



Contribution du secteur de l'alimentation animale

à la réduction des
émissions de méthane
entérique



**AFCA
CIAL**



snia
Bien nourrir les animaux
C'est mieux nourrir les Hommes

Introduction

L'augmentation de la concentration de Gaz à Effet de Serre (GES) dans l'atmosphère renforce l'effet de serre responsable du dérèglement climatique. Les principaux GES sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote et l'ozone. Ils peuvent être naturellement présents dans l'atmosphère mais ils sont également issus des activités humaines, dont l'agriculture. En 2017, ce secteur représentait 23 % du total des émissions de GES à l'échelle mondiale, dont l'élevage a contribué à hauteur de 60 %.

Le méthane serait responsable d'environ un tiers du réchauffement climatique actuel. Si sa durée de séjour dans l'atmosphère est estimée à une dizaine d'années (contre plusieurs centaines pour le dioxyde de carbone), le méthane a toutefois un pouvoir de réchauffement global plus important que le dioxyde de carbone. Il est donc essentiel d'en limiter les émissions.

Au sein de l'union européenne, le méthane est émis par de nombreux secteurs, notamment l'agriculture, les déchets et l'énergie, qui sont responsables respectivement de 53 %, 26 % et 19 % des émissions selon l'Agence européenne pour l'environnement. En France, en raison des activités présentes sur notre territoire, les émissions de méthane proviennent à 68 % des activités de l'élevage. Elles s'expliquent par les mécanismes de fermentation entérique qui surviennent dans le rumen et par la dégradation anaérobie des déjections animales.

La réduction des émissions de méthane en France entre 1990 et 2019 est significative (de l'ordre de 10 %), mais s'explique essentiellement par une diminution du cheptel associé à un meilleur rendement laitier.

Pour encourager le développement de pratiques plus durables, aider à la décarbonation et réduire significativement les émissions de méthane, les politiques publiques sont venues fixer des objectifs :

- Au niveau mondial, le « Global Methane Pledge » est un dispositif volontaire visant à aider les différentes nations à réduire collectivement les émissions de méthane de 30 % d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 2020.
- Au niveau communautaire, le pacte vert pour l'Europe, lancé en 2019, ambitionne de réduire les émissions nettes de gaz à effet de serre d'au moins 55 % d'ici à 2030 par rapport à 1990, et la fin des émissions nettes de gaz à effet de serre d'ici à 2050. Ce pacte comporte une stratégie spécifique pour réduire les émissions de méthane grâce au soutien de la politique agricole commune.
- Au niveau national, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte de 2015 a introduit la feuille de route de la France pour lutter contre le changement climatique, « la Stratégie nationale bas-carbone », qui vise notamment une baisse des émissions de gaz à effet de serre de 55 % d'ici à 2030 et qui a pour objectif d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050.

Dans ce contexte, le secteur de la nutrition animale s'est emparé du sujet pour contribuer à la réduction des émissions de méthane de l'élevage, en développant des solutions alimentaires.

Ce document, établi par les professionnels de la nutrition animale, expose les principales solutions alimentaires qui existent à date et qui ont démontré leur efficacité dans la réduction des émissions de méthane des élevages de ruminants. Il se concentre sur les solutions permettant d'obtenir un impact direct via l'alimentation.

Les solutions non alimentaires (génétique, technique d'élevage etc.), ainsi que les solutions alimentaires permettant, par exemple, d'améliorer la production laitière ou de préserver la santé animale, et par conséquent de réduire les émissions de méthane de manière indirecte, ne sont pas développées dans ce document. Ce document rappelle également la complexité scientifique que représente la mesure des émissions de méthane.

Il détaille enfin les freins et les limites que rencontre le secteur à ce jour.



Mesure des émissions de méthane : un outil indispensable pour estimer l'efficacité des solutions disponibles

La quantification des émissions de méthane par les ruminants peut être faite selon deux grands principes : la mesure ou la prédiction.

1.1 La mesure des émissions : les méthodes disponibles

La mesure du méthane peut être réalisée de différentes façons. **La première grâce à la collecte totale des émissions en chambre métabolique** : c'est l'une des méthodes de référence mais elle ne peut être mise en œuvre que dans des stations expérimentales et sur un petit nombre d'animaux du fait de la technicité et du coût relatif à l'utilisation de ces chambres. De plus, cette méthode est par nature incompatible avec du pâturage.

Une deuxième façon de mesurer le méthane est par collecte partielle des émissions et l'utilisation d'un gaz traceur : l'hexafluorure de soufre (SF₆). Cette méthode est considérée comme étant la seconde méthode de référence, et est compatible avec le pâturage (Hammond et al., 2016).

Le concept consiste à libérer dans le rumen au moyen d'un bolus, un gaz traceur qui se comporte comme le méthane, dont le débit d'émission est connu. L'analyse du méthane et du SF₆ dans l'échantillon d'air expiré permet de calculer les émissions de méthane. Cependant, tout comme l'utilisation des chambres métaboliques, cette technique nécessite des moyens uniquement disponibles en station expérimentale.

Enfin, la dernière méthode de mesure consiste à mesurer la concentration en méthane dans le flux d'air expiré, grâce à des appareils comme les GreenFeed, les sniffers en robot de traite, ou encore les laser methane detectors. Ces méthodes sont moins complexes à déployer en élevages, souvent moins coûteuses à utiliser que les méthodes de référence (ce qui permet la mesure sur un plus grand nombre d'animaux, Hammond et al., 2016), mais nécessitent quand même des moyens importants, un savoir-faire et un mode d'emploi précis pour assurer une utilisation qui permet l'obtention de résultats fiables, ainsi que l'utilisation d'abaques pour passer d'une mesure de concentration dans l'air à une quantité d'émission journalière dans le cas du GreenFeed. Le résultat obtenu dépend beaucoup de ces abaques qui ne sont pas toujours en accès public.



1.2 La prédiction des émissions

La prédiction permet de calculer les émissions de méthane à partir d'informations en lien avec le processus de méthanogenèse.

De nombreuses équations existent aujourd'hui, basées sur diverses variables d'entrée (Negussie et al., 2017). Certaines sont basées sur la composition de la ration et directement ou indirectement sur les caractéristiques de l'animal permettant d'approcher son ingestion.

Par exemple, l'équation présentée par Sauvant et Nozière (2013), par ailleurs retenue par l'INRAE dans le nouveau système alimentaire INRA 2018, repose sur la quantité de matière organique digestible, le niveau d'ingestion et le pourcentage de concentrés dans la ration. Cette équation peut être adaptée si la ration est composée uniquement de fourrages ou contient des tannins. Par ailleurs, un correctif est appliqué si la ration est supplémentée en lipides (Sauvant et al., 2018). Cette méthode générique est performante, mais les données ne sont pas toujours faciles à collecter de façon précise et fréquente en élevage et doivent donc être estimées.

D'autres équations se basent sur les paramètres de production et de composition du lait, ou encore sur le spectre Moyen Infra Rouge (MIR) du lait, ce qui permet une collecte des informations plus facile en élevages, mais ne sont applicables que pour les animaux laitiers en production (Besnier et al., 2020).

Certaines de ces équations sont déjà intégrées dans des outils de diagnostic ou de pilotage en élevages, et notamment exploitées en filières laitières. D'autres équations sont en développement (par exemple en se basant sur les spectres proches infra-rouge (NIR) des fèces). Quelle que soit l'équation considérée, comme toutes méthodes prédictives, la fiabilité et la précision peuvent varier, notamment si les conditions d'utilisation de l'équation sont éloignées des conditions qui ont servi à la développer. En outre, la diminution de méthane émise en cas d'utilisation d'additifs réducteurs de méthanogenèse qui viennent « perturber » les voies métaboliques naturelles de méthanogenèse, peuvent ne pas être prises en compte par certaines équations de prédiction.

La recherche de prédicteurs, à la fois fiables et faciles à mesurer, reste très active.

Ces différentes méthodes, de mesure ou de prédiction, ont permis de démontrer l'efficacité des leviers de réduction des émissions de méthane, en particulier certaines solutions alimentaires.

Préalable : la formation du méthane dans le rumen

Les ruminants produisent du méthane (CH_4) lors des fermentations des aliments dans le rumen. Le méthane est une voie d'élimination de l'hydrogène produit lors de ces fermentations.

Plus précisément, dès sa formation, l'hydrogène est utilisé par les bactéries *archaea*-méthanogènes pour réduire une partie du CO_2 en méthane. Des voies métaboliques concurrentes pour l'utilisation de l'hydrogène existent, mais leur efficacité est moindre.

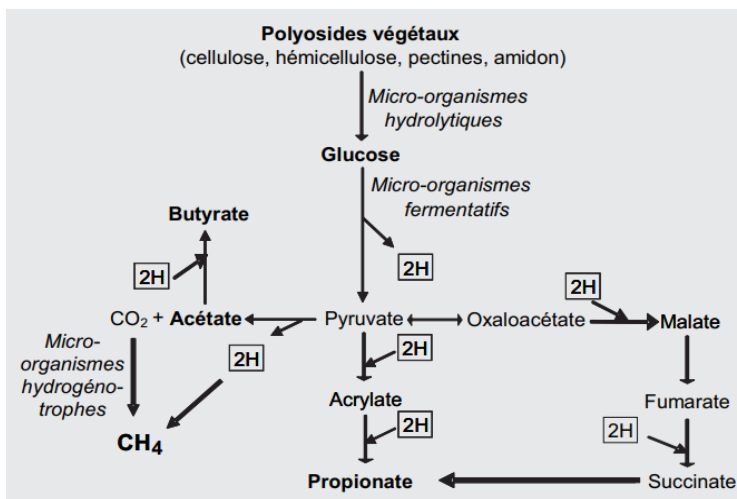


Figure 1- Donnée INRA

Ainsi, et comme nous le verrons ci-dessous, toute solution permettant de réduire la production d'hydrogène ou d'orienter les fermentations ruminales vers une autre voie que celle conduisant au CH_4 , permettrait de réduire les émissions de méthane.

2.1 Apport de concentrés et composition biochimique des rations

La composition de la ration distribuée aux animaux influe sur le niveau des émissions de méthane. La nature des fourrages et des concentrés, ainsi que le ratio fourrages/concentrés, permettent de moduler les émissions de méthane. Les fourrages les plus digestibles (souvent récoltés à des stades moins avancés) réduisent les émissions de méthane. Ainsi, une herbe pâturée ou récoltée jeune, riche en protéines et en matières grasses, permet de réduire les émissions de méthane (Arndt et al., 2022). L'ensilage de maïs permet lui aussi d'obtenir des émissions moindres (Hristov et al., 2022). De plus, les fourrages plus digestibles permettent d'augmenter la productivité des animaux, ce qui réduit d'autant plus les émissions de méthane ramenées au litre de lait. Quant aux concentrés, les plus riches en amidon sont ceux qui permettent la réduction des émissions de méthane la plus importante. Par ailleurs, parmi les céréales, celles dont la vitesse de digestion dans le rumen est la plus élevée (blé, orge) permettent une réduction plus importante rapportée au kilo de matière sèche ingérée (Doreau et al., 2011).

Là encore, ceci est dû à l'orientation des fermentations ruminales vers la voie propionique grâce à l'amidon. Mais plus que la nature du fourrage ou du concentré, c'est la proportion relative de ces deux composants majeurs qui a le plus gros impact sur les émissions de méthane : plus la part de concentrés dans la ration est importante, moins il y a d'émissions de méthane. En effet, augmenter la part de concentrés permet, en plus d'orienter les fermentations ruminales vers plus de propionate, de diminuer le pH ruminal, ce qui inhibe en partie l'activité des *archaea* méthanogènes (Arndt et al., 2022).

La quantification des effets de la nature des fourrages et concentrés, ou encore du ratio fourrages/concentrés n'est pas évidente, car très dépendante de la ration distribuée. Cependant, certains chercheurs estiment qu'en optimisant tous les critères de la ration, il est possible de réduire les émissions de méthane ramenées au kg de produit animal de 20 % (Martin, 2024). Certains auteurs, par le biais de méta-analyses, annoncent des réductions de l'intensité du méthane émis de 13 % lorsque l'on distribue aux animaux un fourrage récolté à faible maturité, ou encore des réductions de l'intensité du méthane émis de 9 % en augmentant la part de concentrés dans les rations (Arndt et al., 2022).

Augmenter de façon trop importante la part de concentrés, et notamment de céréales, dans la ration induit une baisse importante du pH ruminal, et risque alors d'induire un état de sub-acidose, voire d'acidose (une pathologie du rumen qui a des répercussions sur la santé et les performances des animaux). Cela risque également de diminuer la digestibilité des fibres, source importante d'énergie pour les ruminants, du fait d'une vitesse de transit trop élevée.



2.2 Apport de lipides

Augmenter la part de lipides dans la ration, grâce à l'herbe de bonne qualité (riche en matière grasse et en protéines, moins riche en cellulose ; Cf. paragraphe sur le rôle des fourrages), aux graines oléagineuses (colza, soja, tournesol, lin...) sous différentes formes, aux huiles ou encore aux co-produits comme les drèches de maïs constitue une solution pour réduire le méthane entérique émis par les ruminants. Les lipides contribuent en effet à réduire la quantité d'hydrogène, nécessaire à la formation du méthane dans le rumen, de plusieurs manières :

- Ils constituent d'abord un apport d'énergie non fermentescible, ce qui permet de limiter la production d'hydrogène (Doreau et *al.*, 2011).
- De plus, les lipides orientent les fermentations ruminales vers la voie propionique (plutôt que la voie acétique), voie consommatrice (et non productrice) d'hydrogène (Honan et *al.*, 2021). Ces fermentations ont un effet dit « toxique » sur les protozoaires et réduisent l'activité des archaea méthanogènes, ce qui contribue également à la réduction de la production d'hydrogène dans le rumen (Popova et *al.*, 2011, Honan et *al.*, 2021).
- Enfin, l'hydrogénation ruminale des acides gras poly-insaturés consomme également de l'hydrogène qui n'est alors plus disponible pour la méthanogenèse (Honan et *al.*, 2021).

La réduction de méthane obtenue dépend de la dose, de la nature et de la forme d'apport des lipides ajoutés (Honan et *al.*, 2021). Dans le système alimentaire INRA 2018, la réduction est de 7,5 % de méthane par point de lipides ajoutés dans la ration (Sauvant et *al.*, 2018). Plus récemment, Arndt et *al.* (2022) décrivent une réduction de 12 % de l'intensité des émissions de méthane (c'est-à-dire ramenée à la production laitière) avec l'inclusion de lipides dans la ration.

L'effet de la nature des lipides est reconnu par certains auteurs (Doreau et *al.*, 2011 ; Honan et *al.*, 2021), mais la variabilité des résultats conduit à des résultats contradictoires *in vivo* sur la comparaison directe entre sources de lipides. Le consensus scientifique ne semble donc pas clairement établi. Concernant la forme des lipides, il apparaît que les formes d'huiles rendues disponibles par les procédés comme l'extrusion favorisent les effets sur le rumen, et donc la baisse des émissions de méthane (Martin et *al.*, 2008). Ainsi, bon nombre de publications citent le lin extrudé comme une source efficace et reconnue pour réduire les émissions de méthane, en en faisant une des natures et formes d'apport de lipides la plus étudiée.

L'apport d'énergie sous forme de lipides dans la ration permet de limiter le risque d'acidose car ils n'induisent pas de baisse du pH ruminal (Popova et *al.*, 2011), et leur effet persiste dans le temps (pas d'« habitude » du rumen, Doreau et *al.*, 2011). En revanche, il convient généralement de ne pas excéder 6-7 % de lipides dans la ration totale (Honan et *al.*, 2021), et de bien équilibrer la ration, afin d'éviter une diminution de la digestibilité des fibres (Arndt et *al.*, 2022) ou une baisse du taux butyreux du lait.

2.3 Apport d'actifs spécifiques : rôles, exemples, limites et risques

2.3.1. Tanins et saponines

Les tanins et les saponines sont des produits d'origine végétale qui exercent leurs effets anti-méthanogènes en modifiant la communauté microbienne du rumen et sa fonction. Il existe différents types de sources végétales et donc des caractéristiques propres à chaque type de produit. Les saponines et les tanins inhibent la population de protozoaires et indirectement les *archaea* méthanogènes associés, favorisent la production de propionate et réduisent ainsi la disponibilité d'hydrogène pour la méthanogenèse (Aboagye et Beauchemin, 2019 ; Jayanegara, Wina et Takahashi, 2014).

Les tanins et saponines pourraient être prometteurs pour l'atténuation du CH₄ avec une diminution variant de 6 à 45 %.

L'effet anti-méthanogène des tanins et saponines est variable en fonction de facteurs tels que la source végétale, la complexité structurale, la dose, les types de régimes de base et les espèces de ruminants (Aboagye et Beauchemin, 2019 ; Goel et Makkar, 2012 ; Jayanegara, et *al.*, 2012). Diverses études *in vitro* et *in vivo*, une méta-analyse sur diverses espèces de ruminants ont montré que la production de CH₄ diminuait lors de l'ajout de certains tanins et saponines (Aboagye et *al.*, 2018 ; Alves, Dall-Orsoletta et Ribeiro-Filho, 2017 ; Denninger et *al.*, 2020 ; Duval et *al.*, 2016 ; Liu et *al.*, 2019).

Certaines études montrent également une action des tanins ingérés sur la production de méthane des fumiers (Pham et *al.*, 2017).

Il est important de maîtriser les doses d'utilisation car des excès de tanins peuvent activer des propriétés anti-nutritionnelles, un goût amer, altérer la digestibilité des fibres et des protéines et les performances des animaux (Aboagye et Beauchemin, 2019).

Par ailleurs, alors que les tanins semblent atténuer le CH₄ à long terme (Aboagye et *al.*, 2018 ; Duval et *al.*, 2016), l'action de certaines saponines seules semble transitoire.

Il est également difficile de juger l'intégralité des tanins et saponines en sachant que les associations ont des effets difficiles à prédire sans tester le mélange final (Adejoro et *al.*, 2020 ; Jayanegara et *al.*, 2020 ; Lima et *al.*, 2019 ; Liu et *al.*, 2019 ; Williams et coll., 2020).

Des recherches et essais propres à chaque solution sur le long terme sont donc à réaliser dans des conditions alimentaires spécifiques en mesurant l'impact sur la production de CH₄ ainsi que les réponses sur la productivité animale et sur la qualité des produits d'origine animale.



2.3.2. Algues

Les algues marines et notamment les algues rouges contiennent de nombreux métabolites secondaires ayant une activité inhibitrice sur la méthanogenèse. Parmi ces métabolites, des composés halogénés dont les bromoformes qui sont les plus représentés avec des concentrations allant de dizaine de ppb au ppm sur poids frais (Abbott et al. 2020). Ces composés bromoformes sont en quelque sorte des analogues bromés du méthane et leur action est de réagir avec la vitamine B12 (Cyanocobalamine) pour bloquer la dernière étape de formation du méthane (Wood et al. 1968). Par ailleurs, les algues contiennent également d'autres composés ayant un effet sur la production de méthane comme les saponines à effet anti-protozoaires, des tannins et des peptides antimicrobiens avec un effet notoire sur la réduction des bactéries archaea-méthanogènes (Abbott et al. 2020). Les effets de mitigation du méthane des algues in vitro sont particulièrement importants avec des effets allant jusqu'à une mitigation complète avec des taux d'incorporation de 2 à 16 %. Une méta-analyse portant sur 14 expérimentations totalisant 23 comparaisons portant sur l'utilisation d'algues rouge (*A. taxiformis*) et brune (*A. nodosum*) montre un effet de réduction significatif de la production de méthane de 5,28 +/- 3,5 g/kg de MS soit d'environ 30 % (Lean et al. 2021). Cette étude montre également une amélioration significative de l'efficacité alimentaire de 0,38 kg / kg sans altération de l'ingéré de matière sèche. Les doses d'apports dans les études étaient de 0,5 à 2 % de la matière sèche dans la ration. Toutefois, et malgré les effets observés sur la réduction de la méthanogenèse, les composés bromoformes sont classés comme carcinogènes probables chez l'homme (Groupe B2). Le passage de composés bromoformes dans le lait et/ou la viande est suspecté par plusieurs auteurs. De plus,



les algues d'origine marine sont également riches en iode dont l'accumulation dans le lait et la viande entraîne des teneurs supérieures au seuil de tolérance humaine notamment chez l'enfant (Beauchemin et al. 2022). Par ailleurs, en présence de brome dans le rumen, il y a formation de bromure de méthyle (aussi appelé bromométhane) au lieu du méthane. Le bromométhane a un effet destructeur sur la couche d'ozone avec une réactivité 45 fois plus élevée que le chlore pour détruire les molécules d'ozone. Il est également classé comme un gaz à effet de serre mais son Pouvoir de Réchauffement Global à 100 ans n'a pas été clairement calculé.

La production, le séchage et le transport des algues à grande échelle nécessiteraient également une étude du cycle de vie plus approfondie pour garantir le bénéfice environnemental global de cette solution (Beauchemin et al. 2022). L'utilisation des algues à ce stade est uniquement expérimentale, en raison notamment des freins soulevés.

2.3.3. Huiles essentielles et produits concentrés de plantes

Les huiles essentielles et les extraits de plantes sont des produits d'origine végétale composés de mélanges complexes de métabolites secondaires divers et variés (Benchaar et Greathead, 2011). Dans cette catégorie, il existe beaucoup de composés différents qui vont des polyphénols, des polysaccharides, des flavonoïdes... Certains ont été traités ci-dessus (tanins, saponines...) et seuls quelques modes d'action et études sur une partie de cette large catégorie de produits sont présentés ici. Les huiles essentielles ou extraits végétaux peuvent exercer des activités antimicrobiennes sur une grande variété de micro-organismes, notamment les bactéries, les protozoaires et les champignons (Deans et Ritchie, 1987 ; Sivropoulou et al., 1996 ; Chao, Young et Oberg, 2000) en interagissant avec des processus liés à la membrane cellulaire bactérienne, notamment le transport d'électrons, les gradients ioniques, la translocation des protéines, la phosphorylation et d'autres réactions dépendantes des enzymes (Dorman et Deans, 2000). Soit cette sélection bactérienne permet de limiter directement les bactéries productrices de méthane, soit elle favorise les bactéries productrices de propionate, limitant l'hydrogène disponible pour la formation du méthane (Bergen et Bates, 1984 ; Owens et Goetsch, 1988).



Les huiles essentielles et extraits végétaux pourraient être prometteurs pour l'atténuation du méthane avec une diminution moyenne de 10 %, pouvant aller jusqu'à 30 % (Roques et al., 2024). Il a été démontré qu'un certain nombre d'huiles essentielles ou de mélange d'huiles essentielles (par exemple l'origan, le thym, l'ail et ses dérivés) diminuent la production de méthane in vitro et peuvent même augmenter la production totale d'Acides Gras Volatils (AGV) créant un apport d'énergie bénéfique pour les ruminants. Les huiles essentielles et extraits végétaux peuvent également limiter la production d'ammoniac, et donc le rejet dans l'environnement, en modifiant la flore bactérienne du rumen (Klevenhusen et al, 2011 ; Cobellis et al, 2016 ; Eger et al., 2018 ; Benchaar, 2020, 2021 ; Brede et al., 2021 ; Lambo et al., 2024).

In vivo, divers essais montrent l'efficacité de plusieurs mélanges d'huiles essentielles sur la production de méthane, que ce soit en vache laitière ou en bovin en engraissement (Kolling et al., 2028 ; Roque et al., 2019 ; Belanche et al., 2020 ; Bitsie et al., 2022 ; Lambo et al., 2024).

Aux doses généralement recommandées, l'alimentation des ruminants avec des huiles essentielles et extraits végétaux n'affecte ni la santé des animaux, ni la qualité des denrées alimentaires (lait, viande) (Benchaar et al., 2009).

Il est toutefois important de maîtriser les doses d'utilisation car des effets néfastes sur la digestion des ruminants peuvent se produire ce qui aurait un impact négatif sur la productivité (Benchaar et al., 2009 ; Cobellis et al., 2016). De même, à très forte dose, un potentiel de transfert de composés présents dans les huiles essentielles (par exemple les terpènes) vers le lait (Lejonklev et al., 2013) et la viande (De Oliveira Monteschio et al., 2017), peut affecter positivement ou négativement la qualité et propriétés organoleptiques de la viande et du lait.

Par ailleurs, pour certains types d'huiles essentielles et extraits végétaux, il a été rapporté que les populations microbiennes sont capables de les dégrader ou de s'y adapter au fil du temps ; ce qui rendrait leur efficacité temporaire. Il est également difficile de juger l'intégralité des huiles essentielles et extraits végétaux : la gamme disponible est vaste (> 3 000), les mélanges engendrent des synergies ou antagonismes difficiles à anticiper. Des recherches et essais propres à chaque solution sur le long terme sont donc à réaliser dans des conditions alimentaires spécifiques en mesurant l'impact sur la production de CH₄ ainsi que les réponses sur la productivité animale et la qualité des produits d'origine animale.

2.3.4. Nitrates

Les nitrates sont naturellement présents dans l'herbe pâturée ou l'ensilage d'herbe, et de ce fait dans la ration des ruminants en faible concentration. L'ajout supplémentaire de nitrates dans les rations des ruminants est étudié depuis plus de 10 ans dans le but de réduire les émissions de méthane. La source de nitrates utilisée pour augmenter la teneur des rations est le sel de nitrate de calcium (5Ca(NO₃)₂.NH₄NO₃.10H₂O) qui contient 76 % de nitrates.

Les nitrates sont un puits à hydrogène dans le rumen, c'est-à-dire qu'ils vont capter l'hydrogène présent par réaction chimique de réduction. Cette réaction a une cinétique plus importante que la méthanogenèse qui capte l'hydrogène pour former du CH₄ : elle se produit donc en priorité dans le rumen lorsque des nitrates sont présents, réduisant par conséquent la formation de méthane total. Le produit de la réduction des nitrates est l'ammoniaque qui est ensuite métabolisé par les micro-organismes du rumen.



>



Il existe 32 publications scientifiques dans des revues à comité de lecture sur l'effet des nitrates sur la baisse des émissions de méthane dont 3 méta-analyses. D'après la méta-analyse la plus récente et reprenant uniquement des données d'essais *in vivo* chez la vache laitière et les bovins viande (Feng et al., 2020), le sel de nitrate de calcium réduit les émissions de méthane proportionnellement à son taux d'inclusion dans la ration.

A la dose technique recommandée de 1,6 % de la matière sèche ingérée totale, le sel de nitrate de calcium réduit de 10 % les émissions de méthane, exprimées en g/kg de Matière Sèche Ingérée, sans effet sur les performances et la santé des animaux. Cette baisse d'émission a été mesurée et validée *in vivo* avec les différentes méthodes de mesure disponibles : chambres respiratoires, méthode SF₆ et GreenFeed.

A des doses supérieures aux doses recommandées, son usage doit cependant être maîtrisé par une phase d'adaptation des animaux, pour éviter la production de nitrites toxiques qui se traduit par une augmentation de la méthémoglobine sanguine (oxydation du fer de l'hémoglobine, empêchant le transport de l'oxygène) (Lee et Beauchemin, 2014).

Le sel de nitrate de calcium est une matière première déjà commercialisée et disponible sur le marché. Il est adapté à tous les ruminants ayant un rumen fonctionnel dans le but de réduire les émissions de méthane.



2.3.5. Charbon

Le charbon végétal ou charbon actif initialement utilisé comme amendement carboné des sols en région tropicale a montré également un effet sur la réduction des émissions d'odeurs et de gaz (ammoniac, NO₂, CH₄) lorsqu'il est apporté avec les intrants organiques (Jeffery et al. 2016). Ainsi, depuis une dizaine d'années, l'application des charbons végétaux pour la diminution du méthane entérique a été expérimentée (Schmidt et al. 2019). Le mode d'action des charbons reste encore hypothétique et pourrait être lié à un rôle de « séquestration » des gaz et/ou à la modification du profil microbiotique ruminal avec accroissement des microorganismes méthanotrophiques, c'est-à-dire qui utilisent le méthane comme source d'énergie. L'action des charbons pourrait également être liée à leur propriété red/ox comme modulateur de transfert d'électrons dans le milieu (Saquing et al. 2016). Les effets de réduction de la production de méthane observés sont assez variables en fonction de l'origine végétale et du procédé et température de pyrolyse appliqués à la transformation en charbon. Une méta-analyse portant sur 6 études rapporte une diminution moyenne de 10 % du méthane entérique avec des valeurs extrêmes allant de 1 % à 20 % de diminution.

L'effet observé semble être possiblement potentialisé avec l'utilisation conjointe de nitrates (Jeffery et *al.* 2016). Les taux d'incorporation pour l'obtention de l'effet anti-méthane sont de l'ordre de 0,5 à 1 % de la ration totale chez les vaches. Toutefois, la forte variabilité qualitative des charbons entraîne également une forte variabilité des résultats menant assez fréquemment à l'absence d'effet significatif sur la diminution du méthane entérique. Une étude systématique (Leng et *al.* 2012) testant différentes origines végétales, températures de pyrolyse et taux d'inclusion menant à 20 traitements montre un effet de diminution moyenne de 5 % de la production de méthane sans toutefois atteindre la signification statistique. Hormis la variabilité qualitative des résultats, l'utilisation de charbons actifs chez l'animal ne montre pas d'effet toxique ni délétère sur les performances ou la prise alimentaire. L'utilisation du charbon comme actif dans l'alimentation des bovins remonte au début du siècle dernier et a montré plutôt des avantages sur la santé des animaux au travers de différentes propriétés comme l'adsorption de toxiques (Schmidt et *al.*, 2019).



2.3.6. Additif zootechnique (réduction de la production entérique de méthane)

La catégorie des additifs zootechniques compte 4 groupes fonctionnels, dont celui des « substances qui ont un effet positif sur l'environnement », qui comporte lui-même le sous-groupe « Réduction de la production entérique de méthane ». A la date de publication de ce document, un additif a été évalué positivement et est autorisé au sein de ce sous-groupe : le 3 NOP.

Fonctionnement du 3 NOP :

Dans le rumen des ruminants, les microorganismes aident à décomposer la ration et libèrent ainsi de l'hydrogène et du dioxyde de carbone comme sous-produits de fermentation, comme décrit ci-dessus. Une classe spécifique de micro-organismes appelés archées combine ces gaz pour former du méthane. Lors de cette synthèse, une enzyme, la Methyl Coenzyme M Reductase (MCR), déclenche la dernière étape de la production du méthane dans l'archée. La substance active de cet additif (3-nitrooxypropanol) agit en s'amarrant sur le site actif de l'enzyme MCR qui est alors rendue inactive. L'additif prend effet immédiatement, puis est décomposé dans le système digestif de la vache en composés déjà naturellement présents dans son estomac. Quelques heures après l'arrêt d'ingestion de l'additif, la production de méthane reprend et il n'y a aucun effet rémanent chez la vache. Pour un maximum d'efficacité, son ingestion doit donc se faire idéalement de manière régulière, durant la journée, par la ration mélangée.

Les résultats des études scientifiques (65 publications) ont montré une réduction moyenne de 30 % des émissions de méthane des vaches laitières et de 45 % pour les bovins de boucherie en finition. A ce jour, cet additif est autorisé au sein de l'UE uniquement pour les vaches laitières et vaches en reproduction.

Cet additif peut s'incorporer dans tous les aliments complémentaires afin d'assurer une concentration en 3NOP d'au moins 60 mg par kilo de matière sèche ingérée, sans effet négatif sur les performances ou la santé des animaux. Les méta-analyses ne montrent aucun effet significatif sur la production laitière ou le taux butyreux et un léger effet positif sur le taux protéique du lait.

Toutefois, s'il n'y a pas d'ingestion du 3 NOP pendant plus de 4 heures alors l'effet n'est pas garanti.



Limites et perspectives

Les solutions alimentaires sont donc diverses et la recherche se poursuit sur le sujet, laissant entrevoir l'émergence d'autres solutions dans les années à venir. Au-delà des études sur les solutions en elles-mêmes, l'association de ces dernières peut permettre une réduction plus importante des émissions de méthane et des études doivent venir compléter les connaissances actuelles à ce niveau. La poursuite des travaux de recherche et développement est en ce sens un enjeu fondamental.

Une des limites de certaines solutions réside dans l'absence de persistance dans le temps. Les études montrent que les micro-organismes pourraient s'adapter et conduire à une diminution des émissions de méthane uniquement temporaire.

Cela traduit la nécessité de poursuivre les études sur le temps long, pour développer des stratégies efficaces à l'échelle du cheptel français. Les effets induits sur les performances des animaux, à court et long termes, sont également à bien considérer. En effet, au-delà de la production en valeur absolue du méthane, le niveau de méthane produit au litre de lait est un bon indicateur de la capacité de l'élevage français à répondre aux enjeux d'autonomie alimentaire tout en réduisant son impact environnemental.

Enfin, au-delà des enjeux scientifiques qui restent à lever, des freins économiques restent à surmonter pour certaines solutions. Des modèles économiques doivent être créés pour valoriser sur le plan économique la réduction des émissions de méthane obtenus par les opérateurs et le service environnemental rendu.

Le secteur de la nutrition animale est mobilisé sur cet enjeu et les efforts se poursuivent. La réponse n'est toutefois pas unique et l'atteinte des objectifs fixés par les Pouvoirs Publics viendra de l'association des solutions développées. En collaboration avec les fabricants d'aliments composés, les fabricants d'ingrédients, de matières premières élaborées, d'additifs et de prémélanges trouvent des nouvelles solutions nutritionnelles et les mettent à disposition sur le marché. Ces solutions doivent être accompagnées de dossiers de preuve étayés pour garantir leur innocuité et communiquer précisément aux éleveurs leurs avantages par le biais d'allégations. Les fabricants d'aliments composés accompagnent les éleveurs en définissant la stratégie la plus adaptée à leur élevage, tout en garantissant les objectifs de performance économique, et en facilitant sa mise en œuvre. Les solutions alimentaires décrites ici sont les solutions les plus connues et les plus avancées. Leur mise en œuvre, conformément à la réglementation, reste de la responsabilité des opérateurs. Leur usage dépend également de la reconnaissance de leur efficacité par les différentes filières d'élevage et instituts techniques.

Les solutions alimentaires ne représentent qu'un des leviers disponibles, en complément de leviers relevant de la technique d'élevage, ou encore de la sélection génétique d'animaux qui émettent moins de méthane.



PRINCIPALES RESSOURCES BIBLIOGRAPHIQUES (liste non exhaustive)

Mesures des émissions de méthane

Besnier E., B. Rouillé, S. Mendowski, M.-P. Jacqueroud, G. Chesneau, J.-B. Dollé. 2020. *Quelle(s) méthode(s) de prédiction du méthane entérique pour inciter les éleveurs laitiers à réduire leurs émissions de GES ?* Rencontres autour de la Recherche sur les Ruminants, 25, 130.

Hammond K.J., L.A. Crompton, A. Bannink, J. Dijkstra, D.R. Yáñez-Ruiz, P. O'Kiely, E. Kebreab, M.A. Eugène, Z. Yu, K.J. Shingfield, A. Schwarm, A.N. Hristov, C.K. Reynolds. 2016. *Review of current in vivo measurement techniques for quantifying enteric methane emission from ruminants*. Animal Feed Science and Technology, 219, 13-30.

Negussie E., Y. de Haas, F. Dehareng, R.J. Dewhurst, J. Dijkstra, N. Gengler, D.P. Morgavi, H. Soyeurt, S. van Gastelen, T. Yan, F. Biscarini. 2017. *Invited review: Large-scale indirect measurements for enteric methane emissions in dairy cattle: A review of proxies and their potential for use in management and breeding decisions*. Journal of Dairy Science, 100(4), 2433-2453.

Sauvant D., S. Giger-Reverdin, M. Eugène. 2018. *Émissions de méthane entérique*. Dans « *alimentation des ruminants : apports nutritionnels – besoins et réponses des animaux – rationnement – tables des valeurs des aliments* », édition Quae, p243-247.

Sauvant D., P. Nozière. 2013. *La quantification des principaux phénomènes digestifs chez les ruminants : les relations utilisées pour rénover les systèmes d'unités d'alimentation énergétique et protéique*. INRA Productions Animales, 26(4), 327-346.

Apport de concentrés et composition biochimique des rations

Arndt C., A. Hristov, W. Price, S. McClelland, A. Pelaez, S. Cueva, J. Oh, J. Dijkstra, A. Bannink, A. Bayat, L. Crompton, M. Eugène, D. Enahoro, E. Kebreab, M. Kreuzer, M. McGee, C. Martin, C. Newbold, C. Reynolds, A. Schwarm, K. Shingfield, J. Veneman, D. Yáñez-Ruiz, Z. Yu. 2022. *Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5°C target by 2030 but not 2050*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA., 119(20):e2111294119.

Doreau M., C. Martin, M. Eugène, M. Popova, D. Morgavi. 2011. *Leviers d'action pour réduire la production de méthane entérique par les ruminants*. INRA Prod. Anim., 24(5), 461-474.

Hristov A., A. Melgar, D. Wasson, C. Arndt. 2022. *Symposium review: effective nutritional strategies to mitigate enteric methane in dairy cattle*. J. Dairy Sci., 105:8543-8557.

Martin C. 2024. *Solutions techniques pour limiter les rejets de méthane entérique chez les ruminants*. Journée Matières Premières AFTAA, Nantes.

Lipides

Arndt C., A. Hristov, W. Price, S. McClelland, A. Pelaez, S. Cueva, J. Oh, J. Dijkstra, A. Bannink, A. Bayat, L. Crompton, M. Eugène, D. Enahoro, E. Kebreab, M. Kreuzer, M. McGee, C. Martin, C. Newbold, C. Reynolds, A. Schwarm, K. Shingfield, J. Veneman, D. Yáñez-Ruiz, Z. Yu. 2022. *Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5°C target by 2030 but not 2050*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA., 119(20):e2111294119.

Doreau M., C. Martin, M. Eugène, M. Popova, D. Morgavi. 2011. *Leviers d'action pour réduire la production de méthane entérique par les ruminants*. INRA Prod. Anim., 24(5), 461-474.

Honan M., X. Feng, J. Tricarico, E. Kebreab. 2021. *Feed additives as a strategic approach to reduce enteric methane production in cattle: modes of action, effectiveness and safety*. An. Prod. Sci., 62, 1303-1317.

Martin C., J. Rouel, J.-P. Jouany, M. Doreau, Y. Chilliard. 2008. *Methane output and diet digestibility*

Popova M., D. Morgavi, M. Doreau, C. Martin. 2011. *Production de méthane et interactions microbiennes dans le rumen*. INRA Prod. Anim., 24(5), 447-460.

Sauvant D., S. Giger-Reverdin, M. Eugène. 2018. *Émissions de méthane entérique*. Dans « *alimentation des ruminants : apports nutritionnels – besoins et réponses des animaux – rationnement – tables des valeurs des aliments* », édition Quae, p243-247.

Tanins et saponine

Aboagye, I.A. & Beauchemin, K.A. 2019. *Potential of molecular weight and structure of tannins to reduce methane emissions from ruminants: A review*. Animals, 9(11): 856.

Aboagye, I.A., Oba, M., Castillo, A.R., Koenig, K.M., Iwaisa, A.D. & Beauchemin, K.A. 2018. *Effects of hydrolyzable tannin with or without condensed tannin on methane emissions, nitrogen use, and performance of beef cattle fed a high-forage diet*. Journal of Animal Science, 96(12): 5276–5286.

Adejoro, F.A., Hassen, A., Akanmu, A.M. & Morgavi, D.P. 2020. *Replacing urea with nitrate as a non-protein nitrogen source increases lambs' growth and reduces methane production, whereas acacia tannin has no effect*. Animal Feed Science and Technology, 259: 114360.

Alves, T.P., Dall-Orsoletta, A.C. & Ribeiro-Filho, H.M.N. 2017. *The effects of supplementing Acacia mearnsii tannin extract on dairy cow dry matter intake, milk production, and methane emission in a tropical pasture*. Tropical Animal Health and Production, 49(8): 1663–1668.

Denninger, T.M., Schwarm, A., Birkinshaw, A., Terranova, M., Dohme-Meier, F., Münger, A., Eggerschwiler, L., Bapst, B., Wegmann, S., Clauss, M. & Kreuzer, M. 2020. *Immediate effect of Acacia mearnsii tannins on methane emissions and milk fatty acid profiles of dairy cows*.

Duval, B.D., Aguerre, M., Wattiaux, M., Vadas, P.A. & Powell, J.M. 2016. *Potential for reducing on-farm greenhouse gas and ammonia emissions from dairy cows with prolonged dietary tannin additions*. Water, Air, & Soil Pollution, 227(9): 329.

Jayanegara, A., Yogianto, Y., Wina, E., Sudarman, A., Kondo, M., Obitsu, T. & Kreuzer, M. 2020. *Combination effects of plant extracts rich in tannins and saponins as feed additives for mitigating in vitro ruminal methane and ammonia formation*. Animals, 10(9): 1531.

Lima, P.R., Apdini, T., Freire, A.S., Santana, A.S., Moura, L.M.L., Nascimento, J.C.S., Rodrigues, R.T.S., Dijkstra, J., Neto, A.G. & Queiroz, M.Á. 2019. *Dietary supplementation with tannin and soybean oil on intake, digestibility, feeding behavior, ruminal protozoa and methane emission in sheep*. Animal Feed Science and Technology, 249: 10–17.

Liu, H., Puchala, R., LeShure, S., Gipson, T.A., Flythe, M.D. & Goetsch, A.L. 2019. *Effects of lespedeza condensed tannins alone or with monensin, soybean oil, and coconut oil on feed intake, growth, digestion, ruminal methane emission, and heat energy by yearling Alpine doelings*. Journal of Animal Science, 97(2): 885–899.

Pham, C.H., Saggar, S., Vu, C.C., Tate, K.R., Tran, T.T.T., Luu, T.T., Ha, H.T., Nguyen, H.L.T. & Sommer, S.G. 2017. *Biogas production from steer manures in Vietnam: Effects of feed supplements and tannin contents*. Waste Management, 69: 492–497.

Williams, S.R.O., Hannah, M.C., Eckard, R.J., Wales, W.J. & Moate, P.J. 2020. *Supplementing the diet of dairy cows with fat or tannin reduces methane yield, and additively when fed in combination*. Animal, 14(3): s464–s472.

Huiles essentielles et extrait de plantes

Belanche, A., Newbold, C.J., Morgavi, D.P., Bach, A., Zweifel, B. & Yáñez-Ruiz, D.R. 2020. *A meta-analysis describing the effects of the essential oils blend Agolin Ruminant on performance, rumen fermentation and methane emissions in dairy cows*. Animals, 10(4): 620.

Benchaar, C. 2020. *Feeding oregano oil and its main component carvacrol does not affect ruminal fermentation, nutrient utilization, methane emissions, milk production, or milk fatty acid composition of dairy cows*. Journal of Dairy Science, 103(2): 1516–1527.

Benchaar, C. 2021. *Diet supplementation with thyme oil and its main component thymol failed to favorably alter rumen fermentation, improve nutrient utilization, or enhance milk production in dairy cows*. Journal of Dairy Science, 104(1): 324–336.

Benchaar, C. & Greathead, H. 2011. *Essential oils and opportunities to mitigate enteric methane emissions from ruminants*. Animal Feed Science and Technology, 166–167: 338–355.

Benchaar, C., Hristov, A.N. & Greathead, H. 2009. *Essential oils as feed additives in animal nutrition*. In: T. Steiner, ed. Phytogenics in animal nutrition, pp. 111–146. Nottingham, UK, Nottingham University Press.

Bergen, W.G. & Bates, D.B. 1984. *Ionophores: Their effect on production efficiency and mode of action*. Journal of Animal Science, 58(6): 1465–1483.

Bitsie, B., Osorio, A.M., Henry, D.D., Silva, B.C., Godoi, L.A., Supapong, C., Brand, T. & Schoonmaker, J.P. 2022. *Enteric methane emissions, growth, and carcass characteristics of feedlot steers fed a garlic- and citrus-based feed additive in diets with three different forage concentrations*. Journal of Animal Science, 100(5): skac139.

Brede, J., Peukert, M., Egert, B., Breves, G. & Brede, M. 2021. *Long-term Mootral application impacts methane production and the microbial community in the rumen simulation technique system*. Frontiers in Microbiology, 12: 691502.

Chao, S.C., Young, D.G. & Oberg, C.J. 2000. *Screening for inhibitory activity of essential oils on selected bacteria, fungi and viruses*. Journal of Essential Oil Research, 12(5): 639–649.

Cobellis, G., Trabalza-Marinucci, M. & Yu, Z. 2016. *Critical evaluation of essential oils as rumen modifiers in ruminant nutrition: A review*. The Science of the Total Environment, 545–546: 556–568.

De Oliveira Monteschio, J., de Souza, K.A., Vital, A.C.P., Guerrero, A., Valero, M.V., Kempinski, E.M.B.C., Barcelos, V.C., Nascimento, K.F. & do Prado, I.N. 2017. *Clove and rosemary essential oils and encapsulated active principles (eugenol, thymol and vanillin blend) on meat quality of feedlot-finished heifers*. Meat Science, 130: 50–57.

Deans, S.G. & Ritchie, G. 1987. *Antibacterial properties of plant essential oils*. International Journal of Food Microbiology, 5(2): 165–180.

Dorman, H.J. & Deans, S.G. 2000. *Antimicrobial agents from plants: Antibacterial activity of plant volatile oils*. Journal of Applied Microbiology, 88(2): 308–316.

Eger, M., Graz, M., Riede, S. & Breves, G. 2018. *Application of MootralTM reduces methane production by altering the Archaea community in the rumen simulation technique*. Frontiers in Microbiology, 9: 2094.

Klevenhusen, F., Zeitz, J.O., Duval, S., Kreuzer, M. & Soliva, C.R. 2011. *Garlic oil and its principal component diallyl disulfide fail to mitigate methane, but improve digestibility in sheep*. Animal Feed Science and Technology, 166–167: 356–363.

Kolling, G.J., Stivanin, S.C.B., Gabbi, A.M., Machado, F.S., Ferreira, A.L., Campos, M.M., Tomich, T.R., Cunha, C.S., Dill, S.W., Pereira, L.G.R. & Fischer, V. 2018. *Performance and methane emissions in dairy cows fed oregano and green tea extracts as feed additives*. Journal of Dairy Science, 101(5): 4221–4234.

Lambo M.T., Ma H., Liu R., Dai B., Zhang Y., Li Y. 2024. *Review: Mechanism, effectiveness, and the prospects of medicinal plants and their bioactive compounds in lowering ruminants' enteric methane emission* Animal 18 101-134.

Lejonklev, J., Lokke, M.M., Larsen, M.K., Mortensen, G., Petersen, M.A. & Weisbjerg, M.R. 2013. *Transfer of terpenes from essential oils into cow milk*. Journal of Dairy Science, 96(7): 4235–4241.

Owens, F.N. & Goetsch, A.L. 1988. *Ruminal fermentation*. In: D.C. Church, ed. *The ruminant animal: Digestive physiology and nutrition*, pp. 145–171. Prospect Heights, USA, Waveland Press Inc.

Roque, B.M., Van Lingen, H.J., Vrancken, H. & Kebreab, E. 2019. *Effect of Mootral – a garlic- and citrus-extract-based feed additive – on enteric methane emissions in feedlot cattle*. *Translational Animal Science*, 3(4): 1383–1388.

Roques S., Martinez-Fernandez G., Ramayo-Caldas Y., Popova M., Denman S., Meale S.J., Morgavi D.P. 2024 *Recent Advances in Enteric Methane Mitigation and the Long Road to Sustainable Ruminant Production* *Annual Review of Animal Biosciences* 2024. 12:6.1–6.23

Sivropoulou, A., Papanikolaou, E., Nikolaou, C., Kokkini, S., Lanaras, T. & Arsenakis, M. 1996. *Antimicrobial and cytotoxic activities of origanum essential oils*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44(5): 1202–1205.

Ultee, A., Kets, E.P.W. & Smid, E.J. 1999. *Mechanisms of action of carvacrol on the food-borne pathogen Bacillus cereus*. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(10): 4606–4610.

Nitrates

Feng, X. Y., Dijkstra, J., Bannink, A., Van Gastelen, S., France, J., & Kebreab, E. (2020). *Antimethanogenic effects of nitrate supplementation in cattle: A meta-analysis*. *Journal of dairy science*, 103(12), 11375–11385.

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(4), 557–570.

Charbon

Jeffery S, Verheijen FGA, Kammann C, Abalos D. 2016. *Biochar effects on methane emissions from soils: a meta-analysis*. *Soil Biology and Biochemistry* 101:251–258.

Leng R, Inthapanya SK, Preston TR. 2012. *Biochar lowers net methane production from rumen fluid in vitro*. *Livestock Research for Rural Development* 24(6): Article #103.

Saquin JM, Yu Y-H, Chiu PC. 2016. *Wood-derived black carbon (biochar) as a microbial electron donor and acceptor*. *Environmental Science & Technology Letters* 3(2)

Schmidt HP, Hagemann N, Draper K, Kammann C, (2019) *The use of biochar in animal feeding*. *PeerJ* 7, e7373.

Macroalgues

Lean IJ, Golder HM, Grant TMD, Moate PJ (2021) *A meta-analysis of effects of dietary seaweed on beef and dairy cattle performance and methane yield*. *PLoS ONE* 16(7): e0249053. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249053>

Karen A. Beauchemin et al. *Invited Review: Current enteric methane mitigation options*. 2022, *J. Dairy Sci.* 105:9297–9326.

D. Wade Abbott et al. *Seaweed and Seaweed Bioactives for Mitigation of Enteric Methane: Challenges and Opportunities*. *Animals* 2020, 10, 2432; doi:10.3390/ani10122432

Wood, J. M., F. S. Kennedy, and R. S. Wolfe. 1968. *The reaction of multihalogenated hydrocarbons with free and bound reduced vitamin B12*. *Biochemistry* 7:1707–1713.

3NOP

Plus de 70 articles scientifiques publiés sont aujourd'hui disponibles, traitant de l'utilisation du 3NOP dans l'alimentation des bovins. Ci-dessous les dernières publications :

Kirwan, S. F.; Tamassia, L. F. M.; Walker, N. D.; Karagianis, A.; Kindermann, M.; Waters, S. M. *Effects of Dietary Supplementation with 3-Nitrooxypropanol on Enteric Methane Production, Rumen Fermentation, and Performance in Young Growing Beef Cattle Offered a 50:50 Forage:Concentrate Diet*. *Journal of Animal Science* 2024, 102, skad399. <https://doi.org/10.1093/jas/skad399>

Lokuge, G. M. S.; Maigaard, M.; Lund, P.; Rovers, T. A. M.; Larsen, L. B.; Poulsen, N. A.; Wiking, L. *Physico-Chemical, Sensory and Oxidative Quality of Butter from Cows Fed 3-Nitrooxypropanol*. *International Dairy Journal* 2024, 152, 105885. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2024.105885>

Maigaard, M.; Weisbjerg, M. R.; Johansen, M.; Walker, N.; Ohlsson, C.; Lund, P. *Effects of Dietary Fat, Nitrate, and 3-NOP and Their Combinations on Methane Emission, Feed Intake and Milk Production in Dairy Cows*. *Journal of Dairy Science* 2023. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23420>.

Lupwayi, N. Z.; Hao, X.; Thomas, B. W.; Stoeckli, J.; Mesina, L.; Polo, R. O. *Alteration of the Soil Microbiome and Enzyme Activities by Forage-Applied Manure from Cattle Fed the Methane Inhibitor 3-Nitrooxypropanol Supplement*. *Appl. Soil Ecol.* 2023, 183, 104765. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104765>.

Lileikis, T.; Nainienė, R.; Bliznikas, S.; Uchokis, V. *Dietary Ruminant Enteric Methane Mitigation Strategies: Current Findings, Potential Risks and Applicability*. *Animals* 2023, 13 (16), 2586. <https://doi.org/10.3390/ani13162586>.

Kjeldsen, M. H.; Weisbjerg, M. R.; Larsen, M.; Højberg, O.; Ohlsson, C.; Walker, N.; Hellwing, A. L. F.; Lund, P. *Gas Exchange, Rumen Hydrogen Sinks, and Nutrient Digestibility and Metabolism in Lactating Dairy Cows Fed 3-NOP and Cracked Rapeseed*. *Journal of Dairy Science* 2023, 0 (0). <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23743>

- Kelly, L.; Kebreab, E. *Recent Advances in Feed Additives with the Potential to Mitigate Enteric Methane Emissions from Ruminant Livestock*. Journal of Soil and Water Conservation 2023, 78 (2), 111–123. <https://doi.org/10.2489/jswc.2023.00070>.
- Araújo, T. L. R.; Rabelo, C. H. S.; Cardoso, A. S.; Carvalho, V. V.; Acedo, T. S.; Tamassia, L. F. M.; Vasconcelos, G. S. F. M.; Duval, S. M.; Kindermann, M.; Gouvea, V. N.; Fernandes, M. H. M. R.; Reis, R. A. *Feeding 3-Nitrooxypropanol Reduces Methane Emissions by Feedlot Cattle on Tropical Conditions*. Journal of Animal Science 2023, skad225. <https://doi.org/10.1093/jas/skad225>.
- Almeida, A. K.; Cowley, F.; McMeniman, J. P.; Karagiannis, A.; Walker, N.; Tamassia, L. F. M.; McGrath, J. J.; Hegarty, R. S. *Effect of 3-Nitrooxypropanol on Enteric Methane Emissions of Feedlot Cattle Fed with a Tempered Barley-Based Diet with Canola Oil*. Journal of Animal Science 2023, 101, skad237. <https://doi.org/10.1093/jas/skad237>.
- Alemu, A. W.; Robert, G.; Zhang, X. M.; Eóin, O.; Kindermann, M.; Beauchemin, K. A. *3-Nitrooxypropanol Supplementation of a Forage Diet Decreased Enteric Methane Emissions from Beef Cattle without Affecting Feed Intake and Apparent Total-Tract Digestibility*. Journal of Animal Science 2023, skad001. <https://doi.org/10.1093/jas/skad001>.
- Uddin, M. E.; Tricarico, J. M.; Kebreab, E. *Impact of Nitrate and 3-Nitrooxypropanol on the Carbon Footprints of Milk from Cattle Produced in Confined-Feeding Systems across Regions in the United States: A Life Cycle Analysis*. J. Dairy Sci. 2022, 105 (6), 5074–5083. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20988>.
- Schilde, M.; von Soosten, D.; Frahm, J.; Kersten, S.; Meyer, U.; Zeyner, A.; Dänicke, S. *Assessment of Metabolic Adaptations in Periparturient Dairy Cows Provided 3-Nitrooxypropanol and Varying Concentrate Proportions by Using the GreenFeed System for Indirect Calorimetry, Biochemical Blood Parameters and Ultrasonography of Adipose Tissues*. Dairy 2022, 3 (1), 100–122. <https://doi.org/10.3390/dairy3010009>.
- Pitta, D. W.; Indugu, N.; Melgar, A.; Hristov, A.; Challa, K.; Vecchiarelli, B.; Hennessy, M.; Narayan, K.; Duval, S.; Kindermann, M.; Walker, N. *The Effect of 3-Nitrooxypropanol, a Potent Methane Inhibitor, on Ruminant Microbial Gene Expression Profiles in Dairy Cows*. Microbiome 2022, 10 (1), 146. <https://doi.org/10.1186/s40168-022-01341-9>.
- Kebreab, E.; Bannink, A.; Pressman, E. M.; Walker, N.; Karagiannis, A.; Gastelen, S. van; Dijkstra, J. *A Meta-Analysis of Effects of 3-Nitrooxypropanol on Methane Production, Yield, and Intensity in Dairy Cattle*. J. Dairy Sci. 2022, 0 (0). <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22211>.
- Hristov, A. N.; Melgar, A.; Wasson, D.; Arndt, C. *Symposium Review: Effective Nutritional Strategies to Mitigate Enteric Methane in Dairy Cattle*. J. Dairy Sci. 2022, 105 (10), 8543–8557. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21398>.
- Gastelen, S. van; Dijkstra, J.; Heck, J. M. L.; Kindermann, M.; Klop, A.; Mol, R. de; Rijnders, D.; Walker, N.; Bannink, A. *Methane Mitigation Potential of 3-Nitrooxypropanol in Lactating Cows Is Influenced by Basal Diet Composition*. J. Dairy Sci. 2022, 105 (5), 4064–4082. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20782>.
- Garcia, F.; Muñoz, C.; Martínez-Ferrer, J.; Urrutia, N. L.; Martínez, E. D.; Saldivia, M.; Immig, I.; Kindermann, M.; Walker, N.; Ungerfeld, E. M. *3-Nitrooxypropanol Substantially Decreased Enteric Methane Emissions of Dairy Cows Fed True Protein- or Urea-Containing Diets*. Heliyon 2022, 8 (6), e09738. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09738>.
- Fouts, J. Q.; Honan, M. C.; Roque, B. M.; Tricarico, J. M.; Kebreab, E. *Enteric Methane Mitigation Interventions*. Trans. Anim. Sci. 2022, 6 (2), txac041. <https://doi.org/10.1093/tas/txac041>.
- Coppa, M.; Vanlierde, A.; Bouchon, M.; Jurquet, J.; Musati, M.; Dehareng, F.; Martin, C. *Methodological Guidelines: Cow Milk Mid-Infrared Spectra to Predict Reference Enteric Methane Data Collected by an Automated Head-Chamber System*. Journal of Dairy Science 2022, 105 (11), 9271–9285. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-21890>.
- Beauchemin, K. A.; Ungerfeld, E. M.; Abdalla, A. L.; Alvarez, C.; Arndt, C.; Becquet, P.; Benchaar, C.; Berndt, A.; Mauricio, R. M.; McAllister, T. A.; Oyhantçabal, W.; Salami, S. A.; Shalloo, L.; Sun, Y.; Tricarico, J.; Uwizye, A.; De Camillis, C.; Bernoux, M.; Robinson, T.; Kebreab, E. *Invited Review: Current Enteric Methane Mitigation Options*. J. Dairy Sci. 2022, 105 (12), 9297–9326. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22091>.



41 bis boulevard de la Tour-Maubourg
75007 Paris

Tél. 01 47 53 64 00

www.afca-cial.org



LA COOPÉRATION AGRICOLE
NUTRITION ANIMALE

43 rue Sedaine

75011 Paris

Tél. 01 44 17 57 12

www.lacooperationagricole.coop



41 bis boulevard de la Tour-Maubourg
75007 Paris

Tél. 01 44 18 63 50

www.nutritionanimale.org