ACADÉMIE d'AGRICULTURE de FRANCE
AGRICULTURE ■ ALIMENTATION ■ ENVIRONNEMENT

Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France

Academic Notes of the French Academy of agriculture

ISSN 2966-702X, Elec ISSN 2967-2139

Authors
Mika Popova, Diego P. Morgavi, Simon Roques

Title of the work
Les algues : un additif « naturel » dans l'alimentation pour réduire les émissions de méthane des ruminants ? Algae: A "natural" additive for reducing methane emissions from ruminants?

References
Year 2025, Volume 20, Number 3, pp. 1-17.

Published online:
29 November 2025,
https://www.academie-agriculture.fr/publications/notes-academiques/les-algues-un-additif-naturel-dans-lalimentation-pour-reduire-les

Licence
Les algues : un additif « naturel » dans l'alimentation pour réduire les émissions de méthane des ruminants ? Algae: A "natural" additive for reducing methane emissions from ruminants? © 2025 by Mika Popova, Diego P. Morgavi, Simon Roques is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Articles de synthèse / Potentiels de la science pour une agriculture et une alimentation durables

Les algues : un additif « naturel » dans l'alimentation pour réduire les émissions de méthane des ruminants ?

Algae: A "natural" additive for reducing methane emissions from ruminants?

Milka Popova [1], Diego P. Morgavi [1], Simon Roques [1]

[1] *Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, UMR Herbivores, F-63122 Saint-Genes-Champanelle, France*

Correspondance :
milka.popova@inrae.fr

Résumé

L'élevage a un rôle essentiel non seulement dans l'alimentation humaine, mais aussi dans la dynamique économique des territoires ruraux, ainsi que dans la préservation de la biodiversité, tant en France que dans le reste du monde. Il contribue aux émissions de méthane entérique, un puissant gaz à effet de serre, produit lors de la dégradation des polymères végétaux dans le rumen. Parmi les stratégies pour réduire ces émissions, l'utilisation des macro-algues rouges comme *Asparagopsis taxiformis* dans l'alimentation a montré des résultats prometteurs. *In vitro*, les composés bioactifs qu'elles contiennent peuvent réduire la production de méthane jusqu'à 99 %, sans affecter la dégradation de la matière organique. Toutefois les études *in vivo* présentent des résultats plus variables et soulèvent des questions relatives, d'une part, à la santé animale et, d'autre part, aux impacts de la production d'algues à grande échelle sur la biodiversité aquatique. Bien que prometteuses, ces algues nécessitent davantage de recherches pour garantir leur impact environnemental positif, leur sécurité d'utilisation et leur faisabilité industrielle.

Abstract

Livestock production contributes to enteric methane emissions, a potent greenhouse gas produced by the breakdown of plant polymers in

the rumen. Among strategies to reduce these emissions, the use of red macroalgae such as *Asparagopsis taxiformis* has shown promising results. The bioactive compounds they contain can reduce methane production by up to 99 % *in vitro* without affecting the breakdown of organic matter. However, *in vivo* studies show more variable results and raise questions about animal health and the impact of large-scale algae production on aquatic biodiversity. Although promising, these algae require further research to ensure their positive environmental impact, safety and industrial feasibility.

Mots clés
ruminants, algues, méthane, microbiote

Keywords
ruminants, algae, methane, microbiota

1. Introduction

L'élevage joue un rôle crucial non seulement pour l'alimentation humaine, mais aussi dans la préservation de l'économie des territoires ruraux, tant en France qu'à l'échelle mondiale. Il contribue à la sécurité alimentaire et nutritionnelle, notamment dans les pays à revenu faible ou intermédiaire. Les produits issus des animaux terrestres représentent 29 % de l'apport quotidien en protéines de la population mondiale (OCDE, 2022). Toutefois ces rôles nutritionnel et économique s'accompagnent d'un impact environnemental notable. L'élevage occupe environ 30 % des terres émergées pour le pâturage et la production de fourrages, consomme une grande partie des ressources en eau douce et génère des émissions importantes de gaz à effet de serre (GES), contribuant ainsi au réchauffement climatique (Steinfeld *et al.*, 2006).

Le secteur de l'élevage représente 12 % des émissions anthropiques mondiales de GES, dont le méthane qui compte pour 45 % de ces émissions (FAO, 2023). Ce constat met en évidence l'importance de prendre en compte l'impact environnemental de l'élevage dans les stratégies de lutte contre le changement climatique et de réduction des GES, conformément aux objectifs de la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. Le méthane, le deuxième GES le plus préjudiciable après le dioxyde de carbone, a vu sa concentration atmosphérique augmenter rapidement au cours des 15 dernières années (Nisbet *et al.*, 2019). Des estimations récentes indiquent que le méthane entérique des ruminants est un contributeur majeur à cette hausse des émissions mondiales depuis le début du XXIe siècle (Chang *et al.*, 2019).

Malgré cette contribution importante aux émissions de GES, il ne faut pas sous-estimer le rôle essentiel des produits dérivés des ruminants dans la sécurité alimentaire et la nutrition humaine (Herrero *et al.*, 2013; FAO, 2020). La viande et le lait de ruminants sont des sources primordiales de protéines de haute qualité, ainsi que de vitamines et minéraux essentiels. En effet, les protéines animales fournissent des acides aminés essentiels et des micronutriments tels que la cobalamine (vitamine B12), la riboflavine (vitamine B2), le rétinol (vitamine A), ainsi que le calcium, le zinc et le fer, souvent déficients chez les populations humaines malnutries (Randolph *et al.*, 2007). Un avantage notable des systèmes d'élevage de ruminants est que jusqu'à 90 % de leur alimentation est constituée de matériaux non comestibles pour l'Homme, tels que les fourrages et les sous-produits de l'industrie agroalimentaire (Mottet *et al.*, 2017).

Les stratégies visant à réduire les émissions de méthane entérique sont étudiées depuis plusieurs décennies, avec un intérêt croissant depuis la publication du rapport intitulé *Livestock's Long Shadow* (L'ombre portée de l'élevage) de l'Organisation des Nations unies

pour l'alimentation et l'agriculture (Steinfeld *et al.*, 2006). Parmi les méthodes les plus prometteuses figurent l'utilisation d'additifs alimentaires et la modification des régimes alimentaires des animaux (Arndt *et al.*, 2022). Récemment l'incorporation d'algues, en particulier de macro-algues marines riches en composés secondaires tels que les composés halogénés et les phlorotannins, a suscité un vif intérêt. Cette synthèse commence par une présentation des processus microbiens responsables des émissions de méthane, avant d'examiner les mécanismes d'action des composés bioactifs des algues, et de conclure par une analyse critique de leur possible utilisation dans l'alimentation des ruminants.

2. Composition et fonctionnement de l'écosystème microbien ruminal

La méthanogenèse entérique, c'est-à-dire la production de méthane dans le tractus gastro-intestinal des ruminants, est un processus naturel qui survient lors de la digestion des aliments. Elle se déroule principalement dans le rumen, en raison de sa position en amont dans le système digestif des ruminants. Ce processus, d'origine microbienne, se déroule en milieu anaérobie, donc en l'absence de dioxygène, lorsque des polymères complexes de sucres végétaux sont fermentés par un ensemble de micro-organismes pour produire des substrats énergétiques utilisés par l'animal (Jouany, 1994). Le rumen est un écosystème microbien complexe et dynamique, composé majoritairement de bactéries anaérobies, de protozoaires, de champignons anaérobies, d'*Archaea* méthanogènes et de virus (phages).

2.1. La fibrolyse

Les bactéries constituent le groupe de micro-organismes le plus abondant et le plus diversifié du microbiote du rumen, avec des centaines de milliards de cellules par mL de contenu ruminal (Jouany, 1994) et jusqu'à 5 000 espèces distinctes détectées (Stewart *et al.*, 2019). Cette diversité taxonomique s'accompagne d'une remarquable diversité fonctionnelle. Des analyses méta-génomiques ont révélé la présence de plus de 500 000 enzymes actives sur les glucides (Li *et al.*, 2020), réparties dans plus d'une centaine de familles catalytiques (Li *et al.*, 2020 ; Torres Manno *et al.*, 2023).

Les protozoaires, bien que moins abondants (jusqu'à un million par mL de contenu ruminal), représentent une part importante de la biomasse microbienne en raison de leur taille supérieure (Jouany, 1994). Les entodiniomorphes (ordre : Entodiniomorphida) et les holotriches (ordre : Vestibuliferida) sont régulièrement identifiés comme les groupes les plus dominants parmi les protozoaires (Henderson *et al.*, 2015). Même si leur nombre et leur diversité sont inférieurs à ceux des bactéries, leur génome est nettement plus grand et contient un nombre bien supérieur de gènes. L'analyse des protéomes (l'ensemble des protéines exprimées dans une cellule) a révélé une pléthore d'enzymes actives sur les glucides ciblant les polysaccharides ligno-cellulosiques, les xylanes, les mannanes et les oligosaccharides dérivés des fibres chez les entodiniomorphes. En revanche, les holotriches montrent principalement des activités glucosidase et cellobiosidase, avec une activité fibrolytique négligeable (Andersen *et al.*, 2023). Les champignons anaérobies jouent un rôle reconnu dans la dégradation des fibres dans le rumen (Hagen *et al.*, 2020). Jusqu'à 88 champignons anaérobies du tube digestif d'herbivores ont été identifiés, et 22 ont été isolés en culture (Meili *et al.*, 2023), mais moins d'une dizaine de génomes de ces champignons sont disponibles (Hagen *et al.*, 2020 ; Hess *et al.*, 2020).

La dégradation de la matière organique repose sur la coopération concertée et synchronisée, au sens d'un enchaînement temporel structuré, des différents groupes de

micro-organismes, où les métabolites produits par certains servent de substrats à d'autres. Les polysaccharides complexes, comme les celluloses, les hémicelluloses, les pectines et les amidons, présents dans l'alimentation des ruminants, sont hydrolysés en oligosaccharides et monosaccharides par des micro-organismes hydrolytiques et des fermenteurs anaérobies primaires (Figure 1). Ce groupe inclut principalement les genres bactériens *Ruminococcus*, *Fibrobacter*, *Butyrivibrio*, *Ruminobacter*, *Lachnospira* et *Segatella*, bien que des micro-organismes fibrolytiques existent également parmi les protozoaires et champignons (Moraïs et Mizrahi, 2019). Les monosaccharides sont ensuite transformés en acides gras volatils (acides acétique, propionique, et butyrique essentiellement) par les fermenteurs primaires et d'autres micro-organismes incapables d'hydrolyser les polymères complexes eux-mêmes, comme les fermenteurs secondaires (Figure 1), incluant *Selenomonas*, *Veillonella*, *Coprococcus* et *Megasphaera* (Moraïs et Mizrahi, 2019). Ainsi la production microbienne d'acides gras volatils satisfait jusqu'à 70 % des besoins énergétiques de l'animal (Hobson et Stewart, 1988).

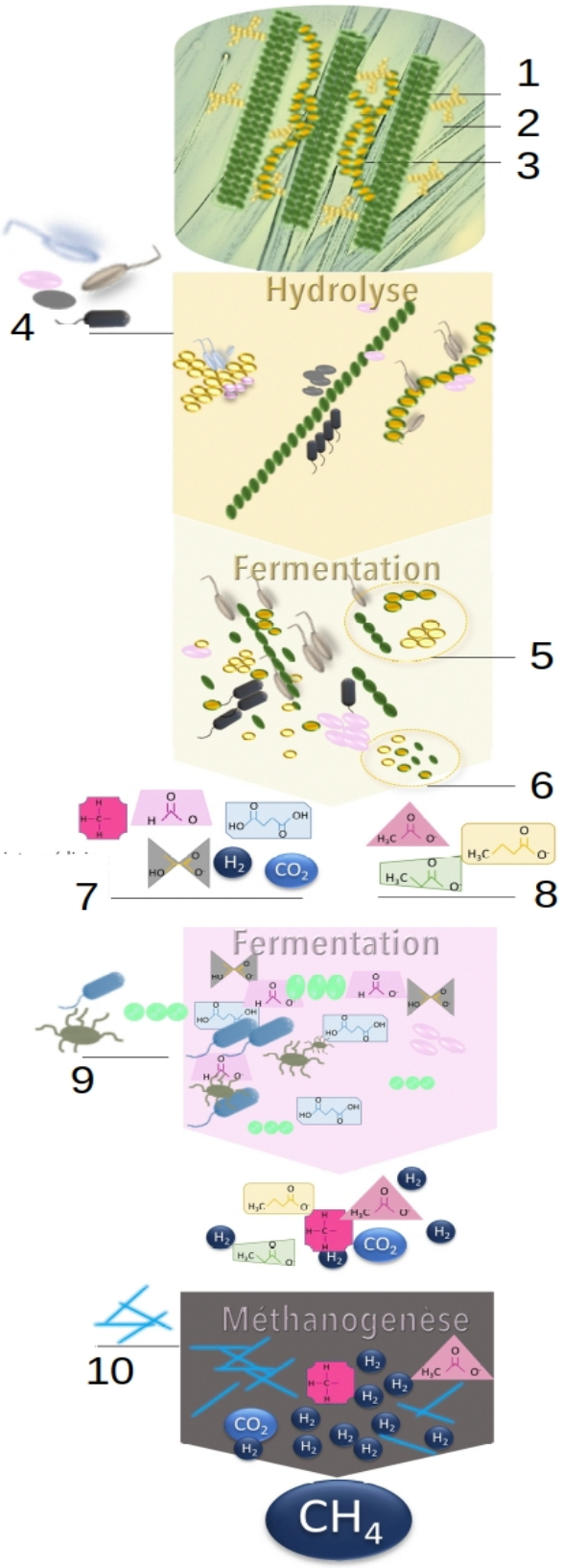

Figure 1. Un travail à la chaîne pour dégrader les fibres végétales, composées de polymères tels que celluloses (1), hémicelluloses (2), pectines (3). D'abord, des micro-organismes hydrolytiques (4) dégradent les polymères des parois, libérant des oligomères (5), puis des monomères (6). Aidés par d'autres micro-organismes, fermenteurs secondaires, les espèces hydrolytiques utilisent ensuite les composés solubles (7) comme sources d'énergie, formant des acides gras volatils (8), des métabolites intermédiaires (acides lactique, succinique, formique) et des gaz (H_2 et CO_2). Les acides gras absorbés par la muqueuse ruminale, sont la première source d'énergie pour l'animal. Le dihydrogène est utilisé par des micro-organismes hydrogénotrophes (9), dominés par les Archaea *méthanogènes (10) et qui réprésentent le troisième maillon de la chaîne.*

2.2. La méthanogenèse

Dans des conditions normales, les réactions de fermentation qui mènent à la production d'acides gras volatils s'accompagnent de la production de gaz, notamment de dioxyde de carbone et de dihydrogène. Les méthanogènes, micro-organismes chimio-lithotrophes, utilisent ces gaz comme substrats dans la production de méthane. Les *Archaea* méthanogènes occupent le niveau le plus bas de la chaîne trophique décrite précédemment (Figure 1).

Ces microbes représentent de 0,3 à 3,3 % du profil microbien du rumen et se trouvent dans le milieu liquide du rumen, attachés aux particules d'aliments ou associés aux protozoaires (Janssen et Kirs, 2008). Les méthanogènes dans le rumen appartiennent à quatre ordres : Methanobacteriales, Methanomicrobiales, Methanosarcinales, Methanomassiliicoccales. Cette communauté d'*Archaea* est dominée par des membres des Methanobacteriales, en particulier des genres *Methanobrevibacter* et *Methanosphaera*, et par ceux des Methanomassiliicoccales, avec de petites contributions des genres *Methanomicrobium* et *Methanosarcina* (Henderson *et al.*, 2015). *Methanobrevibacter gottschalkii*, *M. ruminantium*, *Methanosphaera sp*, et deux espèces de *Methanomassiliicoccaceae* représentent près de 90 % des séquences totales du gène de l'ARNr 16S des méthanogènes du rumen, *Methanobrevibacter* couvrant 74 % des séquences totales et les 16 % restants appartenant à *Methanosphaera sp.* et aux *Methanomassiliicoccaceae* (Janssen et Kirs, 2008 ; Henderson *et al.*, 2015).

La méthanogenèse est un processus d'oxydo-réduction impliquant le dioxyde de carbone et le dihydrogène et aboutissant à la production de méthane et de l'eau. Au cours de cette réaction, le dioxyde de carbone est réduit en méthane par transfert d'électron du dihydrogène (Figure 2a). Cette réaction est connue comme méthanogenèse hydrogénotrophe réductrice de dioxyde de carbone (Garcia *et al.*, 2022) et représente une grande proportion du méthane formé dans des conditions normales (Tapio *et al.*,

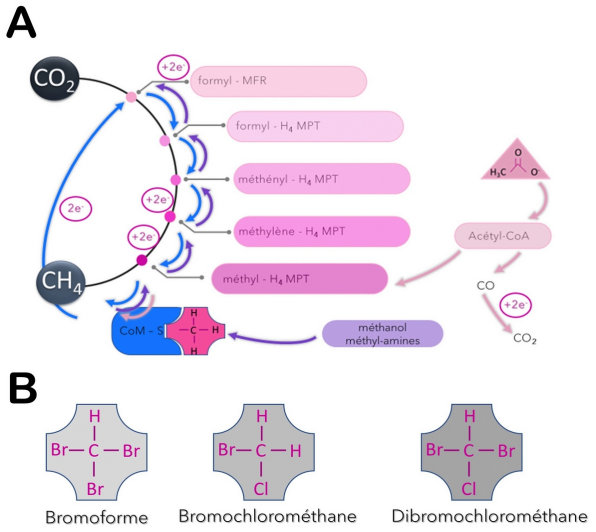

*Figure 2. Les trois voies de la méthanogenèse. (A) La principale voie méthanogène dans le rumen implique la réduction en 5 étapes (*flèches bleues*) d'une molécule de dioxyde de carbone (CO_2). C'est la méthanogenèse hydrogénotrophe réductrice de CO_2. Pour la méthanogenèse hydrogénotrophe réductrice de composés méthylés, quatre composés méthylés entrent au niveau du méthyl-S-CoM, et l'un d'eux est oxydé pour produire les électrons nécessaires à la réduction des trois autres (*flèches violettes*). Dans la méthanogénèse acéticlastique, le carbone méthyle de l'acétate entre au niveau du méthyl-H4MPT et est réduit en méthane à l'aide des électrons provenant de l'oxydation du carbone carbonyle. Le nombre d'électrons transférés dans chaque réaction d'oxydoréduction est indiqué à côté des flèches correspondantes. MFR, méthanofurane ; H4MPT, tétrahydrométha-noptérine ; -S-CoM, coenzyme M. B) Les composés halogénés, comme le bromoforme, le bromochlorométhane et le dibromochlorométhane, sont des analogues de structure des donneurs de groupes méthyl. Ils entrent en compétition pour les sites de liaison sur les méthyltransférases. Cela empêche le substrat approprié de se lier et d'être converti en méthane.*

Tableau 1. Exemples de réactions de réduction pouvant se produire dans le rumen, accompagnées de leur enthalpie libre de Gibbs.

Réaction	ΔG°ᵐ [kJ/mol]*
Oxaloacetate(aq) + NADH(aq) ⇌ Malate(aq) + NAD+ (aq)	-26.5 ± 0.6
Fumarate(aq) + NADH(aq) ⇌ Succinate(aq) + NAD (aq)	-58.1 ± 4.1
Pyruvate(aq) + NADH(aq) ⇌ Lactate(aq) + NAD+(aq)	-23.7 ± 0.9
Acrylyl-CoA(aq) + NADH(aq) ⇌ Propionyl-CoA(aq) + NAD(aq)	-57.5
4 H_2(aq) + 2 CO_2(total) ⇌ Acetate(aq) + 4 H_2O(l)	-91.6 ± 23.7
4 H_2(aq) + CO_2(total) ⇌ CH_4(aq) + 3 H_2O(l)	-124.3 ± 24.0
Methanol(aq) + H_2(aq) ⇌ CH_4(aq) + H_2O(l)	-97.7 ± 10.1
Acetate(aq) ⇌ CH_4(aq) + CO_2(aq)	-30.4 ± 8.4

***ΔG°ᵐ** représente l'énergie associée à une réaction chimique qui peut être utilisée pour effectuer un travail à température et pression constantes. Les valeurs présentées dans ce tableau ont été calculées à l'aide de eQuilibrator en appliquant les mêmes conditions standard pour chaque réaction : température de 25°C (298,15 K), pression de 1 bar, concentration de 1 mM et pH de 6,5. Un changement dans ces paramètres peut expliquer de légères variations par rapport aux valeurs rapportées dans d'autres publications. Si l'énergie libre de Gibbs est négative, la réaction est spontanée ; si elle est positive, la réaction nécessite un apport d'énergie pour se dérouler.

2017). Cette voie est portée par des *Archaea* appartenant principalement au genre *Methanobrevibacter*. Cependant d'autres *Archaea* méthanogènes peuvent synthétiser du méthane en utilisant des voies métaboliques différentes en fonction des substrats disponibles (Figure 2a). Ainsi les émissions de méthane et l'abondance des méthanogènes qui utilisent le méthanol et la méthylamine (comme les genres *Methanosphaera spp.* et *Methanomassiliicoccales)* sont corrélées positivement, alors qu'aucune corrélation évidente n'a été observée pour les méthanogènes, plus abondants, qui utilisent le dioxyde de carbone ou le formate, tels que *Methanobrevibacter*. Ces résultats semblent indiquer que la méthanogenèse hydrogénotrophe methyl-réductrice peut effectivement jouer un rôle plus important dans la formation de méthane que ce qui avait été envisagé à l'origine (Söllinger *et al.*, 2018). Enfin la voie acéticlastique (Figure 2a), qui produit du méthane à partir de l'acétate, est fortement minoritaire dans le rumen (Oppermann *et al.*, 1961 ; Henderson *et al.*, 2015). Le dihydrogène produit massivement au cours de la fermentation des fibres est le donneur d'électrons préférentiel dans ces réactions. Bien que les processus fassent intervenir différents cofacteurs et enzymes, chaque voie de méthanogenèse implique des réactions complexes de transfert d'électrons qui aboutissent finalement à la réduction des composés carbonés en méthane. Une étape commune à toutes les voies est la réduction du méthyl-CoM par la méthyl coenzyme M réductase (Figure 2a).

2.3. Les enjeux du transfert inter-espèces de l'hydrogène

Le transfert d'hydrogène métabolique (c'est-à-dire, les échanges d'atomes d'hydrogène au cours des réactions chimiques) entre espèces est une interaction écologique et biochimique essentielle dans les communautés microbiennes anaérobies, en particulier dans des environnements tels que les sédiments, les zones humides et le tractus gastro-intestinal des animaux. Cette interaction facilite la décomposition de la matière

organique et la production de méthane. En d'autres termes, les microbes fermentaires bénéficient de l'élimination du dihydrogène par les méthanogènes, car son accumulation inhiberait leurs processus métaboliques. La présence d'*Archaea* méthanogènes abaisse la pression partielle de dihydrogène dans le rumen, ce qui rend la fermentation thermodynamiquement plus favorable pour les fermenteurs primaires et secondaires. Dans le cadre de l'écosystème microbien ruminal, il a été longtemps admis que l'accumulation de dihydrogène inhiberait la réoxydation des cofacteurs NADH/FADH microbiens et affecterait négativement ces processus métaboliques clés, réduisant ainsi l'efficacité de l'utilisation des aliments par l'animal (Morgavi *et al.,* 2023). Cependant, dans de nombreuses études, l'inhibition de la méthanogenèse a augmenté la concentration en dihydrogène dans le rumen sans affecter la fermentation des aliments ; la majeure partie du dihydrogène non utilisé pour la méthanogenèse est alors émise par l'animal lors des éructations (Knight *et al.,* 2011 ; Mitsumori *et al.*, 2012 ; Kinley *et al.*, 2020 ; Yu *et al.*, 2021). Ainsi ces études récentes remettent en cause le postulat que le dihydrogène s'accumule dans le rumen et nuirait à la fermentation des aliments.

Il est estimé que 50 à 80 % du dihydrogène dissous dans le contenu du rumen est converti en méthane, 20 à 30 % est utilisé dans la production de propionate et de valérate, qui sont les deux seuls acides gras volatils nécessitant une incorporation nette d'hydrogène métabolique dans leurs voies de production, le reste étant incorporé dans la biomasse microbienne (Czerkawski, 1986). La méthanogenèse est de loin la voie hydrogénotrophe prépondérante dans le rumen du fait (1) des conditions thermodynamiques qui lui sont très favorables (Tableau 1) et (2) de l'affinité des *Archaea* méthanogènes pour le dihydrogène bien supérieure à celle des autres micro-organismes présents (Ungerfeld, 2020). Autrement dit, les méthanogènes peuvent détecter et capter le dihydrogène à des pressions partielles très basses (Mackie *et al.*, 2024). Ainsi, en théorie, lorsque les méthanogènes qui concourent à l'utilisation du dihydrogène sont inhibés, d'autres voies consommatrices d'hydrogène métabolique devraient prendre le relais. Toutefois, comme nous l'avons indiqué précédemment, cela s'est rarement produit. En raison de ce manque de concordance entre les résultats attendus et observés, il convient de reconnaître que les processus microbiens impliqués dans les flux d'énergie au sein de l'écosystème ruminal ne sont pas entièrement compris. L'approche combinée, intégrant l'inhibition ciblée de la méthanogenèse et l'activation des alternatives métaboliques, constitue un axe majeur de recherche.

3. Les stratégies d'atténuation de la méthanogenèse : focus sur les algues

Plusieurs approches de réduction du méthane au niveau de l'animal ont été explorées au cours des deux dernières décennies, notamment des interventions comme :

1. la sélection génétique ;
2. la modification de la composition du régime alimentaire (la réduction de la teneur en NDF ou *neutral detergent fiber* des rations) ;
3. la supplémentation (avec des métabolites secondaires de plantes ou encore des lipides) ;
4. la modulation du microbiote ruminal et de la fermentation en vue de réduire la production de dihydrogène ou d'inhiber directement la production de méthanogènes, tels que le 3-nitrooxypropanol ou les nitrates par exemple.

Cependant, pour maximiser l'efficacité des stratégies de réduction des émissions de méthane entérique des ruminants, la nécessité d'agir sur différents leviers apparaît incontournable. En complément des approches nutritionnelles, il est essentiel de mobiliser des solutions génétiques (comme la sélection d'animaux moins émetteurs) et zootechniques, telles que l'amélioration des

pratiques de conduite des animaux et des troupeaux. Ces leviers, lorsqu'ils sont combinés, offrent un potentiel accru pour atteindre des réductions significatives et durables des émissions de méthane, tout en préservant la productivité et la rentabilité des systèmes d'élevage.

L'ensemble de ces méthodes avec leurs avantages et inconvénients a été récemment revu par Roques *et al*. (2024). À propos de l'atténuation de la production de méthane, il existe des écarts importants entre les différentes études. En outre, ces différentes stratégies diminuent l'intensité (méthane par kilogramme de produit, viande ou lait) et le rendement (méthane par kilogramme de matière sèche - MS - ingérée) en méthane, avec peu de résultats significatifs sur les émissions nettes par animal et par jour (Roques *et al.*, 2024). D'autre part, les approches qui visent spécifiquement les méthanogènes et la voie de la méthanogenèse sont efficaces pour diminuer les émissions, souvent avec des effets secondaires négatifs limités sur l'écosystème microbien du rumen. Ces approches se caractérisent par l'apport d'additifs alimentaires, dont certains sont maintenant commercialisés dans quelques pays. Néanmoins, la majorité des additifs anti-méthanogènes spécifiques sont des composés halogénés (Patra et Puchala, 2023) connus pour leurs propriétés irritantes et toxiques ou des composés chimiques synthétiques susceptibles d'être en opposition avec les attentes sociales sur l'élevage et l'agriculture. L'exception serait l'utilisation d'algues rouges contenant des composés halogénés, mais également riches en alcaloïdes, flavonoïdes, phénols et quinones réputés pour leurs propriétés antioxydantes, antimicrobiennes, anti-tumorales ou encore piégeant les radicaux libres (Min *et al*., 2021).

3.1. Les algues en alimentation animale

La valeur nutritive des algues pour les ruminants varie considérablement en fonction de l'espèce, de la composition et de la capacité digestive de l'animal face à cet aliment (Makkar *et al.*, 2016). Il existe peu de données sur la digestibilité et la valeur énergétique des algues marines chez les ruminants. Les quelques résultats obtenus montrent des différences notables de digestibilité, certaines algues brunes et rouges présentant une digestibilité élevée de la matière organique *in vitro*, et d'autres une digestibilité faible. Les protéines de ces algues sont souvent non dégradables dans le rumen mais hautement digestibles *in vitro*, ce qui indique un potentiel en tant que source de protéines malgré une faible teneur globale en protéines. La teneur élevée en minéraux des algues marines limite toutefois leur valeur énergétique (Min *et al.*, 2021).

3.2. Les algues comme complément alimentaire potentiel pour la réduction du méthane entérique

La recherche sur la supplémentation de l'alimentation des ruminants avec des algues marines pour réduire les émissions de méthane en est à ses débuts, bien que plus de 60 espèces aient déjà été examinées pour leur potentiel anti-méthanogène à l'aide de techniques *in vitro* (Abbott *et al.*, 2020). Parmi celles-ci, une vingtaine d'espèces d'algues apportées à des doses inférieures à 30 % de la matière sèche, permettent d'atteindre une réduction allant de 10 à 100 % du méthane produit *in vitro*. Néanmoins, très souvent cet effet est le résultat d'une inhibition des processus fermentaires comme l'atteste la diminution significative concomitante de la production totale de gaz (Abbott *et al.*, 2020).

Les algues rouges, essentiellement les *Asparagopsis spp.*, se démarquent toutefois. L'ajout de 5 % de matière sèche d'*Asparagopsis taxiformis* dans des fermenteurs *in vitro* a réduit la production de méthane de 65 % et 74 % des gaz totaux

après 24 h et 48 h d'incubation respectivement sans changement significatif dans la quantité de dioxyde de carbone produite. Des résultats similaires ont été observés avec des doses encore plus faibles : une réduction de la production de méthane de 27,0 mL pour la condition témoin à 6,6 mL avec 2.5 % d'*A. taxiformis* a été mesurée après 24 h d'incubation (Huang *et al.*, 2023). Il a également été démontré que l'augmentation des concentrations d'*A. taxiformis* (de 1 % à 5 % de la matière sèche) avait un effet dose-réponse qui se traduisait par des réductions de méthane atteignant jusqu'à 99 % sans effets négatifs sur la production totale de gaz (Romero *et al.*, 2023).

Dans leur revue récente, Wasson *et al* (2022) ont référencé 16 études *in vivo* où les espèces *A. taxiformis* ou *Asparagopsis armata* ont été ajoutées dans les rations d'ovins, de bovins laitiers ou à viande. Les taux de supplémentation, ne dépassant pas les 3 % de matière organique (MO) de la ration, ont eu un effet anti-méthanogène dans 11 de ces expérimentations. Ces résultats sont corroborés par la méta-analyse de Sofyan *et al.* (2022) qui met en évidence la capacité des macro-algues marines, notamment *A. taxiformis*, à réduire significativement les émissions de méthane des ruminants (jusqu'à 65% chez les bovins à viande), sans affecter les rendements. Les productions de méthane par kg MS ingérée ont été réduites de 9 % pour un taux d'inclusion de 0,05 % et jusqu'à 98 % pour 0,20 % *d'A. taxiformis* dans la MO chez des bovins croisés Brahman-Angus (Kinley *et al.*, 2020). Dans cette même étude, il n'y a pas eu d'effet négatif sur l'ingestion quotidienne de la ration, l'efficacité de la conversion alimentaire ou la fonction du rumen, et aucun résidu ou changement dans la qualité de la viande n'a été détecté. Au contraire, une amélioration de la croissance, 42 % d'augmentation dans le gain moyen quotidien comparé au lot témoin, a été observée dans le lot recevant la dose la plus élevée. Chez des vaches laitières aussi, l'inclusion d'*A. taxiformis* à 0,5 % de la MS a réduit les émissions quotidiennes de méthane, le rendement en méthane et l'intensité du méthane par rapport au contrôle de 34,4 %, 29,4 % et 34,2 %, respectivement. En revanche, à ce taux d'inclusion, *A. taxiformis* a aussi réduit l'ingestion, ce qui a entraîné une diminution de la production laitière (Stefenoni *et al.*, 2021). Des essais avec *A. armata* à 0,5 % de la MO de la ration ont fait état d'une réduction de 26,4 % de la production de méthane, de 20,5 % du rendement en méthane et de 26,8 % de l'intensité du méthane sans compromettre la production laitière brute ou l'efficience alimentaire (la quantité d'aliments nécessaire pour obtenir une unité de produit animal). Toutefois l'augmentation du niveau d'inclusion à 1 % a entraîné des réductions de 67,2 % de la production de méthane, de 42,6 % du rendement en méthane et de 60,0 % de l'intensité en méthane ; mais l'ingestion d'aliments et le rendement laitier ont également été réduits (Roque *et al.*, 2019).

3.3. Mécanismes d'action des algues rouges sur la méthanogenèse

Comme les algues rouges du genre *Asparagopsis* sont celles qui inhibent la méthanogenèse à des taux d'inclusion les plus bas *in vitro* et *in vivo* et que les différents résultats disponibles dans la littérature sont plutôt comparables, Machado *et al.* (2016) ont conduit une série d'expériences pour identifier le principe actif agissant sur les méthanogènes. Dans un premier temps, ils ont testé *in vitro* différents solvants pour l'extraction de produits naturels d'*Asparagopsis* ayant une activité anti-méthanogénique chez les bovins : eau, méthanol, dichlorométhane (DCM), hexane. L'activité des extraits obtenus a été testée *in vitro* à une dose équivalente à 2 % de la MO incubée d'*Asparagopsis* et seul l'extrait DCM a réduit la production de méthane. L'analyse

en chromatographie en phase gazeuse a permis ensuite d'identifier les principaux composés naturels contenus dans les extraits ; l'extrait DCM s'est ainsi révélé très riche en bromoforme et dibromo-chlorométhane. Enfin ils ont testé les effets d'une gamme de concentrations sur la production de méthane et ont montré que 1 µM de bromoforme inhibe la production de méthane de 52 % par rapport au témoin. L'effet était considérablement plus fort et la production de méthane était significativement inhibée à des niveaux inférieurs aux niveaux de détection pour une concentration ≥ 5 µM (Machado *et al.*, 2016).
La molécule de bromoforme ($CHBr_3$) (Figure 2b) est constituée d'un seul atome de carbone lié à trois atomes de brome et à un atome d'hydrogène. C'est un halométhane, avec la même structure tétraédrique que le méthane. Il est estimé que le $CHBr_3$, se lie de manière compétitive aux enzymes qui facilitent les étapes finales de la réduction du dioxyde de carbone par le dihydrogène en méthane par les *Archaea*.

4. Les algues sont-elles une solution prête à emploi ?

Les effets démontrés d'*Asparagopsis* spp. sur la méthanogenèse en font un produit prometteur pour réguler la production de méthane entérique. Ces algues sont présentes naturellement et en abondance dans les eaux chaudes à tempérées comme sur les côtes australiennes et la Méditerranée. Les halométhanes d'origine naturelle, sont susceptibles d'être mieux acceptés par le consommateur que ces mêmes halométhanes issus de l'industrie chimique, qui sont interdits dans de nombreux pays en raison de leur potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone et de leurs effets cancérogènes. On note cependant que le $CHBr_3$ extrait d'*Asparagopsis* a les mêmes propriétés et effets que le $CHBr_3$ de synthèse.
Pour que cette approche soit viable, elle doit non seulement être efficace, mais également ne pas compromettre le bon fonctionnement du rumen, la santé de l'animal, ainsi que la productivité et la qualité des produits. Chez les animaux supplémentés en *A. taxiformis*, des anomalies histopathologiques ont été observées dans la paroi du rumen. Chez les vaches, cela s'est manifesté par une perte partielle ou totale des papilles à certains endroits (Muizelaar *et al.*, 2021), tandis que chez plusieurs moutons, des lésions granulomateuses et kératosiques de la muqueuse ruminale ont également été rapportées (Li *et al.*, 2018). Toutefois ces observations ont été faites sur un nombre restreint d'animaux, et les anomalies n'ont pas été systématiquement retrouvées, remettant en question leur lien direct avec la consommation d'algues. En outre, les rapports sur l'accumulation mesurable de bromoforme dans les produits et tissus des ruminants présentent des conclusions divergentes. En effet, certaines études n'ont révélé aucune accumulation mesurable de bromoforme dans le lait, les abats comestibles, la graisse ou les matières fécales, même lorsque des doses minimales efficaces ont été administrées pour atténuer les émissions de méthane (Glasson *et al.*, 2022).
Dans d'autres études, il a été observé que le bromoforme présentait une forte persistance dans le lait, l'urine ou les fèces après une supplémentation à hauteur de 0,15 % de la MO de la ration avec *A. taxiformis*. Des recherches supplémentaires sont requises afin d'évaluer les résidus à long terme après une supplémentation prolongée. En effet, il est important de souligner que les concentrations résiduelles en bromoforme doivent être inférieures aux seuils acceptables pour la consommation humaine (European Algae Biomass Association. 2023 ; Charles and Fennessy, 2025).
D'autres aspects doivent être pris en compte pour l'utilisation *d'Asparagopsis* comme additif alimentaire chez les ruminants. Dans certaines études, une diminution de l'ingestion

a été observée (Eikanger *et al.*, 2024 ; Huang *et al.*, in prep), ce qui pourrait affecter la production. Pourtant une méta-analyse récente n'a pas révélé d'effets négatifs majeurs sur l'ingestion (Sofyan *et al.*, 2022). De plus, selon son origine, *Asparagopsis* peut présenter des teneurs élevées en iode. Dans le cas des vaches laitières, cela augmente la teneur en iode dans le lait (Stefenoni *et al.*, 2021) en lui faisant dépasser le seuil recommandé pour la consommation humaine (ANSES, 2018 ; Roseland *et al.*, 2020). Les algues marines concentrent également des métaux lourds, ce qui les soumet à des régulations strictes sur leur teneur en éléments traces en Europe, car elles peuvent nuire à la santé animale et provoquer des intoxications, notamment par l'arsenic, et le plomb (Makkar *et al.*, 2016).
L'impact de la culture d'*Asparagopsis taxiformis* sur la biodiversité aquatique reste méconnu, et des recherches approfondies sont nécessaires pour évaluer ses effets potentiels, en particulier dans un contexte de production à grande échelle. Cette algue pourrait devenir envahissante si elle est cultivée en dehors de son habitat naturel. De plus, il n'existe pas encore d'études exhaustives sur l'impact net de la réduction des GES, surtout en tenant compte des émissions de dioxyde de carbone associées aux processus de production, de transformation et de transport de l'algue et du complément alimentaire. Ces émissions pourraient neutraliser le carbone séquestré par la photosynthèse et la croissance des algues. De plus, le bromoforme naturellement libéré par ces algues au cours de leur cycle de croissance peut interagir dans la troposphère et la stratosphère avec des radicaux hydroxyles ou chlorés, ou subir une photolyse. Ces réactions entraînent la formation de gaz réactifs solubles et de brome inorganique, qui contribuent à l'appauvrissement de la couche d'ozone (Glasson *et al.*, 2022). Si cet impact est négligeable à petite échelle (Glasson *et al.*, 2022), une production à grande échelle nécessiterait une surveillance rigoureuse (Vijn *et al.*, 2020).

En plus de produire une quantité suffisante de biomasse pour répondre à la demande d'atténuation du méthane, le traitement des algues récoltées, quelle que soit leur source, nécessitera une optimisation substantielle pour garantir le succès des industries à grande échelle. En raison de la forte teneur en eau des macro-algues et de leur décomposition rapide, les étapes post-récolte, telles que le séchage, doivent être effectuées rapidement. Récemment Magnusson *et al.* (2020) ont mis au point un produit à base de bromoforme stable, obtenu à partir d'*A. taxiformis* fraîche sous forme d'émulsion, capable de se conserver pendant 12 semaines. Cette méthode permet de contourner l'étape du séchage, considérée comme l'un des principaux obstacles à l'efficacité post-récolte. Le transport, le stockage et la conservation sont également des étapes critiques à prendre en compte lors de l'augmentation de la production de macro-algues pour l'atténuation du méthane. Ces défis sont amplifiés par la saisonnalité de l'aquaculture des macro-algues, qui peut nécessiter des investissements coûteux dans des équipements utilisés seulement quelques mois par an.

5. Conclusion

L'utilisation des algues dans l'alimentation des ruminants, notamment *Asparagopsis taxiformis*, représente une approche prometteuse pour réduire les émissions de méthane de ces animaux et favoriser une agriculture moins émettrice de GES. Néanmoins la solution est plutôt applicable dans des systèmes de production laitière avec la possibilité d'une distribution quotidienne. Les composés halogénés présents dans ces algues, comme le bromoforme, sont efficaces pour inhiber la méthanogenèse tout en maintenant une activité fermentaire essentielle pour l'alimentation des animaux. Cependant plusieurs défis subsistent, notamment en

matière de sécurité sanitaire animale, de variabilité des résultats, et d'impact environnemental.

La production à grande échelle d'algues nécessitera une optimisation rigoureuse des processus post-récolte et une évaluation approfondie de leur impact sur la biodiversité aquatique. De plus, la question des résidus potentiels dans les produits animaux et les émissions de dioxyde de carbone liées à la production et au transport doit être soigneusement étudiée pour garantir une véritable réduction nette des gaz à effet de serre.

Enfin, il est essentiel de prendre en compte le coût économique associé à la production des algues et leur achat par les éleveurs, car ces facteurs pourraient constituer un frein à leur adoption généralisée. Une analyse économique approfondie devra donc accompagner les recherches pour assurer la viabilité de cette solution à long terme ainsi que la faisabilité de l'intégration territoriale des algues comme solutions de réduction des émissions de méthane des ruminants à une échelle géographique raisonnable d'un point de vue environnemental.

Les opinions exprimées dans cet article sont celles des auteurs et n'engagent pas les institutions auxquelles ils sont affiliés. Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts.

Références

Abbott DW, Aasen IM, Beauchemin KA, Grondahl F, Gruninger R, Hayes M, Huws S, Kenny DA, Krizsan SJ, Kirwan SF, Lind V, Meyer U, Ramin M, Theodoridou K, von Soosten D, Walsh PJ, Waters S, Xing X. 2020. Seaweed and seaweed bioactives for mitigation of enteric methane: Challenges and opportunities, *Animals*, 10, (12), 2432. DOI:10.3390/ani10122432.

Andersen TO, Altshuler I, Vera-Ponce de León A, Walter JM, McGovern E, Keogh K, Martin C, Bernard L, Morgavi DP, Park T, Li Z, Jiang Y, Firkins JL, Yu Z, Hvidsten TR, Waters SM, Popova M, Arntzen MØ, Hagen LH, Pope PB. 2023. Metabolic influence of core ciliates within the rumen microbiome, *The ISME Journal*, 17, (7), 1128-1140. DOI:10.1038/s41396-023-01407-y.

ANSES. 2018. Opinion of anses on the risk of excess iodine intake from the consumption of seaweed in foodstuffs https://www.anses.fr/en/content/opinion-anses-risk-excess-iodine-intake-consumption-seaweed-foodstuffs.

Arndt C, Hristov AN, Price WJ, McClelland SC, Pelaez AM, Cueva SF, Oh J, Dijkstra J, Bannink A, Bayat AR, Crompton LA, Eugène MA, Enahoro D, Kebreab E, Kreuzer M, McGee M, Martin C, Newbold CJ, Reynolds CK, Schwarm A, Shingfield KJ, Veneman JB, Yáñez-Ruiz DR, Yu Z. 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, *Proceedings of the national academy of sciences*, 119(20), e2111294119. DOI:10.1073/pnas.2111294119.

Chang J, Peng S, Ciais P, Saunois M, Dangal SRS, Herrero M, Havlík P, Tian H, Bousquet P. 2019. Revisiting enteric methane emissions from domestic ruminants and their δ13cch4 source signature, *Nature Communications*, 10 (1), 3420. DOI:10.1038/s41467-019-11066-3.

Charles TE, Fennessy P. 2025. Methane reduction, health and regulatory considerations regarding Asparagopsis and bromoform for ruminants, *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 68(1) 1-30. DOI: 10.1080/00288233.2023.2248948#abstract.

Czerkawski JW. 1986. Introduction to general approach to rumen studies. In Czerkawski W (ed) *An introduction to rumen studies*, Pergaman 171-172.

Eikanger KS, Kjær ST, Dörsch P, Iwaasa AD, Alemu AW, Schei I, Pope PB, Hagen L, Kidane A. 2024. *Asparagopsis taxiformis* inclusion in grass silage-based diets fed to norwegian red dairy cows: Effects on ruminal fermentation, milk yield, and enteric methane emission, *Livestock Science*, 285, 105495. DOI:10.1016/j.livsci.2024.105495.

European Algae Biomass Association. 2023. *Food safety regulation and recommendations involving Algae and Algae based Products*, https://maritime-forum.ec.europa.eu/document/download/8728c875-d924-4146-abf2-9dd1fce8f80e_en?filename=Chemical%20Contaminants%20in%20Algae%20for%20Food-Nov2023-last-review.pdf

FAO. 2020. *World food and agriculture - statistical yearbook 2020,* Rome, Italy.

FAO. 2023. Pathways towards lower emissions. In *Pathways towards lower emissions*, 77.

Garcia PS, Gribaldo S, Borrel G. 2022. Diversity and evolution of methane-related pathways in Archaea, *Annual Review of Microbiology*, 76, 727-755. DOI:10.1146/annurev-micro-041020-024935.

Glasson CRK, Kinley RD, de Nys R, King N, Adams SL, Packer MA, Svenson J, Eason CT Magnusson M. 2022. Benefits and risks of including the bromoform containing seaweed asparagopsis in feed for the reduction of methane production from ruminants, *Algal Research*, 64, 102673. DOI:10.1016/j.algal.2022.102673.

Hagen LH, Brooke CG, Shaw CA, Norbeck AD, Piao H, Arntzen MØ, Olson HM, Copeland A, Isern N, Shukla A, Roux S, Lombard V, Henrissat B, O'Malley MA, Grigoriev IV, Tringe SG, Mackie RI, Pasa-Tolic L, Pope PB, Hess M. 2020. Proteome specialization of anaerobic fungi during ruminal degradation of recalcitrant plant fiber, *The ISME Journal*, 15(2), 421-434. DOI:10.1038/s41396-020-00769-x.

Henderson G, Cox F, Ganesh S, Jonker A, Young W, Global Rumen Census C, Janssen PH. 2015. Rumen microbial community composition varies with diet and host, but a core microbiome is found across a wide geographical range *Scientific Reports*, 5, 14567. DOI:10.1038/srep14567.

Herrero M, Grace D, Njuki J, Johnson N, Enahoro D, Silvestri S, Rufino MC 2013. The roles of livestock in developing countries. *animal*, 7, 3-18. DOI:10.1017/S1751731112001954.

Hess M, Paul SS, Puniya AK, van der Giezen M, Shaw C, Edwards JE, Fliegerová K. 2020. Anaerobic fungi: Past, present, and future *Frontiers in microbiology*, 11, 584893-584893. DOI:10.3389/fmicb.2020.584893.

Hobson PN, Stewart CS. 1988. *Rumen microbial ecosystem*, Springer Science & Business Media.

Huang R, Morgavi DP, Popova M. *In prep*. The synergy of *Asaparagopsis armata* and galic acid in reducing methane emissions and improving dairy cow performance.

Huang R, Romero P, Belanche A, Ungerfeld EM, Yanez-Ruiz D, Morgavi DP, Popova M. 2023. Evaluating the effect of phenolic compounds as hydrogen acceptors when ruminal methanogenesis is inhibited *in vitro* – part 1. Dairy cows, A*nimal*, 17(5), 100788. DOI:10.1016/j.animal.2023.100788.

Janssen PH, Kirs M 2008. Structure of the

archaeal community of the rumen, *Applied and Environmental Microbiology*, 74(12), 3619-3625. DOI:10.1128/aem.02812-07.

Jouany JP. 1994. Les fermentations dans le rumen et leur optimisation, *INRA Productions. Animales*, 7(3), 207-225.

Kinley RD, Martinez-Fernandez G, Matthews MK, de Nys R, Magnusson M, Tomkins NW. 2020. Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed, *Journal of Cleaner Production*, 259, 120836. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.120836.

Knight T, Ronimus RS, Dey D, Tootill C, Naylor G, Evans P, Molano G, Smith A, Tavendale M, Pinares-Patiño CS, Clark H. 2011. Chloroform decreases rumen methanogenesis and methanogen populations without altering rumen function in cattle, *Animal Feed Science and Technology*, 166, 101-112.

Li J, Zhong H, Ramayo-Caldas Y, Terrapon N, Lombard V, Potocki-Veronese G, Estellé J, Popova M, Yang Z, Zhang H, Li F, Tang S, Yang F, Chen W, Chen B, Li J, Guo J, Martin C, Maguin E, Xu X, Yang H, Wang J, Madsen L, Kristiansen K, Henrissat B, Ehrlich SD, Morgavi DP. 2020. A catalog of microbial genes from the bovine rumen unveils a specialized and diverse biomass-degrading environment, *GigaScience*, 9(6). DOI:10.1093/gigascience/giaa057.

Li X, Norman HC, Kinley RD, Laurence M, Wilmot M, Bender H, de Nys R, Tomkins N. 2018. *Asparagopsis taxiformis* decreases enteric methane production from sheep, *Animal Production Science*, 58(4), 681-688. DOI:10.1071/AN15883.

Machado L, Magnusson M, Paul NA, Kinley R, de Nys R, Tomkins N. 2016. Identification of bioactives from the red seaweed *Asparagopsis taxiformis* that promote antimethanogenic activity *in vitro, Journal of Applied Phycology*, 28(5), 3117-3126. DOI:10.1007/s10811-016-0830-7.

Mackie RI, Kim H, Kim NK, Cann I. 2024. Invited review - hydrogen production and hydrogen utilization in the rumen: Key to mitigating enteric methane production, *Animal Bioscience*, 37(2), 323-336. DOI:10.5713/ab.23.0294.

Magnusson M, Vucko MJ, Neoh TL, de Nys R. 2020. Using oil immersion to deliver a naturally-derived, stable bromoform product from the red seaweed *Asparagopsis taxiformis, Algal Research*, 51, 102065. DOI:10.1016/j.algal.2020.102065.

Makkar HPS, Tran G, Heuzé V, Giger-Reverdin S, Lessire M, Lebas F, Ankers P. 2016. Seaweeds for livestock diets: A review, *Animal Feed Science and Technology*, 212, 1-17. DOI:10.1016/j.anifeedsci.2015.09.018.

Meili CH, Jones AL, Arreola AX, Habel J, Pratt CJ, Hanafy RA, Wang Y, Yassin AS, TagElDein MA, Moon CD, Janssen PH, Shrestha M, Rajbhandari P, Nagler M, Vinzelj JM, Podmirseg SM, Stajich JE, Goetsch AL, Hayes J, Young D, Fliegerova K, Grilli DJ, Vodička R, Moniello G, Mattiello S, Kashef MT, Nagy YI, Edwards JA, Dagar SS, Foote AP, Youssef NH, Elshahed MS. 2023. Patterns and determinants of the global herbivorous mycobiome, *Nature Communications*, 14(1), 3798. DOI:10.1038/s41467-023-39508-z.

Min BR, Parker D, Brauer D, Waldrip H, Lockard C, Hales K, Akbay A, Augyte S. 2021. The role of seaweed as a potential dietary supplementation for enteric methane mitigation in ruminants: Challenges and opportunities, *Animal Nutrition*, 7(4), 1371-1387. DOI:10.1016/j.aninu.2021.10.003.

Mitsumori M, Shinkai T, Takenaka A, Enishi O, Higuchi K, Kobayashi Y, Nonaka I, Asanuma N, Denman SE, McSweeney CS. 2012. Responses in digestion, rumen fermentation and microbial populations to inhibition of methane formation by a halogenated methane analogue, *British Journal of Nutrition*, 108(3), 482-491. DOI:10.1017/S0007114511005794.

Moraïs S, Mizrahi I. 2019. The road not taken: The rumen microbiome, functional groups, and community states, *Trends in Microbiology*, 27(6), 538-549. DOI:10.1016/j.tim.2018.12.011.

Morgavi DP, Cantalapiedra-Hijar G, Eugène M, Martin C, Noziere P, Popova M, Ortigues-Marty I, Muñoz-Tamayo R, Ungerfeld EM. 2023. Review: Reducing enteric methane emissions improves energy metabolism in livestock: Is the tenet right?, *Animal*, 17 Suppl 3, 100830. DOI:10.1016/j.animal.2023.100830.

Mottet A, de Haan C, Falcucci A, Tempio G, Opio C, Gerber P. 2017. Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate, *Global Food Security*, 14, 1-8. DOI:10.1016/j.gfs.2017.01.001.

Muizelaar W, Groot M, van Duinkerken G, Peters R, Dijkstra J. 2021. Safety and transfer study: Transfer of bromoform present in *Asparagopsis taxiformis* to milk and urine of lactating dairy cows, *Foods*, 10(3), 584. DOI:10.3390/foods10030584.

Nisbet EG, Manning MR, Dlugokencky EJ, Fisher RE, Lowry D, Michel SE, Myhre CL, Platt SM, Allen G, Bousquet P, Brownlow R, Cain M, France JL, Hermansen O, Hossaini R, Jones AE, Levin I, Manning AC, Myhre G, Pyle JA, Vaughn BH, Warwick NJ, White JWC. 2019. Very strong atmospheric methane growth in the 4 years 2014–2017: Implications for the paris agreement, *Global Biogeochemical Cycles*, 33(3), 318-342. DOI:10.1029/2018GB006009.

OCDE. 2022. *OCDE-FAO agricultural outlook 2022-2031*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

Oppermann R, Nelson W, Brown R. 1961. *In vivo* studies of methanogenesis in the bovine rumen: Dissimilation of acetate, *Microbiology*, 25(1), 103-111.

Patra AK, Puchala R. 2023. Methane mitigation in ruminants with structural analogues and other chemical compounds targeting archaeal methanogenesis pathways, *Biotechnology Advances*, 69, 108268. DOI:10.1016/j.biotechadv.2023.108268.

Randolph TF, Schelling E, Grace D, Nicholson CF, Leroy JL, Cole DC, Demment MW, Omore A, Zinsstag J, Ruel M. 2007. Invited review: Role of livestock in human nutrition and health for poverty reduction in developing countries, *Journal of Animal Science*, 85(11), 2788-2800. DOI:10.2527/jas.2007-0467.

Romero P, Belanche A, Jiménez E, Hueso R, Ramos-Morales E, Salwen JK, Kebreab E, Yáñez-Ruiz DR. 2023. Rumen microbial degradation of bromoform from red seaweed (*Asparagopsis taxiformis*) and the impact on rumen fermentation and methanogenic archaea, *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 14(1), 133. DOI:10.1186/s40104-023-00935-z.

Roque BM, Salwen JK, Kinley R, Kebreab E. 2019. Inclusion of *Asparagopsis armata* in lactating dairy cows' diet reduces enteric methane emission by over 50 percent, *Journal of Cleaner Production*, 234, 132-138. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.06.193.

Roques S, Martinez-Fernandez G, Ramayo-Caldas Y, Popova M, Denman S, Meale SJ, Morgavi DP. 2024. Recent advances in enteric methane mitigation and the long road to sustainable ruminant production, *Annual Review of Animal Biosciences*, 12, (12), 321-

343. DOI:10.1146/annurev-animal-021022-024931.

Roseland JM, Phillips KM, Patterson KY, Pehrsson PR, Bahadur R, Ershow AG, Somanchi M. 2020. Large variability of iodine content in retail cow's milk in the U.S, *Nutrients*, 12, (5). DOI:10.3390/nu12051246.

Sofyan A, Irawan A, Herdian H, Jasmadi, Harahap MA, Sakti AA, Suryani AE, Novianty H, Kurniawan T, Darma ING, Windarsih A, Jayanegara A. 2022. Effects of various macroalgae species on methane production, rumen fermentation, and ruminant production: A meta-analysis from *in vitro* and *in vivo* experiments, *Animal Feed Science and Technology*, 294, 115503. DOI:10.1016/j.anifeedsci.2022.115503.

Söllinger A, Tveit AT, Poulsen M, Noel SJ, Bengtsson M, Bernhardt J, Frydendahl Hellwing AL, Lund P, Riedel K, Schleper C, Højberg O, Urich T. 2018. Holistic assessment of rumen microbiome dynamics through quantitative metatranscriptomics reveals multifunctional redundancy during key steps of anaerobic feed degradation, *mSystems*, 3, (4). DOI:10.1128/msystems.00038-18.

Stefenoni HA, Räisänen SE, Cueva SF, Wasson DE, Lage CFA, Melgar A, Fetter ME, Smith P, Hennessy M, Vecchiarelli B, Bender J, Pitta D, Cantrell CL, Yarish C, Hristov AN. 2021. Effects of the macroalga *Asparagopsis taxiformis* and oregano leaves on methane emission, rumen fermentation, and lactational performance of dairy cows, *Journal of Dairy Science*, 104(4), 4157-4173. DOI:10.3168/jds.2020-19686.

Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar TD, Castel V, De Haan C. 2006. Livestock's long shadow: Environmental issues and options, *Food & Agriculture Organization*.

Steinfeld H, Wassenaar T, Jutzi S. 2006. Livestock production systems in developing countries: Status, drivers, trends, *Revue Scientifique et Technique*, 25(2), 505-516. DOI:10.20506/rst.25.2.1677.

Stewart RD, Auffret MD, Warr A, Walker AW, Roehe R, Watson M. 2019. Compendium of 4,941 rumen metagenome-assembled genomes for rumen microbiome biology and enzyme discovery, *Nature Biotechnology*, 37(8), 953-961. DOI:10.1038/s41587-019-0202-3.

Tapio I, Snelling TJ, Strozzi F & Wallace RJ 2017. The ruminal microbiome associated with methane emissions from ruminant livestock, *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 8, (1), 7. DOI:10.1186/s40104-017-0141-0.

Torres Manno MA, Gizzi FO, Martín M, Espariz M, Magni C, Blancato VS. 2023. Metagenomic approach to infer rumen microbiome derived traits of cattle, *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(9), 250. DOI:10.1007/s11274-023-03694-1.

Ungerfeld EM. 2020. Metabolic hydrogen flows in rumen fermentation: Principles and possibilities of interventions, *Frontiers in microbiology*, 11, (589). DOI:10.3389/fmicb.2020.00589.

Vijn S, Compart DP, Dutta N, Foukis A, Hess M, Hristov AN, Kalscheur KF, Kebreab E, Nuzhdin SV, Price NN, Sun Y, Tricarico JM, Turzillo A, Weisbjerg MR, Yarish C, Kurt TD. 2020. Key considerations for the use of seaweed to reduce enteric methane emissions from cattle, *Frontiers in Veterinary Science*, 7, (1135). DOI:10.3389/fvets.2020.597430.

Wasson DE, Yarish C, Hristov AN. 2022. Enteric methane mitigation through asparagopsis taxiformis supplementation and potential algal alternatives, *Frontiers in Animal Science*, 3. DOI:10.3389/fanim.2022.999338.

Yu G, Beauchemin KA, Dong R. 2021. A review of 3-nitrooxypropanol for enteric methane mitigation from ruminant livestock, *Animals*, 11(12), 3540. DOI:10.3390/ani11123540.

Reçu
2 octobre 2024

Accepté
15 janvier 2025

Publié
29 novembre 2025

Rubrique
Cet article a été publié dans la rubrique « Articles de synthèse » des *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France.*

Edité par
Mylène Durand-Tardif, membre de l'Académie d'agriculture de France.

Rapporteurs
1. Anonyme
2. René Baumont, directeur de recherches à l'INRAE, directeur du GIS Avenir Elevages, éditeur en chef de la revue INRAE Productions Animales, membre correspondant de l'Académie d'agriculture de France.

Citation
Milka Popova, Diego P, Morgavi, Simon Roques, 2025. Les algues : un additif naturel dans l'alimentation pour réduire les émissions de méthane des ruminants ?, *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF),* 20(1), 3, 1-17. DOI :10.58630/pubac.not.a170746.

Milka Popova, Diego Morgavi et Simon Roques sont chercheurs à INRAE, Centre Auvergne-Rhône-Alpes, au sein de l'unité mixte de recherche sur les herbivores (UMRH). Leurs travaux de recherche portent sur le microbiote digestif des ruminants, avec pour objectif d'identifier ses fonctions et son rôle dans les performances animales et les impacts environnementaux.