



# Réduire les émissions de méthane entérique par l'alimentation des ruminants

**Examen des différentes techniques visant à limiter l'impact des émissions de méthane des ruminants par l'alimentation animale**

**Mots-clés :** Méthane, Environnement, Bovins

**Auteur :** Michel Doreau<sup>1</sup>, Cécile Martin<sup>1</sup>, Diego P. Morgavi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INRA, Unité Mixte de Recherches sur les Herbivores (UMR 1213), Centre Auvergne-Rhône-Alpes, 63122 Saint-Genès Champanelle, France.

\* E-mail des auteurs correspondants : [cecile.martin@inra.fr](mailto:cecile.martin@inra.fr), [diego.morgavi@inra.fr](mailto:diego.morgavi@inra.fr), [michel.doreau@inra.fr](mailto:michel.doreau@inra.fr)

Les émissions de méthane par les ruminants sont souvent mises en avant comme argument pour réduire la production de viande, en raison de leur impact sur le réchauffement climatique. C'est pourquoi il est nécessaire de connaître et d'évaluer les moyens de limiter ces émissions, en particulier par le biais de l'alimentation. Cet article fait le point des techniques efficaces et utilisables dans la pratique, et de celles qui ne le sont pas, ou pas encore.

## Résumé :

La limitation du réchauffement climatique implique une réduction des émissions de gaz à effet de serre dont celles de méthane. Le méthane est naturellement produit dans le rumen. Les voies de réduction des émissions de méthane entérique par l'alimentation chez les ruminants, entre autres chez les bovins viande, sont très diverses. Leur applicabilité est toutefois limitée par le fait que les vaches allaitantes sont alimentées avec une très forte proportion de fourrages. L'utilisation de rations très concentrées pour l'engraissement est efficace, mais présente d'autres inconvénients spécifiques à ce type d'alimentation pour ruminants. L'enrichissement de la ration en lipides est la voie la plus prometteuse, et le lin est probablement la source la plus efficace. Parmi les additifs alimentaires, le nitrate de calcium et le 3-nitrooxypropanol ont fait la preuve de leur efficacité, mais leur emploi sur le terrain est délicat pour le premier, prématuré pour le second. Les plantes riches en tanins réduisent la production de méthane, mais leur emploi est limité par le risque de baisse des performances animales. Pour l'instant, les autres additifs et les biotechnologies n'ont pas montré de constance dans leur efficacité. Il est par ailleurs souligné que l'utilisation d'une technique pour faire baisser l'émission de méthane n'est envisageable que si elle n'entraîne pas d'effets négatifs sur les performances ou sur d'autres critères environnementaux.

## Abstract: Enteric methane mitigation in ruminants through feeding

Action against climate change can be achieved through greenhouse gas mitigation, especially decreasing methane emission. Methane is naturally produced in the rumen. Decreasing enteric methane emission in domestic ruminants, including beef cattle, can be achieved through various feeding practices. However, practical solutions are limited in beef cattle because beef cows are mostly fed with forages. The use of high-concentrate diets is efficacious but it may present drawbacks related to feeding ruminants with such diets. The most promising way to reduce enteric methane emissions is the addition of lipids in the diet, linseed being probably the most efficacious lipid source. Among feed additives, calcium nitrate and 3-nitrooxypropanol have been proven to be efficacious, but their use in field conditions is questionable for the former, and too early for the latter. Tannin-rich plants decrease methane production, but their use is limited by a potential negative effect on animal performance. Other additives and biotechnologies have not shown repeatable positive effects and they are still at early stages of experimentation. It is pointed out that a technique for methane mitigation could only be adopted if there is no negative effects on performance or on other environmental parameters.

## INTRODUCTION

La lutte contre le réchauffement climatique est un enjeu pour la grande majorité des gouvernants de la planète. Elle implique la réduction des émissions de gaz à effet de serre produits par les activités humaines. Selon les travaux récents de la FAO, les activités liées à l'élevage, incluant celles qui se situent en amont des exploitations d'élevage, représentent 14,5% des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique, et le méthane produit par les fermentations entériques des ruminants représente au niveau mondial environ 44% des émissions de gaz à effet de serre imputables au secteur de l'élevage, exprimés en équivalents-gaz carbonique (Gerber *et al.*, 2013). Ces fermentations entériques se déroulent en grande majorité dans le principal compartiment digestif, le rumen. Au-delà de ces chiffres, il est logique que le secteur de l'élevage, comme tous les autres secteurs de l'économie, s'efforce de réduire ces émissions, même s'il peut se targuer de contribuer au stockage de carbone dans les sols, ce qui réduit les émissions nettes de gaz à effet de serre. Dans le cas des ruminants, la production de méthane à partir des aliments consommés constitue une perte d'énergie pour l'animal ; réduire l'émission de méthane présente donc aussi un effet positif pour l'efficacité d'utilisation de la ration. Il est clair que la réduction de ces émissions doit être envisagée globalement, pour l'ensemble du système d'élevage. Mais pour un même système, des moyens existent pour réduire chacun des trois principaux gaz émis, gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) et méthane (CH<sub>4</sub>). Cet article fait le point des techniques permettant de limiter les émissions de méthane entérique chez le ruminant. Celui-ci étant produit dans le tube digestif, qui diffère peu entre types de ruminant, les techniques sont communes à tous les ruminants. Une majorité d'études a été conduite soit sur le mouton à l'entretien ou la vache tarie en tant que ruminants modèles, soit sur la vache laitière qui est une cible prioritaire pour la majorité des financeurs publics et privés, en raison du poids de l'industrie laitière et de la part importante d'aliments concentrés consommés par les vaches laitières. Leurs conclusions sont le plus souvent transposables aux bovins viande, les différences éventuelles étant dues au niveau d'ingestion des animaux qui peut influencer sur l'amplitude de réponse de la méthanogenèse. Leur applicabilité dans la pratique est en revanche limitée dans le cas des vaches allaitantes, qui ne consomment que peu d'aliments concentrés, qui sont les supports des aliments ou additifs pouvant réduire la production de méthane. Nous

ferons un focus sur les bovins viande à chaque fois que cela sera possible.

Il est connu depuis longtemps que l'augmentation du niveau de production des animaux réduit les émissions de méthane lorsque celles-ci sont exprimées par kg de viande ou de lait, et non pas par jour ou par kg de matière sèche ingérée. La cause essentielle est la part plus faible des besoins d'entretien dans les besoins totaux. Mais cette diminution est compensée en grande partie par une augmentation des autres gaz à effet de serre, car l'accroissement de production entraîne généralement une augmentation de la part des concentrés dans la ration, ainsi que de différents intrants. Si on considère une relation directe entre la génétique de l'animal et l'émission de méthane, exprimée par kg de matière sèche ingérée, il n'y a pour l'instant pas de résultats probants. En revanche, la sélection d'animaux ou d'individus plus efficaces, mangeant moins pour une production identique, dits à faible ingestion résiduelle, est une piste intéressante. Les études ont été menées en particulier sur bovins à l'engraissement, pour lesquels l'ingestion résiduelle est facile à calculer. Comme la production de méthane dépend globalement des quantités ingérées, des animaux à faible ingestion résiduelle produisent moins de méthane par kg de viande, quoique légèrement plus par kg de matière sèche ingérée (Nkrumah *et al.*, 2006, revue de Basarab *et al.*, 2013). La sélection de tels animaux n'est toutefois pas en place sur le terrain en France; par ailleurs il est nécessaire au préalable de connaître les effets collatéraux possibles d'une telle sélection, sur la robustesse et la reproduction par exemple.

Au-delà de la composante génétique, la modification de la nutrition de l'animal a été très largement étudiée pour réduire les émissions de méthane en agissant sur le fonctionnement du rumen, soit en modifiant l'alimentation, soit par action sur les microorganismes. Deux articles de synthèse en français ont été publiés sur ce sujet il y a 6 ans (Doreau *et al.*, 2011a ; Popova *et al.*, 2011) ; le présent article reprend les éléments acquis à cette date et actualise les connaissances avec les études menées très récemment. Nous considérerons prioritairement la production de méthane par kg de matière sèche ingérée, qui traduit le mieux l'efficacité d'un additif, d'un aliment ou d'une ration sur la méthanogenèse. L'émission journalière de méthane est peu informative car elle dépend des quantités ingérées ; l'émission par kg de viande et de lait est intéressante mais combine l'effet propre sur la méthanogenèse et l'effet sur les performances.

## I. LES MECANISMES DE FORMATION DU METHANE ENTERIQUE

Le méthane entérique est essentiellement produit dans le rumen des ruminants, par la fermentation microbienne des glucides de la ration. Les mécanismes ont été détaillés par Popova *et al.* (2011) et les grands principes sont présentés ici. Les composés celluloseux et l'amidon des fourrages et des concentrés sont dégradés par les enzymes des bactéries, protozoaires et champignons du rumen en acides gras volatils (acétate, propionate, butyrate), qui sont les nutriments énergétiques majeurs des ruminants. Cette dégradation s'accompagne d'une production nette d'hydrogène. Cet hydrogène est converti en méthane par les enzymes d'une autre catégorie de microorganismes, les archées méthanogènes (appelés aussi méthanogènes), dont c'est la fonction spécifique (Figure 1). Environ 80% du méthane est produit dans le rumen, les 20% restants l'étant dans le gros

intestin. Le méthane produit dans le rumen est éructé, la plus grosse partie du méthane produit dans le gros intestin est absorbé, rejoint les poumons puis est exhalé, le complément étant évacué dans les flatulences.

Pour réduire les émissions de méthane entérique, il y a deux voies : réduire la production d'hydrogène dans le rumen sans diminuer la production d'acides gras volatils (ce qui compromettrait les performances de l'animal), ou utiliser l'hydrogène autrement que pour former du méthane (Figure 1). Pour la première voie, il y a deux pistes : augmenter la part du propionate dans les acides gras volatils car le propionate utilise l'hydrogène, ce qui compense en partie la forte production d'hydrogène par l'acétate et le butyrate ; réduire la population de protozoaires, car ce sont de forts producteurs d'hydrogène (Guyader *et al.*, 2014). Des actions sur

l'alimentation, spécifiées dans la suite du texte, sont possibles pour atteindre cet objectif. Pour la deuxième voie, il y a également deux pistes. La première est de réduire la méthanogénèse, soit en inhibant le développement de la population de méthanogènes, soit en bloquant une étape de la voie biochimique aboutissant à la formation de méthane. La seconde est de dévier l'utilisation de l'hydrogène vers d'autres voies biochimiques : acétogénèse, réduction de nitrates, de sulfates ou d'acides organiques. L'Inra mène depuis une décennie des études visant à réduire les émissions de méthane par la voie de l'alimentation, par l'une ou l'autre de ces pistes ou l'association des deux. Il est soutenu en cela par des financements publics et privés (Encadré 1).

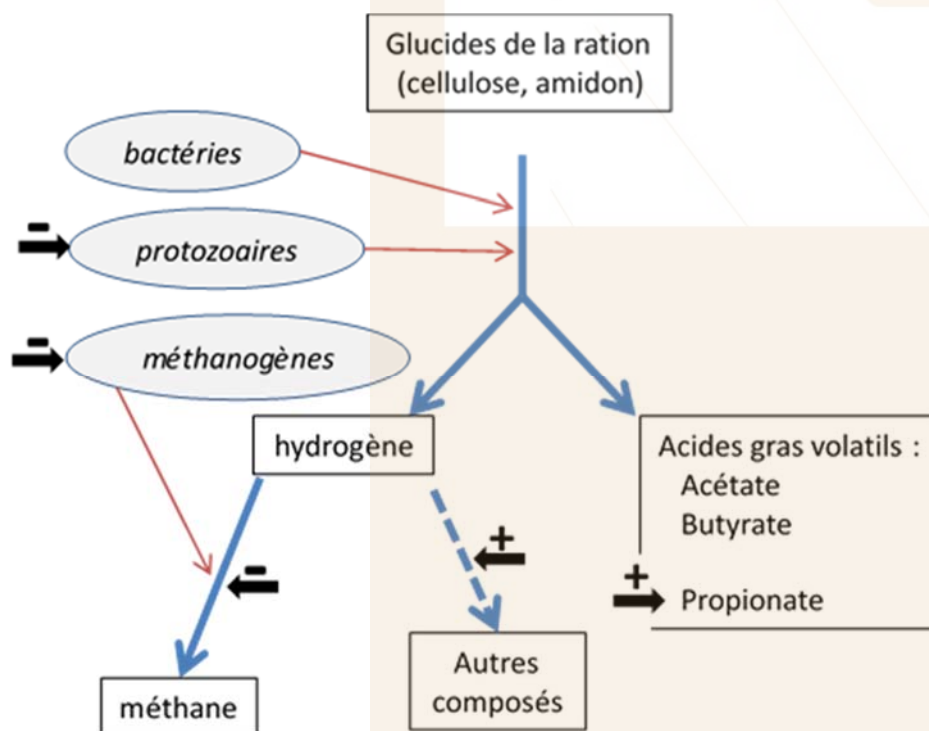
### **Encadré 1 : Un partenariat innovant avec l'industrie**

Les recherches visant à réduire l'émission de méthane sont souvent coûteuses et nécessitent un financement sur le long terme, associant des recherches génériques et des travaux opérationnels pour aboutir à des solutions concrètes. Des crédits de l'Union Européenne et des crédits nationaux ciblés (Agence Nationale de la Recherche et nombreux autres guichets) sont obtenus en réponse à des appels d'offres ; la concurrence entre équipes candidates est rude. En parallèle, le secteur privé sollicite fréquemment l'Inra en vue de recherches contractuelles.

C'est ainsi qu'en 2015 un accord de consortium de 5 ans a été signé entre l'Inra et 11 partenaires : l'Institut de l'Élevage, chargé de la recherche-développement sur les ruminants, Apis-Gene, organisme de soutien à la recherche, et 9 firmes privées : innovantes dans l'alimentation du bétail, firmes service ou utilisatrices de produits animaux : Adisseo, Agrial, Deltavit, DSM, Lallemand, Moy Park Orléans, Neovia, Techna, Valorex. Le projet associe des aspects très appliqués rapidement utilisables par l'entreprise : développement de méthodes de mesure des émissions de méthane en ferme, établissement d'équations de prédiction des émissions, et des recherches plus fondamentales : étude des relations entre émissions de méthane et écosystème microbien du rumen, analyse métabolomique.

Ce projet a fait l'objet d'une réelle co-construction et permet la mise en commun de savoirs et d'expériences, tout en améliorant la compétitivité de chaque entreprise même si certaines d'entre elles sont concurrentes.

**Figure 1 : Voies biochimiques impliquées dans la formation du méthane dans le rumen**



La flèche tiretée indique une voie normalement très minoritaire.  
 Les flèches fines rouges indiquent l'action de chaque catégorie de micro-organismes.  
 Les grosses flèches noires avec les signes + ou - indiquent les modes d'action envisagés pour réduire la production de méthane.

## II. NATURE DES FOURRAGES ET PROPORTION DE CONCENTRES

Entre les différents types de fourrages à base d'herbe (herbe fraîche, ensilage, foin), les émissions de méthane par kg de matière sèche ingérée varient assez peu. En fait, les fourrages les plus digestibles émettent plus par kg de matière sèche ingérée que les fourrages les moins digestibles, mais ils fournissent également plus de nutriments énergétiques (acides gras volatils).

Pour une valeur nutritive équivalente de la ration, les émissions, que l'on exprime alors par kg de matière organique digestible, sont comparables entre l'herbe verte, l'ensilage et le foin, quel que soit le stade de végétation. Une conséquence de ces variations limitées est qu'il y a peu de possibilités d'agir sur la production de méthane chez la vache allaitante, qui est alimentée essentiellement à base de fourrages. Pour sa part, l'ensilage de maïs entraîne généralement des émissions légèrement plus faibles que les fourrages à base d'herbe, en raison d'une teneur en amidon plus élevée (Doreau *et al.*, 2011a). Un essai sur bovins à l'engraissement n'a pas montré de différence de production de méthane entre une ration 50% foin – 50% concentré et une ration 65% ensilage de maïs – 35% concentré, les deux rations ayant la même teneur en amidon (Doreau *et al.*, 2011b). Dans l'état actuel des connaissances, la nature des fourrages ne doit pas être prise en compte pour évaluer la propension d'une ration à réduire le méthane.

Indépendamment de leur teneur en glucides et de leur digestibilité, certains fourrages pourraient contribuer à réduire la production de méthane. La luzerne a souvent été évoquée, suite à des travaux étrangers, mais des études récentes suggèrent que ce n'est pas le cas ; ainsi la luzerne déshydratée en remplacement du tourteau de soja ne réduit pas la production de méthane (Doreau *et al.*, 2014a). Il a été récemment montré que le trèfle blanc et le trèfle violet ne contribuent pas à réduire l'émission de méthane (Martin *et al.*, 2016a). En revanche, les plantes riches en tanins réduisent le méthane, par l'intermédiaire d'une action toxique sur les méthanogènes ; une partie de leur effet négatif sur le méthane lorsqu'ils sont substitués à d'autres fourrages est liée à une diminution de leur digestibilité, et donc de l'ensemble des fermentations des glucides. Cette action a été montrée avec des fourrages tropicaux riches en tanins (Rira *et al.*, 2015), mais aussi avec des plantes comme le sainfoin (Aufrère *et al.*, 2012). Dans le cas des animaux producteurs de viande,

## III. APPORT DE LIPIDES

La solution nutritionnelle actuellement reconnue par la communauté scientifique comme la plus efficace pour réduire les émissions de méthane est le remplacement d'une partie des glucides de la ration par des lipides (Martin *et al.*, 2010, Hristov *et al.*, 2013). La raison essentielle est que les glucides produisent de l'hydrogène, précurseur du méthane, alors que les lipides, qui ne sont pas fermentés dans le rumen, n'en produisent pas. Une seconde raison est l'action négative des lipides sur les protozoaires, connue depuis longtemps (Doreau et Ferlay, 1995). Cette action est la plus prononcée avec les acides gras saturés à chaîne moyenne (12 et 14 carbones) comme l'huile de coprah ou l'huile de palmiste, et avec un acide gras polyinsaturé, l'acide linoléique (18 carbones et 3 doubles liaisons) présent dans la graine de lin. Enfin, les lipides, au moins les polyinsaturés, pourraient réduire les populations ou l'activité d'une part de bactéries

l'utilisation de plantes riches en tanins est limitée par leur digestibilité souvent faible. Une piste pourrait être l'utilisation de plantes riches à tanins broyées et agglomérées : des plantes tropicales riches en tanins ainsi traitées ont été consommées en grande quantité, ce qui a permis une réduction de méthane avec une augmentation d'énergie digestible ingérée par rapport à un foin de graminées non broyé (Archimède *et al.*, 2016). Ce résultat reste toutefois à confirmer, et le coût du traitement à évaluer.

L'augmentation du pourcentage de concentré dans la ration entraîne une diminution de la production de méthane, en grande partie liée à l'augmentation de la part de propionate dans le mélange d'acides gras volatils. La diminution est curvilinéaire, d'autant plus importante que le pourcentage de concentré s'accroît (Sauvant *et al.*, 2011). Même si elle est sensible au-delà de 50% de concentré, c'est à partir de 80% de concentré dans la ration qu'elle est systématiquement très marquée. Cela a été vérifié sur des taurillons à l'engraissement recevant une ration à près de 90% de concentré (Doreau *et al.*, 2011b) et est pris en compte par le GIEC pour les estimations d'émissions dans le cadre des inventaires nationaux : dans la méthode de calcul dite Tier 2, le facteur de conversion de l'énergie brute ingérée en énergie du méthane est fixée à 6,5% pour tous les bovins et toutes les rations, sauf les « bovins en parc d'engraissement avec plus de 90% de concentré dans la ration », pour lesquels ce facteur est de 3,0% (GIEC, 2006). Mais ce type de ration, utilisé en France de manière très limitée dans les régimes d'engraissement de bovins, en général avec des Blonds d'Aquitaine, présente les inconvénients d'un risque potentiel pour la santé de l'animal (acidose digestive) et d'une compensation par des émissions accrues des autres gaz à effet de serre (protoxyde d'azote, gaz carbonique), et d'autres impacts environnementaux (potentiel d'eutrophisation plus élevé), comme le montre l'Encadré 2 ; de plus l'utilisation massive de concentré par les herbivores pose un problème de nature éthique et environnementale par rapport à l'alimentation de l'Homme et des monogastriques. Pour ces raisons, il n'est pas possible de proposer des rations extrêmement riches en concentré (plus de 80%) comme un moyen pour réduire les émissions de méthane, même si pour le GIEC, c'est la seule manière de réduire significativement le méthane dans l'alimentation des ruminants.

cellulolytiques, qui contribuent à la production d'hydrogène, d'autre part des méthanogènes (Popova *et al.*, 2011).

Les acides gras saturés à chaîne moyenne ne sont pas préconisés pour réduire le méthane, en raison de leur effet délétère possible (quoique non prouvé) sur la qualité nutritionnelle des lipides de la viande. Le lin, contenant des acides gras polyinsaturés, a un effet marqué pour réduire le méthane dans de nombreux essais, par une action spécifique sur les microbes du rumen, en particulier les protozoaires. Cet effet se maintient sur le long terme, au moins sur une lactation pour ce qui concerne les essais sur vaches laitières (Martin *et al.*, 2011). L'intérêt du lin est double, puisqu'en même temps il augmente légèrement les acides gras oméga-3 du lait et de la viande, et diminue les acides gras saturés (Doreau et Ferlay, 2015). La réduction de méthane chez des vaches laitières peut atteindre 50% pour des teneurs en acides gras du lin de l'ordre de 7% de la ration (Martin *et al.*, 2008) ; elle est de l'ordre de

10 à 15% pour une teneur de 4% d'acides gras du lin (6% d'acides gras dans la ration) utilisable dans la pratique, mais ne dépasse guère 5% pour une teneur de 2% d'acides gras du lin (Martin *et al.*, 2016b). Très curieusement, plusieurs essais menés à l'étranger n'ont pas permis d'observer une réduction de production de méthane avec la graine de lin, bien que celle-ci ait été distribuée en remplacement de glucides (Van Zijderveld *et al.*, 2011, Veneman *et al.*, 2015). Il n'a pas été possible d'expliquer de manière cohérente ces différences entre essais par le type de ration ou son mode de distribution. La très grande majorité des essais utilisant le lin ont été réalisés sur vaches laitières. Avec des bovins à l'engrais, nous n'avons pas observé de différence de production de méthane par kg de matière sèche entre un concentré « parois » et un concentré « amidon + lin » ; mais il s'agissait d'une ration très riche en concentré qui a pu ne pas potentialiser l'effet des lipides (Eugène *et al.*, 2011). La forme de présentation recommandée pour les oléagineux, en particulier le lin, sensible à l'oxydation, est la graine extrudée. L'extrusion permet une utilisation facile pour l'éleveur d'un aliment riche en lipides qui, simplement broyé ou sous forme d'huile, serait d'une utilisation plus délicate et d'une durée de conservation plus limitée ; l'utilisation de graine de lin présente toutefois un coût pour l'éleveur. L'herbe jeune de printemps fournit un

apport journalier en acides gras polyinsaturés élevé, lorsqu'elle est consommée avec peu de concentré ; mais il n'y a pas d'études montrant son effet sur la production de méthane, et la durée de son utilisation dans la ration des ruminants est temporaire.

Des sources lipidiques autres que le lin contribuent aussi à baisser la production de méthane, bien qu'en moyenne l'amplitude soit moindre qu'avec le lin. D'ailleurs certains auteurs estiment que l'efficacité des lipides pour réduire le méthane ne dépend pas significativement de la source de lipides, malgré une action différente sur les microbes du rumen (Grainger et Beauchemin, 2011). Diverses sources de lipides, riches en acide oléique ou linoléique (18 carbones et 1 ou 2 doubles liaisons) ont été étudiées pour leur effet sur le méthane avec des bovins à viande, souvent au Canada, et ont montré leur efficacité : l'huile de tournesol (McGinn *et al.*, 2004), l'huile de colza (Beauchemin et McGinn, 2006), les drèches de distillerie avec solubles, qui contiennent relativement peu de lipides (12%) mais peuvent être inclus dans la ration en quantité élevée (McGinn *et al.*, 2009). Toutefois, il est nécessaire de s'assurer de l'absence d'effet collatéral négatif sur les performances de l'animal ou sur d'autres impacts environnementaux, qui pourraient résulter d'un taux d'incorporation trop élevé dans la ration.

## Encadré 2 : Remplacer les émissions de méthane dans un cadre plus large

Le méthane n'est qu'un des trois principaux gaz à effet de serre. Les émissions de gaz à effet de serre sont partiellement compensées par le stockage de carbone dans le sol, et ne sont qu'un des multiples impacts environnementaux, même si leur réduction est une priorité planétaire. Enfin, les aspects environnementaux ne sont qu'un des piliers de la durabilité des systèmes d'élevage. S'intéresser uniquement au méthane est donc réducteur et peut conduire à des conclusions inadéquates comme le montre l'exemple ci-dessous.

Après une mesure de la production de méthane par des taurillons recevant trois rations très différentes, nous avons évalué divers impacts environnementaux de ces rations. Trois lots de taurillons ont été engraisés pendant 6 mois avec des rations à 65% d'ensilage de maïs et 35% de concentré (EM), classiques en France, 50% de foin de prairie naturelle et 50% de concentré (F), peu pratiquées jusqu'à présent, et 86% de concentré (essentiellement céréales) et 16% de paille (C), parfois utilisées en France mais surtout caractéristiques du système « feedlot » américain.

Le tableau ci-dessous (Doreau *et al.*, 2014c) montre que l'intérêt des rations très concentrées pour faire baisser les émissions de méthane entérique est en grande partie compensé au niveau de l'ensemble des gaz à effet de serre. Cet effet est renforcé si on prend en compte la séquestration du carbone par les sols sous prairie naturelle (les deux chiffres correspondant à deux hypothèses de calcul). Et le classement des rations selon leur « valeur environnementale » diffère selon le critère considéré. Cette étude montre aussi que la ration à base de foin utilise beaucoup plus de terres, mais que ce sont surtout des herbages.

Impacts environnementaux par kg de gain de poids	Ration EM	Ration F	Ration C
Méthane entérique (kg éq-CO <sub>2</sub> )	3,81	3,33	1,56
Gaz à effet de serre bruts <sup>1</sup> (kg éq-CO <sub>2</sub> )	4,74	5,16	3,65
Gaz à effet de serre nets <sup>1</sup> (kg éq-CO <sub>2</sub> )	4,74	3,04 – 4,56	3,65
Potentiel d'eutrophisation (g éq-PO <sub>4</sub> ) <sup>2</sup>	19,0	16,5	21,5
Potentiel d'acidification (g éq-SO <sub>2</sub> ) <sup>2</sup>	31,8	31,3	29,4
Consommation d'énergie (MJ)	13,0	18,7	19,7
Occupation de terres agricoles sur un an (m <sup>2</sup> )	4,5	11,7 (dont 8,3 herbages)	4,6

<sup>1</sup> Bruts : somme pondérée des émissions de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> ; nets : après soustraction de l'équivalent CO<sub>2</sub> stocké dans les sols

<sup>2</sup> eq-PO<sub>4</sub> : équivalent phosphate ; eq-SO<sub>2</sub> : équivalent dioxyde de soufre.

D'autres critères de durabilité donnent également des résultats divergents : la ration foin dégage la marge économique la plus faible ; en revanche elle permet une meilleure qualité nutritionnelle des acides gras du muscle. Il faut en outre souligner que l'utilisation massive de céréales pour l'alimentation des ruminants pose question au plan éthique.

## IV. ADDITIFS ALIMENTAIRES

Depuis une dizaine d'années, les chercheurs de nombreux pays explorent des pistes très diverses pour réduire les émissions de méthane, et confrontent leurs résultats. Parmi les additifs dont l'efficacité a été parfois montrée, nous ne discuterons pas l'effet de produits chimiques dont la toxicité est probable (chloroforme, bromoethylsulfonate, etc...), ou d'antibiotiques ionophores interdits dans l'Union Européenne (monensin).

Les produits dits « naturels » comme certaines plantes, extraits de plantes (plantes riches en saponines comme le thé ou extrait d'ail riche en diallyldisulfide par exemple) et huiles essentielles, qui donnent souvent des résultats positifs dans des essais *in vitro*, n'ont pas pour l'instant donné de résultats probants et répétables sur l'animal dans des essais *in vivo*, selon la bibliographie. Le cas le plus typique est celui de l'extrait d'ail qui réduit la production de méthane *in vitro* presque systématiquement (par exemple Doreau *et al.*, 2017) mais qui ne s'est pas révélé efficace lorsqu'il a été testé *in vivo* (Van Zijderveld *et al.*, 2011 chez la vache, Staerfl *et al.*, 2012, chez le taurillon). Souvent, les systèmes *in vitro* sont très simplificateurs des processus ruminiaux et donnent une réponse à très court terme aux molécules susceptibles d'être actives. Dans le cas général des huiles essentielles extraites de plantes, toutes n'ont pas été testées et il est probable que dans l'avenir certaines s'avèreront efficaces. Il faudra néanmoins s'assurer que leur effet est répétable, car une même plante peut contenir un mélange variable de molécules, en fonction de la saison ou du lieu de récolte.

Les saponines sont des molécules présentes dans les plantes entraînant une diminution des protozoaires, par suite de l'atteinte à l'intégrité de leurs membranes cellulaires, et sont donc susceptibles de réduire la production de méthane. Les résultats obtenus avec des constituants sont souvent convaincants *in vitro*, plus rarement *in vivo* (Goel et Makkar, 2012). L'effet sur les protozoaires semble limité dans le temps (Koenig *et al.*, 2007), ce qui pourrait contribuer au manque de résultats positifs observés *in vivo*. Les effets les plus probants ont été trouvés dans des études chinoises qui ont montré une très forte réduction de la production de méthane, atteignant presque 30% avec des saponines de thé (Mao *et al.*, 2010). Toutefois cet effet n'a pas été reproduit chez la vache tarie (Guyader *et al.*, 2015a) ou le bouvillon (Ramirez-Restrepo *et al.*, 2016). Il semble donc prématuré de proposer les saponines comme levier d'action pour réduire le méthane. Autres constituants secondaires des plantes, les tanins ont été évoqués lorsqu'ils sont distribués sous forme de fourrages. Mais des extraits de tanins sont également utilisés, et peuvent se révéler efficaces. Ainsi de l'extrait d'*Acacia mearnsii* a permis de réduire la production de méthane en particulier dans un essai de Staerfl *et al.* (2012) sur des taurillons âgés de 5, 9 et 11 mois ; cet apport de tanins s'est traduit par une baisse de digestibilité des parois à 5 et 9 mois mais pas à 11 mois. Cet effet négatif des extraits de tanins ne s'est en revanche pas retrouvé dans d'autres essais récapitulés dans la revue de Doreau *et al.* (2011a).

Les acides organiques (malate, fumarate) ont été testés car ils sont dégradés dans le rumen en fournissant du propionate, donc en consommant de l'hydrogène. Quelques essais très encourageants n'ont pas été corroborés par des études concluantes (McGinn *et al.*, 2004 chez le bouvillon, Van

Zijderveld *et al.*, 2011 chez la vache laitière). Cette technique n'est actuellement plus considérée comme potentiellement efficace.

Une voie nouvelle pour modifier le méthane est l'addition de nitrate de calcium dans la ration (synthèse de Lee et Beauchemin, 2014). Le nitrate se transforme en nitrite puis en ammoniac dans le rumen, et utilise ainsi l'hydrogène. Jusqu'à présent cet additif s'est révélé efficace dans 100% des essais réalisés sur l'animal (une douzaine au total), entre autres chez des bouvillons (Hulshof *et al.*, 2012), et l'effet de l'association entre lipides du lin et nitrates a été additif chez la vache tarie (Guyader *et al.*, 2015a) et permanent sur vache en production (Guyader *et al.*, 2016), car la baisse de production d'hydrogène liée aux lipides et la baisse de consommation d'hydrogène due aux nitrates sont indépendantes. La formation d'ammoniac implique qu'il doit être employé uniquement avec des rations pauvres en azote fermentescible (ensilage de maïs), et remplacer d'autres sources d'azote fermentescible. Outre cette contrainte, cette technique souffre de deux handicaps : la mauvaise image du mot « nitrate » auprès des éleveurs et du public, et la nécessité de bien contrôler sa distribution pour éviter un risque pour la santé de l'animal : la méthémoglobinémie, liée à l'apparition transitoire de nitrites dans le rumen en cas de dosage excessif de la ration en nitrate. Ce risque est cependant limité lorsque l'apport de nitrates est progressif (Lee et Beauchemin, 2014) ; cela a été vérifié entre autres chez le bouvillon lorsque les quantités de nitrates ne dépassent pas 15 g/kg de ration (Duthie *et al.*, 2016). En revanche, il n'y a selon toute probabilité pas de résidus de nitrates ou de nitrites dans la viande dans la mesure où on n'en retrouve pas dans les abats de taurillons (Doreau *et al.*, 2016) pas plus que dans le lait et les produits laitiers (Guyader *et al.*, 2016).

Récemment une nouvelle molécule, le 3-nitrooxypropanol (3-NOP), a été testée. Cette molécule est un analogue du coenzyme M, impliqué dans la dernière étape de la chaîne réactionnelle de la méthanogenèse dont l'enzyme clé est la coenzyme M-réductase. Elle a montré une très forte efficacité dans plusieurs essais réalisés depuis 2013, y compris à long terme, sans effet négatif sur les performances de l'animal. Plusieurs essais ont été très convaincants chez la vache laitière ; ainsi Haisan *et al.* (2014) ont enregistré une diminution de 60% de la production de méthane par kg de matière sèche ingérée, et une augmentation du gain de poids. Sur des bovins viande, une diminution de 33% a été observée, accompagnée d'une augmentation de la part de propionate dans les acides gras volatils, sans modification de la digestibilité (Romero-Perez *et al.*, 2014). A l'heure actuelle, le 3NOP est le produit à action systématique la plus efficace pour réduire la production de méthane ; de nombreux essais sont en cours dans le monde pour préciser les conditions de son action et ses éventuels effets secondaires sur la santé de l'animal. Un produit naturel extrait de la noix de cajou pourrait avoir un mode d'action similaire sur la méthanogenèse grâce à un composé qui pourrait être l'acide anacardique (Shinkai *et al.*, 2012, sur vaches tarées), mais l'effet sur la méthanogenèse est plus limité et demande confirmation, et les effets sur les performances animales doivent être précisés.

## V. APPORT POSSIBLE DES BIOTECHNOLOGIES

L'utilisation de biotechnologies est une réponse innovante au problème des émissions chez le ruminant. Pourtant, malgré le fait que certaines solutions ont fait l'objet d'annonces enthousiastes dans la presse, la réalité est assez décevante, du moins au stade actuel des recherches. La vaccination des animaux contre les méthanogènes du rumen, proposée il y a plus d'une décennie par une équipe australienne et présentée comme efficace (Wright *et al.*, 2004) n'a jamais permis de résultats concrets. De même, l'utilisation d'anticorps anti-méthanogènes ne s'est pas révélée efficace (Cook *et al.*, 2008) ; cette pratique pourrait en outre poser des problèmes d'acceptabilité sociale. La modification de l'écosystème microbien ruminal par ajout de divers micro-organismes, qui est un rêve ancien de nombreux chercheurs, ne semble pas efficace. L'incorporation dans la ration de levures *Saccharomyces cerevisiae*, déjà testée sans succès il y a plus d'une décennie (Doreau et Jouany, 1998, sur vaches laitières, McGinn *et al.*, 2004, sur bouvillons), s'est révélée inefficace dans de nombreux essais plus récents bien qu'une tendance à la décroissance du méthane ait été observée dans un essai sur vaches taries (Chung *et al.*, 2011). La distribution aux animaux de diverses souches spécifiques de bactéries propioniques ou lactiques n'a pour l'instant pas été concluante en raison de l'absence de répétabilité de la réponse, et d'une divergence entre essais (revue de

Jeyanathan *et al.*, 2014). Toutefois, des études plus systématiques visant à définir les souches les plus appropriées sont nécessaires ; l'utilisation de certaines souches de bactéries propioniques et lactiques seules ou en association pourrait s'avérer intéressante (Jeyanathan *et al.*, 2016, Philippeau *et al.*, 2017) et constitue une piste à explorer. Enfin il a été proposé de développer l'utilisation de l'hydrogène vers une voie biochimique dite acéto-réductrice plutôt que vers la formation de méthane grâce à des bactéries acétogènes comme cela est le cas dans l'intestin du kangourou. Mais elles n'entraînent pas d'effet anti-méthanogène chez le ruminant, car ces bactéries sont non compétitives avec les méthanogènes pour l'utilisation de l'hydrogène (Morgavi *et al.*, 2010). Enfin, la suppression totale des protozoaires ou défaunation, efficace en station de recherche (Popova *et al.*, 2011), n'est pas applicable actuellement en élevage ; par ailleurs la défaunation a des effets contrastés sur la digestion, entraînant une amélioration de l'utilisation de l'azote dans le rumen mais une réduction de la digestibilité des parois végétales de la ration. Une défaunation presque totale pourrait être obtenue par introduction dans le rumen d'une forte dose d'huile de lin ; il faudrait toutefois s'assurer qu'il n'y a pas refaunation sur le long terme, ainsi que des conséquences sur la méthanogenèse et les fermentations du nouvel équilibre microbien qui s'est instauré.

## VI. MISE EN ŒUVRE DE MESURES CONCRETES

Les techniques permettant de réduire les émissions de méthane entraînent généralement une augmentation des coûts de production. L'usage par les éleveurs de ces techniques ne se répandra que s'ils y trouvent des bénéfices collatéraux. Ceux-ci peuvent être une amélioration des performances de l'animal, une amélioration de la reproduction, etc... Actuellement ce n'est pas le cas, ou ce n'est pas scientifiquement démontré. Les bénéfices pourraient aussi consister en l'octroi de subventions ou d'avantages financiers ciblés, comme un prix de vente accru des produits.

Une étude comparant les possibilités de réduction des émissions de gaz à effet de serre et les coûts induits pour l'agriculture française a été récemment commandée à l'Inra par les ministères en charge de l'Agriculture et de l'Environnement, et par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (Ademe), avec comme contrainte de ne pas préconiser un changement de système. Les solutions retenues pour réduire les émissions de méthane entérique (lipides insaturés, nitrate considéré en tant qu'ingrédient) sont applicables à la production de viande, bien qu'à un degré plus limité qu'à la production laitière, car elles nécessitent la distribution de concentré, ce qui limite l'application aux vaches allaitantes qui n'en reçoivent qu'à quelques périodes de l'année, et dont l'alimentation se compose en moyenne de 85% de fourrages (Institut de l'Élevage, 2014). Elles permettent une réduction significative des émissions au

niveau du « troupeau France » mais sont plutôt coûteuses (Doreau *et al.*, 2014b) en comparaison d'actions sur les cultures (diminution de la fertilisation azotée, non-labour, etc.) à certaines autres techniques applicables aux ruminants (réduction de la fertilisation azotée, amélioration de la conduite du pâturage) (Klump *et al.*, 2013). L'utilisation de techniques de réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle française demande donc non seulement de trouver des moyens techniques efficaces, mais aussi de réfléchir simultanément aux conséquences économiques.

Le même travail a été réalisé dans d'autres pays avec des propositions différentes : aux Etats-Unis et au Royaume-Uni, toutes les suggestions vont vers des solutions entraînant un gain de productivité et d'efficacité, ou sont peu efficaces (vaccins), parfois même interdites dans l'Union Européenne (ionophores). En Irlande, les solutions concernent essentiellement la production de viande, et sont proches des propositions françaises. Elles visent à faire baisser l'ensemble des gaz à effet de serre et pas seulement le méthane, en proposant entre autres l'allongement de la durée de pâturage et la réduction de la fertilisation azotée, mais aussi des changements de système de production : accroissement de la production de viande à partir du troupeau laitier, engraissement de taurillons à la place de bœufs (Schulte *et al.*, 2011).

## CONCLUSION

L'Encadré 3 récapitule les recherches menées à l'INRA pour réduire les émissions de méthane entérique des ruminants, et le Tableau 1 fait le bilan très synthétique de l'intérêt des différentes pistes étudiées dans cet objectif. Malgré de très nombreuses études réalisées dans le monde, peu de solutions peuvent être proposées, car l'efficacité d'un composé permettant de réduire les émissions de méthane doit être systématique, agir à long terme, et ne pas poser de problème d'acceptabilité par l'éleveur ou le consommateur. En outre, elles ne doivent pas entraîner d'effet collatéral négatif sur les performances de l'animal ou d'autres impacts négatifs sur l'environnement. Toutefois, les solutions qui sont efficaces et acceptables, comme l'emploi de lipides insaturés, sont d'ores et déjà utilisables sur le terrain et, dans le cas du lin, font l'objet d'une promotion importante. Dans un proche avenir, des additifs alimentaires efficaces seront probablement disponibles. Il sera alors nécessaire de développer les études visant à étudier l'additivité, la synergie ou l'antagonisme entre additifs, ou entre additifs et apport de lipides. Enfin, l'effet rémanent d'un agent anti-méthanogène appliqué dans le jeune âge de l'animal, avant le développement de l'écosystème microbien de son rumen, est en cours d'investigation.

### Encadré 3 : Les recherches sur la mitigation des émissions de méthane à l'INRA

Des recherches sont menées depuis plus d'une décennie au Centre Inra Auvergne-Rhône-Alpes, à la suite de mesures systématiques de la production de méthane dans des études de métabolisme énergétique des ruminants, qui avaient débuté dans les années 1970.

Les principaux facteurs étudiés sont :

- ✓ Nature du fourrage (nature botanique, stade de végétation, ensilage d'herbe vs ensilage de maïs, fourrages tempérés vs tropicaux)
- ✓ Rations très riches en concentré, nature du concentré
- ✓ Rations enrichies en lipides, nature des lipides
- ✓ Plantes riches en tanins (tempérées ou tropicales)
- ✓ Additifs alimentaires naturels (saponines, extrait d'ail, huiles essentielles)
- ✓ Additifs alimentaires chimiques (nitrates, 3-NOP, etc)
- ✓ Apport de microorganismes exogènes (levures, bactéries) ou de produits de leur métabolisme

Ces voies de réduction des émissions de méthane ont été testées *in vivo*, sur moutons, vaches laitières, taurillons à l'engraissement et génisses, parfois sur le long terme, parfois en associant deux agents, depuis peu en étudiant l'effet rémanent de l'application de ces techniques dans le jeune âge. Pour cela, les équipes de l'Inra disposent de trois techniques de mesure : les chambres respiratoires, l'utilisation du traceur gazeux SF<sub>6</sub>, le système de mesures discontinues Greenfeed. Ces études sont souvent précédées ou complétées par des mesures *in vitro*. Certaines études ont été menées avec des fourrages tropicaux en collaboration avec le centre Inra Antilles-Guyane. Parallèlement, les Centres de Jouy-en-Josas et Val de Loire mènent des études sur les effets de la génétique bovine sur la production de méthane.

**Tableau 1 : Les principales voies de réduction du méthane par l'alimentation ou l'action sur les microbes du rumen : efficacité et acceptabilité**

Mode de réduction	Efficacité <i>in vivo</i>	Applicabilité (si efficace)
Rations très riches en concentré	oui	Limitée par choix éthique (durabilité) ou en raison d'autres effets négatifs sur l'environnement
Lipides insaturés	oui	Bonne, mais problème de coût
Plantes riches en tanins	oui	Pour animaux à besoins modérés
Plantes riches en saponines	variable	Prématurée
Autres plantes, extraits ou huiles essentielles	faible ou non systématique	Pour l'instant limitée, mais intérêt possible à l'avenir
Acides organiques	variable	Faible ; produit coûteux
Nitrate	efficace	Limitée par les risques pour la santé de l'animal et l'acceptabilité par l'éleveur et le consommateur
3-nitrooxypropanol	très efficace	Pas encore commercialisé ; problèmes éventuels d'acceptabilité d'un additif de synthèse par le consommateur
Vaccination, anticorps	?	-
Ajout de levures	non	-
Ajout de souches bactériennes	variable	Prématurée



## Références :

- Archimède H., Rira M., Barde D.J., Labirin F., Marie-Magdeleine C., Calif B., Periacarpin F., Fleury J., Rochette Y., Morgavi D.P., Doreau M. (2016). Potential of tannin-rich plants, *Leucaena leucocephala*, *Glyricidia sepium* and *Manihot esculenta*, to reduce enteric methane emissions in sheep. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 100, 1149-1158.
- Aufrère J., Theodoridou K., Baumont R. (2012). Valeur alimentaire pour les ruminants de légumineuses contenant des tanins condensés en milieux tempérés. *Inra Productions Animales*, 25, 29-44.
- Basarab J.A., Beauchemin K.A., Baron V.S., Ominski K.H., Guan L.L., Miller S.P., Crowley J.J. (2013). Reducing GHG emissions through genetic improvement for feed efficiency: effects on economically important traits and enteric methane production. *Animal*, 7(s2), 303-315.
- Beauchemin K.A., McGinn S.M. (2006). Methane emissions from beef cattle: Effects of fumaric acid, essential oil, and canola oil. *Journal of Animal Science*, 84, 1489-1496.
- Chung Y.H., Walker N.D., McGinn S.M., Beauchemin K.A. (2011). Differing effects of 2 active dry yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) strains on ruminal acidosis and methane production in nonlactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 94, 2431-2439.
- Cook S.R., Maiti P.K., Chaves A.V., Benchaar C., Beauchemin K.A., McAllister T.A. (2008). Avian (IgY) anti-methanogen antibodies for reducing ruminal methane production: in vitro assessment of their effects. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48, 260-264.
- Doreau M., Ferlay A. (1995). Effect of dietary lipids on nitrogen metabolism in the rumen: a review. *Livestock Production Science*, 43, 97-110.
- Doreau M., Jouany J.P. (1998). Effect of a *Saccharomyces cerevisiae* culture on nutrient digestion in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 81, 3214-3221.
- Doreau M., Martin C., Eugène M., Popova M., Morgavi D.P. (2011a). 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 Productions Animales, 24, 461-474.
- Doreau M., Van der Werf H.M.G., Micol D., Dubroeuq H., Agabriel J., Rochette Y., Martin C. (2011b). Enteric methane production and greenhouse gases balance of diets differing in concentrate in the fattening phase of a beef production system. *Journal of Animal Science*, 89, 2518-2528.
- Doreau M., Ferlay A., Rochette Y., Martin C. (2014a). Effects of dehydrated lucerne and soya bean meal on milk production and composition, nutrient digestion, and methane and nitrogen losses in dairy cows receiving two different forages. *Animal*, 8, 420-430.
- Doreau M., Bamière L., Pellerin S., Lherm M., Benoit M. (2014b). Mitigation of enteric methane for French cattle: Potential extent and cost of selected actions. *Animal Production Science*, 54, 1417-1422.
- Doreau M., Van der Werf H.M.G., Nguyen T.T.H., Martin C., Bauchart D., Lherm M., Micol D., Mialon M.M. (2014c). Les rations d'engraissement de taurillons: éléments d'évaluation de la durabilité. *Viandes et Produits Carnés, hors-série 15° JSMTV*, 13-14.
- Doreau M., Arbre M., Rochette Y., Lascoux C., Martin C. (2016). Effect of linseed plus nitrate on methane emission in bulls, animal health and residues in offal. 67th Annual Meeting of the European Association for Animal Production (EAAP), Belfast, UK, 29 August-2 September 2016, Book of abstracts, p. 460.
- Doreau M., Arturo-Schaan M., Laverroux S. (2017). Garlic oil reduces ruminal fatty acid biohydrogenation in vitro. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 119, 1500388.
- Duthie C.A., Rooke J., Troy S., Hyslop J., Ross D., Waterhouse A., Roehe R. (2016). Impact of adding nitrate or increasing the lipid content of two contrasting diets on blood methaemoglobin and performance of two breeds of finishing beef steers. *Animal*, 10, 786-795.
- Eugène M., Martin C., Mialon M.M., Krauss D., Renand G., Doreau M. (2011). Dietary linseed and starch supplementation decreases methane production of fattening bulls. *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 330-337.
- Gerber P.J., Steinfeld H., Henderson B., Mottet A., Opio C., Dijkman J., Falcucci 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.
- GIEC (2006). Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Volume 4 : agriculture, foresterie et autres affectations des terres. Chapitre 10. [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/pdf/4\\_Volume4/V4\\_10\\_Ch10\\_Livestock.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/pdf/4_Volume4/V4_10_Ch10_Livestock.pdf)
- Goel G., Makkar H.P.S. (2012). Methane mitigation from ruminants using tannins and saponins. *Tropical Animal Health Production*, 44, 729-739.
- Grainger C., Beauchemin K.A. (2011). Can enteric methane emissions from ruminants be lowered without lowering their production? *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 308-320.
- Guyader J., Eugène M., Nozière P., Morgavi D.P., Doreau M., Martin C. (2014). Influence of rumen protozoa on methane emissions in ruminants: A meta-analysis approach. *Animal*, 8, 1816-1825.
- Guyader J., Eugène M., Meunier B., Doreau M., Morgavi D.P., Silberberg M., Rochette Y., Gérard C., Loncke C., Martin C. (2015a). Additive methane-mitigating effect between dietary linseed oil and nitrate fed to cattle. *Journal of Animal Science*, 93, 3564-3577.
- Guyader J., Eugène M., Doreau M., Morgavi D.P., Gérard C., Loncke C., Martin C. (2015b). Nitrate but not tea saponin feed additives decreased enteric methane emissions in nonlactating cows. *Journal of Animal Science*, 93, 5367-5377.
- Guyader J., Doreau M., Morgavi D.P., Gérard C., Loncke C., Martin C. (2016). Long-term effect of linseed plus nitrate fed to dairy cows on enteric methane emission and nitrate and nitrite residuals in milk. *Animal*, 10, 1173-1181.

Haisan J., Sun Y., Guan L.L., Beauchemin K.A., Iwaasa A., Duval S., Barreda D.R., Oba M. (2014). The effect of feeding 3-nitrooxypropanol on methane emissions and productivity of Holstein cows in mid-lactation. *Journal of Dairy Science*, 97, 3110-3119.

Hristov A.N., Oh J., Firkins J., Dijkstra J., Kebreab E., Waghorn G., Makkar H.P.S., Adesogan A., Yang W., Lee C., Gerber P.J., Henderson B., Tricarico J.M. (2013). Mitigation from methane and nitrous oxide emissions from animal operations. I. A review of enteric methane mitigation options. *Journal of Animal Science*, 91, 5045-5069.

Hulshof R.B.A., Berndt A., Gerrits W.J.J., Dijkstra J., Van Zijderveld S.M., Newbold J.R. and Perdok H.B. (2012). Dietary nitrate supplementation reduces methane emission in beef cattle fed sugarcane based diets. *Journal of Animal Science*, 90, 2317-2323.

Institut de l'Élevage (2014). Guide de l'alimentation du troupeau bovin allaitant. Vaches, veaux et génisses de renouvellement. Ed. Institut de l'Élevage, Paris.

Jeyanathan J., Martin M., Morgavi D.P. (2014). The use of direct-fed microbials for mitigation of ruminant methane emissions : a review. *Animal*, 8, 250-261.

Jeyanathan J., Martin M., Morgavi D.P. (2016). Screening of bacterial direct-fed microbials for their antimethanogenic potential in vitro and assessment of their effect on ruminal fermentation and microbial profiles in sheep. *Journal of Animal Science*, 94, 739-750.

Klump K., Favardin P., Benoit M., Pellerin S., Bamière L., Chemineau P., Lherm M., Pardon L., Doreau M. (2013). Réduction des émissions de gaz à effet de serre des ruminants : choix des techniques les plus efficaces, ampleur de la réduction, coût de leur mise en application. *Rencontres Recherches Ruminants*, 20, 315-318.

Koenig K.M., Ivan M., Teferedegne B.T., Morgavi D.P., Rode L.M., Ibrahim I.M., Newbold C.J. (2007). Effect of dietary *Enterolobium cyclocarpum* on microbial protein flow and nutrient digestibility in sheep maintained fauna-free, with total mixed fauna or with *Entodinium caudatum* monofauna. *British Journal of Nutrition*, 98, 504-516.

Lee C., Beauchemin K.A. (2014). A review of feeding supplementary nitrate to ruminant animals: nitrate toxicity, methane emissions, and production performance. *Canadian Journal of Animal Science*, 94, 557-570.

Mao H.L., Wang J.K., Zhou Y.Y., Liu J.X. (2010). Effects of addition of tea saponins and soybean oil on methane production, fermentation and microbial population in the rumen of growing lambs. *Livestock Science* 129, 56-62.

Martin C., Rouel J., Jouany J.P., Doreau M., Chilliard Y. (2008). Methane output from dairy cows in response to dietary supplementation of crude linseed, extruded linseed or linseed oil. *Journal of Animal Science*, 86, 2642-2650.

Martin C., Morgavi D.P., Doreau M. (2010). Methane mitigation in ruminants : from microbe to the farm scale. *Animal*, 4, 351-365.

Martin C., Pomiès D., Ferlay A., Rochette Y., Martin B., Chilliard Y., Morgavi D.P., Doreau M. (2011). Methane output and rumen microbiota in dairy cows in response to long term supplementation with linseed or rapeseed of grass silage- or pasture-based diets. *Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production*, 71, 243-247.

Martin C., Copani G., Niderkorn V. (2016a). Impacts of forage legumes on intake, digestion and methane emissions in ruminants. *Legume Perspectives*, 12, 24-25.

Martin C., Ferlay A., Mosoni P., Rochette Y., Chilliard Y., Doreau M. (2016b). Increasing linseed supply in dairy cow diets based on hay or corn silage: effect on enteric methane emissions, digestion and rumen microbial fermentation. *Journal of Dairy Science*, 99, 3445-3456.

McGinn S.M., Beauchemin K.A., Coates T., Colombatto D. (2004). Methane emissions from beef cattle : effects of monensin, sunflower oil, enzymes, yeast, and fumaric acid. *Journal of Animal Science*, 82, 3346-3356.

McGinn S.M., Chung Y.H., Beauchemin K.A., Iwaasa A.D., Grainger C. (2009). Use of corn distillers' dried grains to reduce enteric methane loss from beef cattle. *Canadian Journal of Animal Science*, 89, 409-413.

Morgavi D.P., Forano E., Martin C., Newbold C.J. (2010). Microbial ecosystem and methanogenesis in ruminants. *Animal*, 4, 1024-1036.

Nkrumah J.D., Okine E.K., Mathison J.W., Schmid K., Li C., Basarab J.A., Price M.A., Wang Z., Moore S.S. (2006). Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. *Journal of Animal Science*, 84, 145-153.

Philippeau C., Lettat A., Martin C., Silberberg M., Morgavi D.P., Ferlay A., Berger C., Nozière P. (2017). Effect of bacterial direct-fed microbials on ruminal parameters, methane emission and milk fatty acid composition in cows fed high- or low-starch diets. *Journal of Dairy Science*, accepté pour publication.

Popova M., Morgavi D.P., Doreau M., Martin C. (2011). Production de méthane et interactions microbiennes dans le rumen. In : *Gaz à effet de serre en élevage bovin : le méthane*. Doreau M., Baumont R., Perez J.M. (Eds). Dossier, INRA Productions Animales, 24, 447-460.

Ramírez-Restrepo C.A., Tan C., O'Neill C.J., López-Villalobos N., Padmanabha J., Wang J.K., McSweeney C.S. (2016). Methane production, fermentation characteristics, and microbial profiles in the rumen of tropical cattle fed tea seed saponin supplementation. *Anim. Feed Sci. Technol.* 216:58-67

Rira M., Morgavi D.P., Archimède H., Marie-Magdeleine C., Popova M., Bousseboua H., Doreau M. (2015). Potential of tannin-rich plants for modulating rumen microbes and ruminal fermentation in sheep. *Journal of Animal Science*, 93, 334-347.

Romero-Perez A., Okine E.K., McGinn S.M., Guan L.L., Oba M., Suval S.M., Kindermann M., Beauchemin K.A. (2014). The potential of 3-nitrooxypropanol to lower enteric methane emissions from beef cattle. *Journal of Animal Science*, 92, 4682-4693.

Sauvant D., Giger-Reverdin S., Serment A., Broudiscou L. (2011). Influences des régimes et de leur fermentation dans le rumen sur la production de méthane par les ruminants. In : *Gaz à effet de serre en élevage bovin : le méthane*. Doreau M., Baumont R., Perez J.M. (Eds). Dossier, INRA Productions Animales, 24, 433-446.

Schulte R.P.O., Lanigan G., Gibson M. (2011). Irish agriculture, greenhouse gas emissions and climate change: opportunities, obstacles and proposed solutions. Ed. Teagasc, Oak Park, Irlande.

Shinkai T., Enishi O., Mitsumori M., Higuchi K., Kobayashi Y., Takenaka A., Nagashima K., Mochizuki M., Kobayashi Y. (2012). Mitigation of methane production from cattle by feeding cashew nut shell liquid. *Journal of Dairy Science*, 95, 5308-5316.

Staerfl S.M., Zeitz J.O., Kreuzer M., Soliva C.R. (2012). Methane conversion rate in bulls fattened on grass or maize silage as compared with the IPCC default values, and the long-term methane mitigation efficiency of adding acacia tannin, garlic, maca and lupine. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 148, 111-120.

Van Zijderveld S.M., Dijkstra J., Perdok H.B., Newbold J.R., Gerrits W.W.J. (2011). Dietary inclusion of diallyl disulfide, yucca powder, calcium fumarate, an extruded linseed product, or medium-chain fatty acids does not affect methane production in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 94, 3094-3104.

Veneman J.B., Muetzel S., Hart K.J., Faulkner C.L., Moorby J.M., Perdok H.B., Newbold C.J. (2015). Does dietary mitigation of enteric methane production affect rumen function and animal productivity in dairy cows? *PloS ONE*, 10(10), e0140282. doi:10.1371/journal.pone.0140282.

Wright A.D.G., Kennedy P., O'Neill C.J., Toovey A.F., Popovski S., Rea S.M., Pimm C.L., Klein L. (2004). Reducing methane emissions in sheep by immunization against rumen methanogens. *Vaccine*, 22, 3976-3985.

