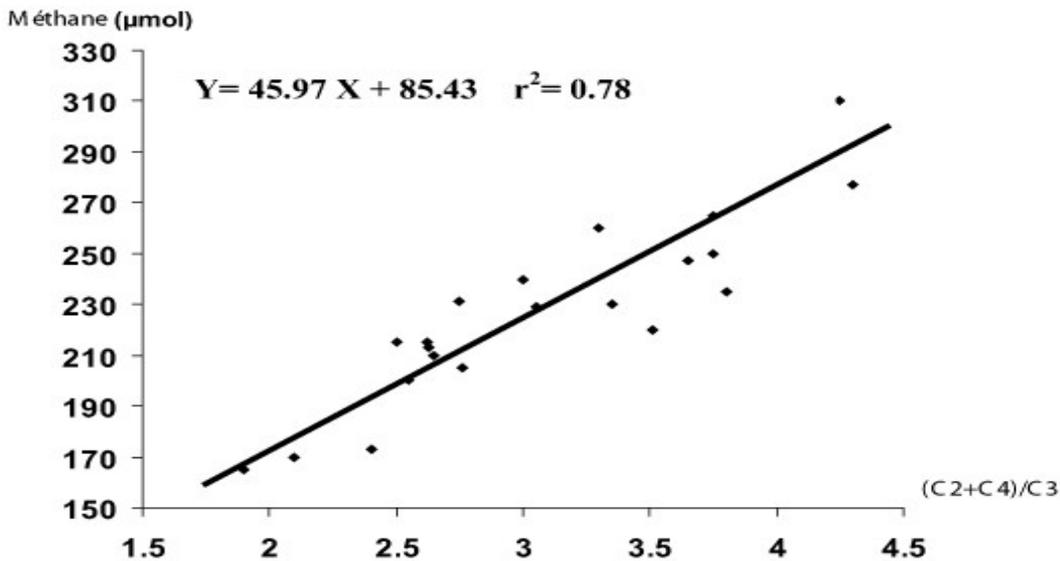


Une autre équation calculée à partir des bilans d'hydrogène métabolique mesurés *in vitro* (Demeyer 1991) indique qu'une relation existe entre la production molaire de méthane et la composition du mélange d'acides gras volatils.

$$\text{CH}_4 = 0,50 \text{ acétate} - 0,25 \text{ propionate} + 0,50 \text{ butyrate} - 0,25 \text{ valérate}$$

Confirmant les données des réactions stœchiométriques du § 1.2, cette dernière équation montre que la méthanogenèse augmente avec la production d'acétate (cas des rations riches en cellulose, donc à base de fourrages) et de butyrate (cas des rations riches en sucres solubles, à base de betteraves par exemple). En revanche, elle diminue avec la production de propionate (rations riches en céréales, donc en amidon). La relation a été validée par Moss *et al* (2000) (Figure 3).

**Figure 3.** Relation stoechiométrique entre le méthane et les acides gras volatils produits au cours des fermentations ruminales (Moss *et al* 2000)

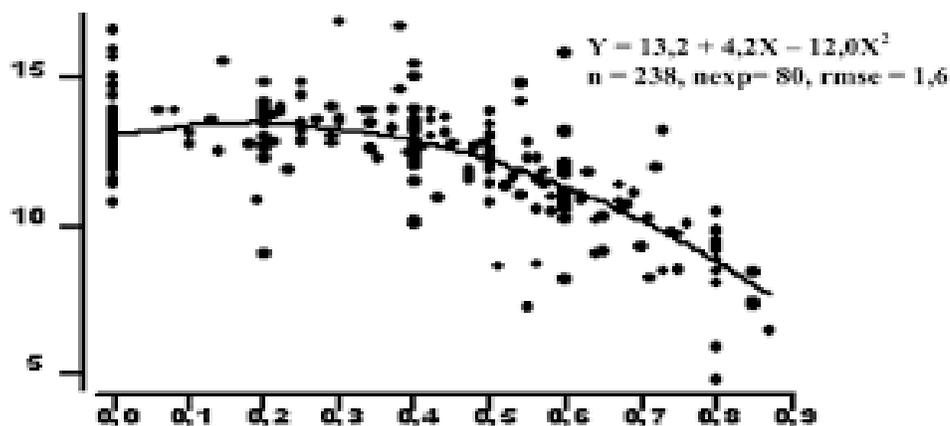


Une méta-analyse réalisée sur 101 expérimentations et 290 traitements a permis de montrer que la part d'énergie métabolisable<sup>2</sup> perdue sous forme de méthane ne diminue que lorsque la proportion de concentré représente plus de 40% de la ration (Sauvant et Giger-Reverdin 2007) (Figure 4).

L'inhibition importante de la méthanogenèse observée à partir de 80% de concentré dans la ration traduit une *acidose ruminale* et correspond à une baisse significative de la digestion et des fermentations ruminales conduisant à une chute des performances zootechniques des animaux.

**Figure 4.** Influence de la teneur en concentré de la ration sur la part d'énergie métabolisable perdue sous forme de méthane (Giger-Reverdin *et al* 2000 ; Sauvant et Giger 2007).

$E_{CH_4}/\%EM$



La production de  $CO_2$  fermentaire, comme celle d'acide acétique, augmente avec la teneur en fourrages grossiers de la ration. L'herbe verte, riche en sucres solubles, favorise plutôt la formation de butyrate et diminue donc celle de  $CO_2$  (voir la figure 2). Les régimes riches en concentrés qui promeuvent la formation de propionate, conduisent à une production de  $CO_2$  intermédiaire entre les 2 régimes précédents.

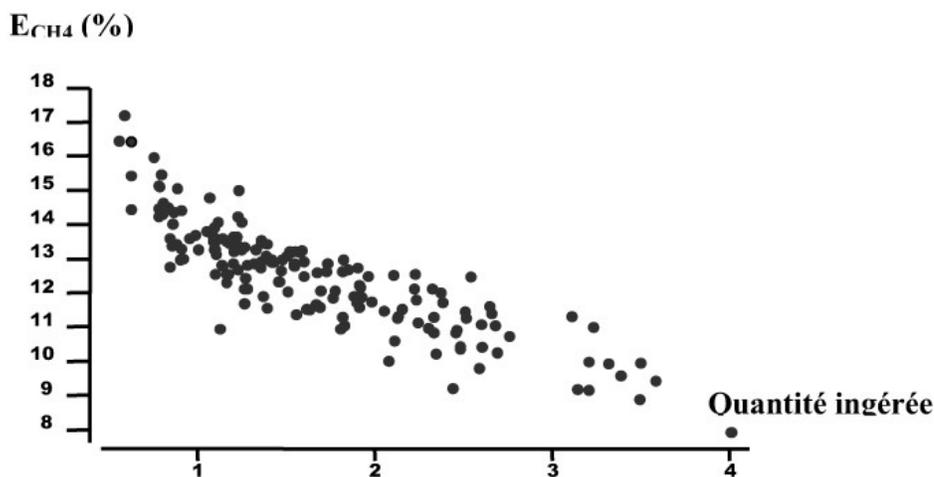
### 2.3. Influence des quantités ingérées par les ruminants sur la production de $CH_4$ et de $CO_2$ entériques

L'augmentation du niveau d'ingestion des animaux réduit le temps de séjour des aliments dans le rumen. De ce fait, la digestion de la matière organique dans le rumen et les quantités de  $CH_4$  et de  $CO_2$  diminuent d'environ

<sup>2</sup> On appelle **énergie métabolisable**, l'énergie qui est réellement disponible pour l'animal. Elle peut être utilisée pour l'entretien, le travail ou la production de lait, d'œufs ou de tissus (croissance, gestation).

10% lorsque les quantités ingérées doublent (Jouany 2008). L'accélération du transit digestif que l'on observe dans le rumen avec les niveaux d'ingestion élevés, oriente les fermentations vers une plus grande production de propionate (Hoover *et al* 1984), laquelle entre en compétition avec la méthanogenèse pour l'utilisation de l'hydrogène métabolique (voir le § 1.2). Selon Giger-Reverdin *et al* (2000) et Sauvant et Giger-Reverdin (2007), la régression entre la quantité ingérée et la production de CH<sub>4</sub> est linéaire, et présente une pente négative moyenne de 1,96 (Figure 5).

**Figure 5.** Influence du niveau d'alimentation sur la part d'énergie métabolisable perdue sous forme de méthane (Giger-Reverdin *et al* 2000 ; Sauvant et Giger-Reverdin 2007)



Par ailleurs, le tableau 1 montre que la production de CH<sub>4</sub> augmente avec le poids des animaux et leur niveau de production, ces 2 paramètres agissant sur les quantités ingérées. Toutefois, la quantité de CH<sub>4</sub> rapportée à l'unité de produit animal synthétisé diminue avec le niveau de production animale. Ainsi, lorsque la production de lait passe de 20 à 40 kg/j, celle de CH<sub>4</sub> n'augmente que de 27%.

La production de CO<sub>2</sub> fermentaire suit approximativement les mêmes évolutions que le méthane en fonction des critères « quantités ingérées » et « poids des animaux ».

**Tableau 1.** Emissions de méthane par les bovins (Vermorel 1995) [F = foin; C = concentré; E = ensilage de maïs]

Type de bovins	Poids des animaux (kg)	Production animale	Régime alimentaire	Méthane produit (g/j/animal)
Vache laitière	600	0	Foin	146
	600	20 kg/j	75% F + 25% C	393

	650	30 kg/j	65% E + 35% C	428
	700	40 kg/j	60% E + 40% C	500
Vache allaitante	650	0 kg/j	Foin	207
	650	7 kg/j	Foin	264
Génisse laitière	125		28% F + 72% C	40
Taurillon Frison	150	1 000 g/j	15% F + 85% C	27
	350	1 120 g/j	22% F + 78% C	150
	525	1 180 g/j	20% F + 80% C	193
	580	930 g/j	60% E + 40% C	221
Taurillon Charolais	250	1 100 g/j	40% F + 60% C	93
	620	860 g/j	60% E + 40% C	203

#### 2.4. Variation entre animaux de la production de CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> entériques

Pour une même espèce animale recevant un même régime, des variations individuelles importantes de production de méthane (de 30 à 60%) par unité d'aliment ingéré ont été décrites (Lassey *et al* 1997). L'origine de cette variabilité individuelle est encore mal connue, mais elle est probablement liée à des différences de profil microbien ruminal entre animaux, portant à la fois sur la composition de la biocénose et son activité métabolique. Si ce phénomène est une caractéristique propre de l'animal et s'il persiste dans le temps, il est alors envisageable de proposer une sélection d'animaux basée sur le critère génétique d'une production moindre de méthane. Toutefois, les études engagées dans ce sens au cours des dernières années ont abouti à des résultats contradictoires et n'ont pas permis de conclure si cette différence individuelle de production de méthane est un phénomène transitoire (Pinares-Patiño *et al* 2006) ou permanent (Goopy et Hegarty 2005). Nous n'avons pas de données sur les variations individuelles de production de CO<sub>2</sub> fermentaire.

**Remarque :** Les bases de données ont été majoritairement alimentées, jusque-là, par les mesures faites en chambre respiratoire. Ainsi, les bilans de CO<sub>2</sub> que nous présentons ici correspondent à la somme du CO<sub>2</sub> fermentaire issu du rumen et du gros intestin, ainsi que le CO<sub>2</sub> métabolique extrait par les poumons et rejeté par la voie respiratoire. Nous notons que les données récentes sont principalement issues de la technique dite « au traceur » (SF<sub>6</sub> par exemple ; voir le § 2.1) qui excluent en partie les gaz des fermentations intestinales, puisque seulement une fraction de ces derniers se retrouvent dans les gaz expirés.

### III. Mesure des bilans de carbone de vaches laitières élevées à l'herbe

Il est couramment affirmé que les ruminants sont des émetteurs de gaz à effet de serre (GES) et, donc, qu'ils contribuent au changement climatique. C'est une des raisons de la diminution observée de la consommation de viande rouge au cours des 2 dernières décennies. Cette assertion est fondée sur les seules mesures faites au niveau des animaux. Elle comporte un énorme biais puisqu'elle n'inclue pas les GES qui sont produits pour nourrir, soigner, loger les animaux, et pour traiter les effluents de la ferme dans le cas des élevages intensifs hors-sol. Par ailleurs, elle ne tient pas compte du déstockage du C atmosphérique vers le sol des prairies dans le cas d'élevage à l'herbe. C'est donc à l'échelle de l'exploitation, incluant la totalité des entrées et des sorties, que l'empreinte écologique sera évaluée dans le présent document.

#### 3.1 Quantification du stockage de C dans le sol des prairies

Le système agroécologique prairial présente deux avantages au niveau de la captation du carbone atmosphérique. (i)- les espèces herbacées mobilisent le CO<sub>2</sub> atmosphérique pour assurer leur croissance selon le processus de la photosynthèse ; (ii)- le développement racinaire des plantes et la formation de déchets végétaux sont à l'origine de la formation d'humus qui constitue la principale forme de stockage de C dans les sols prairiaux. Ainsi, les sols contiennent deux fois plus de C que l'atmosphère (Jobaggy et Jackson 2000 ; Percival *et al.* 2000), et constituent le plus important réservoir de C sur la planète (Chapin *et al.* 2009). L'optimisation de la séquestration de C par les sols constitue un moyen de contrôler l'augmentation actuelle de la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique. Avec les forêts, les prairies ont un potentiel de stockage de C qui est plus important que la plupart des autres écosystèmes végétaux. Soussana *et al* (2004) ont montré, sur 9 sites européens, que les prairies stockent en moyenne **1 t C /ha/an**. Cette donnée a été confirmée ensuite par Ciais *et al* (2010). Plus récemment, Herfurth (2015) a montré, en utilisant 2 méthodes de mesures différentes (méthode « des tours à flux » et mesure directe par carottage) appliquées à des prairies permanentes du domaine INRAe de Laqueuille (Puy de Dôme), que les taux de séquestration moyens sont de **2,21 et 2,29 t C /ha/an**, respectivement. Dans ce cas, la gestion la plus intensive du pâturage a eu tendance à améliorer le niveau de séquestration du C. Par ailleurs,

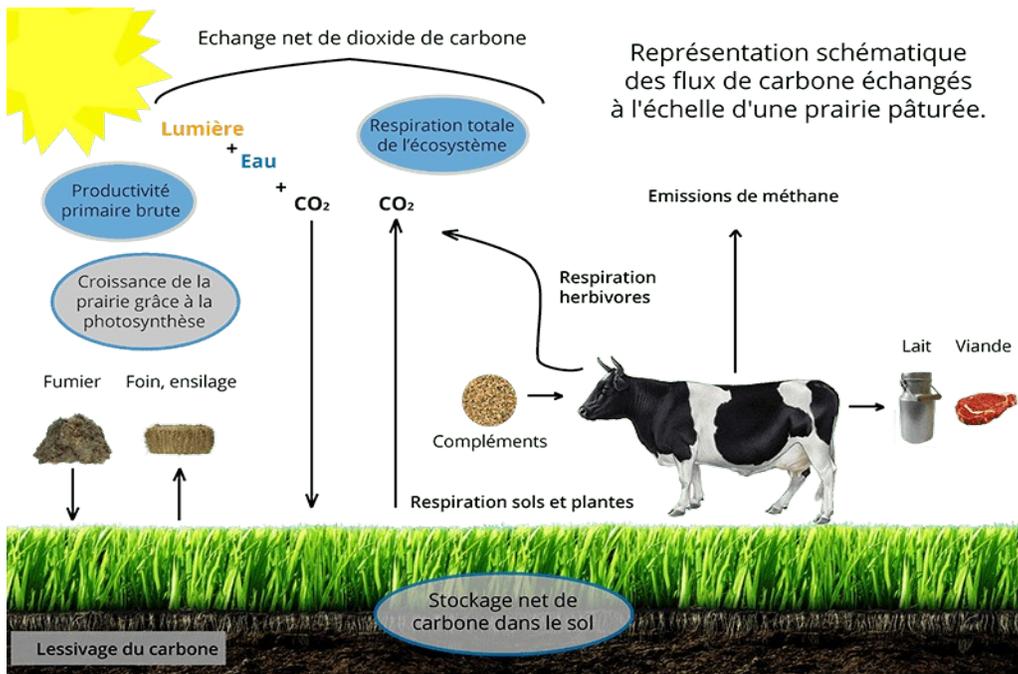
l'auteur a observé qu'un stockage important de C avait lieu dans les profondeurs du sol (jusqu'à 80 cm) et que la capacité de stockage était maintenue pendant au moins 10 années.

Pour différentes raisons, les grandes cultures sont beaucoup moins efficaces que les prairies pour stocker le C, du fait (i)- d'une moindre densité de végétation qui reste au sol puisque la quasi-totalité de la production végétale est exportée hors des champs après la récolte ; (ii)- de pratiques telles que le labour qui active la minéralisation de la matière organique et induit des pertes de C organique des sols ; (iii)- de l'absence d'animaux qui apportent de l'azote et du carbone par leurs excréments ; (iv)- d'une activité microbienne faible des sols à l'origine de la formation d'humus. Ainsi, on constate que la teneur en C des sols cultivés s'est fortement appauvrie au cours des dernières années, ce qui peut expliquer la baisse des rendements actuels de la productivité des céréales. Par ailleurs, l'apport d'engrais azotés de synthèse dans les sols cultivés est à l'origine de formation du gaz protoxyde d'azote ( $N_2O$ ) dont le PRG est 300 fois celui du  $CO_2$ . Ces données montrent que, contrairement aux prairies, les grandes cultures ont des capacités de stockage de C faibles et qu'elles produisent de puissants GES comme  $N_2O$ .

L'entrée des ruminants sur un pâturage constitue un nouvel écosystème « prairie – ruminant » au sein duquel les échanges gazeux sont présentés dans la figure 6.

**Figure 6.** Les flux de carbone échangés sur une prairie pâturée (Université de Liège, Belgique 2015)

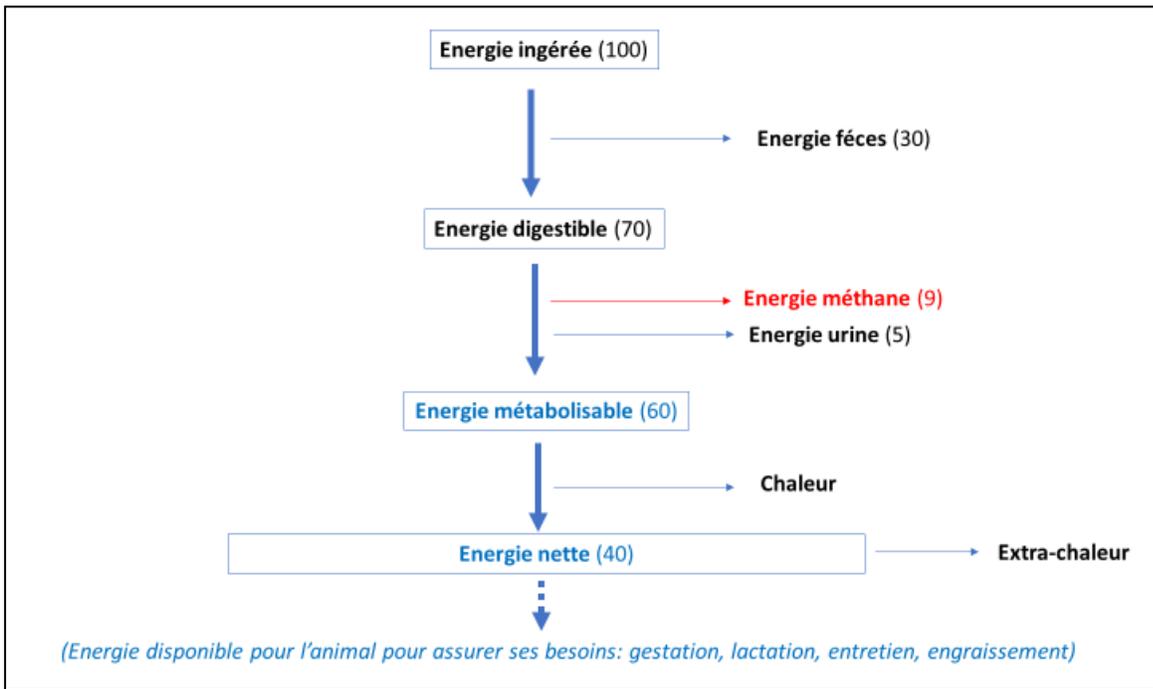
<https://www.notre-planete.info/actualites/4173-prairies-emissions-carbone>



### 3.2 Comment est utilisé le C ingéré chez la vache laitière au pâturage ?

Les différentes transformations de l'énergie ingérée par le ruminant sont décrites dans la figure 7. L'INRA a montré que l'énergie du méthane représente de 4 à 10% de l'énergie brute ingérée (Vermorel 1978). Les valeurs les plus faibles sont obtenues avec les régimes riches en céréales (blé, orge, maïs) ou en sucres solubles (betteraves, herbe jeune), et les plus fortes avec les régimes à base de fourrages grossiers riches en cellulose (foins récoltés à un stade tardif, paille). Dans le cas d'animaux élevés à l'herbe, il est proposé de prendre la valeur de 7% pour l'énergie perdue sous forme de méthane. Il s'agit là d'une valeur maximale car la consommation d'une pâture riche en graminées contenant des fructosanes solubles, conduit à des valeurs variant de 5 à 6%.

**Figure 7.** Schéma général d'utilisation de l'énergie (ou du carbone) par les ruminants (Vermorel 1978)



Considérant que le C ingéré par une vache au pâturage provient exclusivement de l'herbe broutée, il est possible de calculer les flux de C perdus par les voies fécales, urinaires et sous forme des gaz CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> à partir des équations établies par les énergéticiens (Schieman *et al.*, 1971). Les flux totaux de C sous forme de CO<sub>2</sub> (C-CO<sub>2</sub>) cumulant le CO<sub>2</sub> métabolique et le CO<sub>2</sub> fermentaire, ont été calculés à partir des données sur l'extra-chaleur publiées par Pedersen *et al.* (2008). Dans le cas présent, nous avons retenu la valeur moyenne de 111 g de C-CO<sub>2</sub> rejetés /Mcal extra-chaleur.

Les valeurs de C excrété dans les fèces, l'urine, le méthane et le lait ont été obtenues à partir de la base de données « RUMENER » de l'UMR-PNA<sup>3</sup> qui rassemble les résultats de plus de 1000 mesures de bilans effectués en chambres calorimétriques, issues de 148 publications correspondant à des contextes alimentaires et physiologiques divers.

En retenant les 268 résultats de la base obtenus sur les vaches laitières, Sauvart et Giger-Reverdin (2009) ont pu établir une répartition du C ingéré au niveau animal (Tableau 2). Ces données montrent que les pertes de C sous forme de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> représentent respectivement 72 et 907 kg/an/vache, soit un total de 979 kg/an/vache.

<sup>3</sup> UMR-PNA = Unité Mixte de Recherche Physiologie de la Nutrition et de l'Alimentation à l'INRA

**Tableau 2.** Valeurs moyennes du bilan carbone d'une vache laitière

Paramètres	Quantité de C (% de C-ingéré)	Quantité de C (kg de C/an)
C-ingéré	100	2 100
C-fèces	29,4 ± 5,7	632
C-urine	3,9 ± 1,4	80
C-CO <sub>2</sub>	42,2 ± 7,6	907
C-CH <sub>4</sub>	3,5 ± 0,9	72
C-lait	20,9 ± 9,3	390

Le C des fèces et de l'urine n'est pas considéré comme une perte au niveau de l'écosystème « prairie – ruminant » mais plutôt comme des facteurs d'activation du stockage de C dans les sols. En effet, les fèces excrétés sur le sol des pâtures sont valorisées sous forme d'engrais naturel en stimulant l'activité de la biosphère des sols et en contribuant à l'humification de la matière organique, donc au stockage de carbone dans le sol des prairies. De même l'urée présente dans l'urine, par sa teneur élevée en azote, joue un rôle d'engrais azoté qui dope l'activité microbienne et racinaire des sols, favorisant donc la pousse de l'herbe et le stockage de carbone dans le sol. Evidemment, le C du lait sera considéré ici comme un produit alimentaire d'intérêt majeur et ne sera donc pas comptabilisé dans les pertes carbonées.

**En situation d'élevage de vaches laitières à l'herbe, avec une charge moyenne d'1 UGB<sup>4</sup> par hectare, le bilan carboné de l'écosystème « prairie – ruminant » est donc vertueux en termes de bilan carboné puisque les pertes annuelles totales de C gazeux d'origine animale représentent 979 kg, dont 72 kg de C-CH<sub>4</sub>, alors que les prairies stockent de 1 000 à 2 200 kg C/ha/an (voir les données présentées au § 3.1). Se-**

<sup>4</sup> L'UGB (Unité Gros Bovin) est l'unité de référence permettant de calculer les besoins nutritionnels ou alimentaires de chaque type d'animal d'élevage. Par exemple, une vache laitière correspond à 1 UGB.

lon les données de Herfurth (2015), ce système reste vertueux à l'égard de l'environnement jusqu'à la charge de 2 UGB par hectare, l'intensification de l'exploitation des prairies ayant tendance à augmenter le niveau de séquestration du C.

#### **IV. Mesure des bilans de carbone de vaches laitières élevées dans un système intensif hors-sol (cas des fermes dites « fermes à 1 000 vaches »)**

Nous proposons de réfléchir au bilan C de vaches laitières recevant une ration quotidienne conventionnelle en système intensif (Tableau 3) qui correspond à une production journalière individuelle de 32 kg de lait brut ayant un taux butyreux de 40 g/kg et un taux protéique de 33 g/kg.

**Tableau 3.** Ration quotidienne des animaux

<u>Aliments</u>	<u>Quantité (kg MS/animal)</u>
Ensilage de maïs	16
Orge	2
Paille ou fourrage grossier	0,5
Tourteau de soja	5,3
Complément minéral vitaminé	0,35
<b>Total</b>	<b>23,85</b>

Le mode d'élevage hors-sol signifie qu'aucun des aliments n'est produit sur la ferme. Le maïs est cultivé la plupart du temps dans des exploitations proches de la ferme d'élevage, et l'ensilage est réalisé sur le site de la ferme d'élevage. L'orge est produit parfois dans des régions éloignées de la ferme d'élevage. Il est distribué sous forme de pellets ou de grains aplatis achetés à des fabricants d'aliments. Il est alors nécessaire d'ajouter les dépenses énergétiques des procédés industriels mis en jeu pour préparer les pellets ou pour l'aplatissage des grains, ainsi que les dépenses de transport qui peuvent être élevées. Le tourteau de soja est fourni par les fabricants d'aliments du bétail à partir de graines de soja importés principalement d'Amérique du Sud

(Argentine, Brésil) ou des Etats-Unis. Il faut inclure le coût en C du transport des graines par voie maritime jusqu'aux ports français, leur stockage, puis leur acheminement jusqu'aux usines de transformation. *In fine*, le tourteau sera transféré jusqu'à la ferme d'élevage. L'ensemble de ces déplacements et de ces préparations industrielles consomment de l'énergie fossile et génèrent du CO<sub>2</sub> qu'il est très difficile, voire impossible, de quantifier tant les conditions varient d'un élevage à l'autre (lieu d'origine de la matière brute, lieu de transformation de la matière brute, lieu de stockage de la matière transformée, site de l'élevage).

**Tableau 3.** Empreinte carbonée de la ration alimentaire des vaches laitières en mode de production intensive

Ingrédients	Empreinte écologique (kg CO <sub>2</sub> /kg MS)	kg CO <sub>2</sub> /an	kg C-CO <sub>2</sub> /an
Ensilage maïs	0,200	1 241	338
Orge	0,398	290	79
Paille	0,097*	18	5
Tourteau soja	0,560*	1 083	295
Complément M-V	0,480*	61	17
<b>Total</b>	-	-	<b>734</b>

(\*Valeurs synthétisées par l'auteur à partir de données bibliographiques éparées)

A ces dépenses carbonées dues exclusivement à l'élaboration des aliments importés sur la ferme, il faut ajouter les dépenses carbonées de leur stockage et de leur distribution quotidienne, celles des animaux (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>), du stockage et de l'utilisation des déjections animales et des effluents de l'élevage, de la construction et du fonctionnement des bâtiments d'élevage.

Pour simplifier, on estimera que les pertes individuelles de C dues aux animaux sont voisines de celles évaluées au pâturage. En effet, la diminution des pertes métaboliques due à un déplacement moindre des animaux à l'attache plutôt qu'au pâturage, est compensée par une augmentation de la fermentescibilité de la ration hors-sol et du métabolisme des produits de la digestion apportés en plus grande quantité.

Si les déjections des animaux au pâturage sont naturellement dégradées et utilisées par l'écosystème prairial qui en tire profit, il n'en est pas de même pour les déjections des animaux élevés en mode intensif hors-sol. Dans ce dernier cas, les fèces et l'urine sont stockés dans de vastes fosses situées à l'extérieur du bâtiment d'élevage, pouvant recevoir 60 litres de lisier par jour et par animal. Ce stockage du lisier en milieu anaérobie émet de l'ammoniac gazeux ( $\text{NH}_3$ ) et du  $\text{CH}_4$  dont les effets sur l'environnement sont nocifs. Le lisier liquide ainsi stocké est pompé dans des citernes (tonnes à lisier) mobiles pour être ensuite pulvérisé sur des pâturages ou des terres de culture. Outre le fait que cette utilisation du lisier provoque de nombreuses nuisances olfactives, elle est responsable de l'eutrophisation des lacs et rivières, voire des bords maritimes (algues en Bretagne) et de la contamination des eaux par les nitrates.

Les bâtiments d'élevage consomment de l'énergie pour l'éclairage, le curage automatique, la distribution des aliments à l'auge, les machines à traire ou les robots de traite et les tanks à lait réfrigérés qui, globalement, sont sources de pertes importantes de C dues à l'utilisation de C fossile ou d'électricité. **Bien qu'il soit difficile d'évaluer la totalité de ces pertes, on peut les estimer à plusieurs centaines de kg de C par an et par animal.**

Enfin, ce type d'élevage est source de nombreuses pathologies animales (acidose ruminale, boiteries, mammites, hémolactations, rétention placentaire, anœstrus, kystes ovariens, déplacement de caillette, métrite, fièvre vitulaire...) dues, pour la plupart, à l'excès d'énergie et le défaut d'aliments grossiers dans les rations. L'intervention fréquente du vétérinaire avec ce mode d'élevage a un coût carboné élevé incluant les déplacements du professionnel, la fabrication des médicaments utilisés, leur acheminement et l'impact des drogues sur l'environnement.

C'est bien sur le cycle de vie complet de la ferme d'élevage, incluant tous les intrants et les usages locaux d'énergie, qu'il faut donc établir les bilans C.

**En situation d'élevage intensif de vaches laitières, il est excessivement difficile de faire un bilan complet des dépenses carbonées puisqu'une part de celles-ci portent sur des aliments importés dont l'origine, le système de culture, de transformation et d'acheminement jusqu'à la ferme, sont extrêmement variables. Les modes de fonctionnement des fermes varient également selon leur taille, leur degré de mécanisation et d'automatisation (présence de robot de traite et d'alimentation automatisé par exemple). Toutefois, Il est évident que les sources de dépenses carbonées (ou énergétiques) sont infiniment plus nombreuses et quantitativement plus importantes avec ce type d'élevage qu'avec le mode de production à l'herbe. En outre, il y a peu ou pas de stockage de C dans les sols avec ce type d'élevage. La critique adressée à l'élevage animal, responsable de production de GES, concerne donc spécifiquement les modes d'élevage intensif des ruminants herbivores, ainsi que ceux des animaux monogastriques (volailles et porcs) qui ne sont pas traités ici mais dont la production de type « industrielle » recouvre les principaux reproches présentés dans la « partie IV » du présent document.**

## **Conclusion**

Il est impératif de préciser le mode de production des mammifères herbivores (ruminants, équidés, camélidés, cervidés...) pour caractériser leur impact sur les flux de C et sur l'environnement. Ainsi, le message fréquemment diffusé dans les médias qui consiste à affirmer que consommer de la viande rouge favorise la production de GES puisque « les vaches émettent du méthane », doit être clarifié. Notre analyse indique que les herbivores élevés à l'herbe avec une charge de 1 UGB/ha, sur des prairies naturelles, conduit à un bilan carboné favorable puisque le sol des prairies stocke davantage de C que les animaux n'en rejettent. Nous pouvons également retenir de la présente analyse que les herbivores s'associent parfaitement à l'écosystème pastoral dont ils stimulent l'efficacité de stockage du C.

En revanche, l'intensification des élevages mis en place lors de la révolution agricole, après 1950, a des effets délétères notables sur les rejets de C dans l'atmosphère et, donc, sur le changement climatique. Une part importante du mauvais bilan carboné vient du fait que les aliments sont produits et transformés en des lieux

éloignés des fermes d'élevage et que les effluents sont utilisés sur des sols également distants des fermes d'élevage. Il faut noter ici que ce type de production animale est étroitement associé aux cultures intensives et aux industries agroalimentaires situées en amont et en aval de l'élevage, à la fois pour la fourniture d'aliments et pour la commercialisation du lait. Un tel système implique de nombreux acteurs économiques qui en tirent profit, mais il a également pour conséquence de provoquer de nombreux autres effets négatifs sur la « santé » de notre planète : contamination des eaux de surface et des eaux profondes, utilisation d'antibiotiques générant des phénomènes de résistance des bactéries pathogènes affectant la santé des humains, baisse de la qualité des produits animaux destinés à la consommation de l'homme, déforestation, usage de pesticides ... Ces effets s'amplifient avec la taille des élevages qui tend à augmenter et qui évoluent vers une forme d'industrialisation de l'élevage que les paysans ne peuvent plus maîtriser. Les impacts sociaux qui en résultent sont aussi dramatiques que l'enjeu environnemental discuté dans le présent document. Ainsi, les systèmes d'élevage de type herbager sont donc parfaitement adaptés à la notion de « durabilité » et de rentabilité comme l'ont montré Journet *et al* (2006) et Journet et Dulphy (2016).

## Bibliographie

- F.S. Chapin, J. McFarland, A.D. McGuire, E.S. Euskirchen, R.W. Ruess, K. Kielland (2009), "The changing global carbon cycle: linking plant-soil carbon dynamics to global consequences », *Journal of Ecology*, Vol.97, p.840–850.
- P. Ciais, J.F. Soussana, N. Vuichard *et al.* (2010), "The greenhouse gas balance of European grasslands *Biogeosciences*", Vol.7, p.5997–6050.
- CITEPA 2007. Emissions dans l'air ; données nationales sur le méthane [[www.citepa.org/emissions/nationale/Ges/ges\\_ch4.htm](http://www.citepa.org/emissions/nationale/Ges/ges_ch4.htm)].
- D.I. Demeyer (1991), "Quantitative aspects of microbial metabolism in the rumen and hindgut". In *Rumen Microbial Metabolism and Ruminant Digestion*, (J-P. Jouany Ed), INRA Editions, Versailles, France, pp. 217-237.
- S. Giger-Reverdin, D. Sauvant, M. Vermorel, J-P. Jouany (2000), "Empirical modelling of methane losses from ruminants", *Rencontres, Recherches, Ruminants*, Vol.7, p.187-190.
- J.P. Goopy, R.Dobos, R. Hegarty (2006). "The persistence over time of divergent methane production in lot fed cattle", *International Congress*, Series 1293, p.111-114.

- R.S. Hegarty (1999), “Mechanisms for competitively reducing ruminal methanogenesis”, *Australian Journal of Agricultural Research*, Vol.50, p.1299-1305.
- D. Herfurth (2015), “Impact des pratiques de gestion sur le stockage du Carbone dans le sol des écosystèmes prairiaux », Thèse Université Blaise-Pascal et Université d’Auvergne, N° DU 2589, 203 pages.
- W.H. Hoover, C.R. Kincaid, G.A. Varga, W.V. Thayne, L.L. Junkins (1984), “Effects of solid and liquid flows on fermentation in continuous cultures”, *Journal of Animal Science*, Vol.58, p.692-699.
- E. Jobbagy, R.B. Jackson (2000), “The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation”, *Ecological Applications*, Vol.10(2), p.423-436.
- J-P. Jouany (1994), “Manipulation of microbial activity in the rumen”, *Archives for Animal Nutrition*, Vol. 46, p.133-153.
- J-P. Jouany (2008), “Enteric methane production by ruminants and its control”. In *Gut Efficiency; The Key Ingredient in Ruminant Production* (S. Andrieu, D. Wilde Eds), Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, pp35-59.
- J.P. Jouany, P. Thivend (2008), « La production de méthane d’origine digestive chez les ruminants et son impact sur le réchauffement climatique », *Management Prospective Ed., « Management & Avenir », Vol.20, p259-274.*
- J-P. Jouany, L. Broudiscou, R.A. Prins, S. Komisarczuk-Bony (1995), « Métabolisme et nutrition de la population microbienne du rumen ». In *Nutrition des Ruminants Domestiques* (R. Jarrige, Y. Ruckebush, C. Demarquilly, M-H Farce, M. Journet Eds), INRA Editions, Versailles, France, pp.349-381.
- M. Journet, Dulphy J-P (2016). Refondation de l’agriculture et rôle des herbivores. Réflexions et perspectives. *Fourrages*, Vol 228, p. 271-281.
- M. Journet, V. Alard, Cl. Beranger (2006), « A la recherche d’une agriculture durable ; étude de systèmes herbagers économes en Bretagnes ». INRA Editions. Paris. 346 pages.
- R.P. Lana, J.B. Russel, M.E. van Amburg (1998), “The role of pH in regulating ruminal methane and ammonia production”, *Journal of Animal Science*, Vol.76, p.2190-2196.
- K.R. Lassey, M.J. Ulyatt, R.J. Martin, C.F. Walker, I.D. Shelton (1997), “Methane emissions measured directly from grazing livestock in New Zealand”, *Atmospheric Environment*, Vol.31, p.2905-2914.
- C. Martin, D. Morgavi, M. Doreau, J-P. Jouany (2006), « Comment réduire la production de méthane par les ruminants ? », *Fourrages*, Vol.187, p.283-300.
- Martin C., Rouel J., Jouany J.P., Doreau M., Chilliard Y. 2007. Methane output and diet digestibility in response to feeding dairy cows with crude linseed, extruded linseed or linseed oil. *Journal of Animal Science*, doi :10.2527/jas.2007-0774.
- A. Moss, J-P. Jouany, C. J. Newbold (2000), “Methane production by ruminants : its contribution to global warming”, *Annales de Zootechnie*, Vol.49, p.231-253.
- S. Pedersen, V. Blanes-Vidal, H. Joergensen, A. Chwalibog, A.Haeussermann, M. J. W. Heetkamp, A. J. A. Aarnink (2008), Carbon dioxide production in animal houses: a literature review. Manuscript BC 08 008. *Agricultural Engineering International:CIGR Ejournal*, Vol. X, December, 2008, 1–19.
- H.J. Percival, R.L. Parfitt, N.A. Scott (2000), “Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grasslands: is clay content important?”, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 64, p.1623–1630.

C. Pinares-Patiño, B. G. Molano, A. Smith, H. Clark (2006), “Methane emissions from dairy cattle divergently selected for bloat susceptibility”, *Australian Journal of Experimental Agriculture*, Vol.48, p.234-239.

D. Sauvant, S. Giger-Reverdin (2007), “Empirical modelling by meta-analysis of digestive interactions and CH<sub>4</sub> production in ruminants”. In *Energy and Protein Metabolism and Nutrition* (I. Ortigues-Marty Ed), Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands, pp.561-562.

D. Sauvant, S. Giger-Reverdin (2009), « Les variations du bilan carbone des ruminants d'élevage », *Rencontres, Recherches, Ruminant*, Vol.16, p.229-232.

R. Schieman, K. Nehring, L. Hoffman, L. W. Jentsch, A. Chudy (1971), “Energetische Futterbewertung und Energiennormen”, 345p. (cité par Sauvant *et al* 2009).

#### UGB

M. Vermorel (1978), « Utilisation énergétique des produits terminaux de la digestion », chapitre 2, in « L'Alimentation des Ruminants », (Ed. R. Jarrige), 47-88, INRA publications, 78000 Versailles, (France). 621 p.

M. Vermorel (1995), “Productions gazeuses et thermiques résultant des fermentations digestives”. In *Nutrition des ruminants domestiques ingestion et digestion* (R. Jarrige, Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M-H. Farce, M. Journet Eds), INRA Editions, Paris, pp.649-670.