

Stratégies nutritionnelles pour la réduction des émissions de méthane entérique chez les ruminants en zone tropicale : synthèse bibliographique

Wendinmalgdé Salomo Oualyou OUERMI^{1*},
Bila Isidore GNANDA¹, Etienne SODRE¹,
Valérie Marie Christiane BOUGOUMA-YAMEOGO².

Résumé

L'élevage de ruminants en zone tropicale, crucial pour la sécurité alimentaire et la création de moyens de subsistance, est confronté au double défi d'augmenter la productivité tout en réduisant son impact environnemental, notamment les émissions de méthane entérique. La présente synthèse bibliographique fait un état des lieux des principales stratégies nutritionnelles en vigueur pour réduire les émissions de méthane entérique chez les ruminants en zone tropicale. Les investigations montrent que plusieurs stratégies nutritionnelles dont les suivantes peuvent significativement atténuer ces émissions : (i) l'amélioration de la qualité du fourrage (ii) la valorisation des métabolites secondaires naturels, particulièrement les tanins condensés (iii) l'augmentation des concentrés (iv) l'utilisation du biochar (v) l'incorporation d'insectes (vi) l'utilisation de fourrage hydroponique (vii) l'utilisation de rations équilibrées. Bien que ces stratégies aient offert des solutions accessibles et adaptables aux réalités tropicales, leur mise en œuvre à grande échelle est freinée par des contraintes telles que le coût des concentrés, la compétition alimentaire, la durabilité de l'exploitation des ressources ligneuses, et le risque d'adaptation microbienne à long terme. La recherche future doit se concentrer sur la caractérisation génomique du microbiote local, l'étude des synergies entre stratégies, et l'analyse de l'impact économique pour les producteurs.

Mots clés : Flore microbienne, Qualité du fourrage, tanins, rations équilibrées

¹ Laboratoire de Recherche en Production et Santé Animales (LaRePSA)/Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA)/Centre National de Recherche Scientifique et Technologique (CNRST), 03 BP 7043 Ouagadougou 03, Burkina Faso

² Laboratoire des Systèmes naturels, Agrosystèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement (SyNAIE)/ Université Nazi Boni, 01 BP 1091 Bobo-Dioulasso 01, Burkina Faso

* **Auteur correspondant :** Wendinmalgdé Salomo Oualyou OUERMI: +226 76 14 46 46 ; oualyou.ouermi@inera.bf

DOI : <https://doi.org/10.64707/revstsna.v44i2.1913>

Nutritional strategies for reducing enteric methane emissions in ruminants in tropical areas: a literature review

Abstract

Ruminant farming in tropical regions, which is crucial for food security and the creation of livelihoods, faces the dual challenge of increasing productivity while simultaneously reducing its environmental impact, particularly enteric methane emissions. This literature review provides an overview of the main nutritional strategies currently in use to mitigate enteric methane emissions in ruminants in tropical regions. The results indicate that several nutritional strategies can significantly attenuate these emissions. These include: (i) the improvement of forage quality, (ii) the valorization of natural secondary metabolites, particularly condensed tannins, (iii) the increased incorporation of concentrates, (iv) the use of biochar, (v) the incorporation of insects, (vi) the use of hydroponic fodder, and (vii) the use of balanced rations. Although these strategies offer accessible solutions adaptable to tropical realities, their large-scale implementation is hindered by constraints such as the high cost of concentrates, feed competition, the sustainability of exploiting woody resources, and the long-term risk of microbial adaptation. Future research should therefore focus on the genomic characterization of the local microbiota, the study of synergies between strategies, and the analysis of the economic impact for producers.

Keywords: Microbial flora, Forage quality, Tannins, Balanced rations

Introduction

L'élevage de ruminants joue un rôle fondamental dans la sécurité alimentaire et la création de moyens de subsistance des populations vivant en zone tropicale, particulièrement en Afrique subsaharienne. Toutefois, ce secteur est confronté à un double impératif : augmenter sa productivité pour répondre à la demande croissante, tout en réduisant son impact environnemental global. En effet, les ruminants sont responsables d'une part significative des émissions mondiales de méthane, un gaz à effet de serre dont le pouvoir de réchauffement global est 28 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone sur un horizon de 100 ans (GERBER *et al.*, 2014 ; BLANFORT *et al.*, 2025). Ces émissions entériques résultent de la fermentation microbienne du bol alimentaire dans le rumen, et constituent un enjeu environnemental majeur dans le cadre des engagements internationaux de réduction des gaz à effet de serre (POPOVA *et al.*, 2011).

En zone tropicale, les systèmes d'élevage sont souvent basés sur l'exploitation de fourrages de qualité relativement limitée ainsi que de résidus agricoles, dont la faible valeur nutritive favorise des

fermentations ruminales prolongées et intensifie la production de méthane (KLEIN *et al.*, 2014). Par ailleurs, les systèmes d'élevage en vigueur, les contraintes climatiques, la variabilité saisonnière des ressources, ainsi que les contraintes économiques sont autant de facteurs qui rendent la mise en œuvre de stratégies de mitigation particulièrement complexe.

Cette revue vise à synthétiser les connaissances actuelles sur les stratégies nutritionnelles envisageables dans les systèmes d'élevage tropicaux pour la réduction des émissions de méthane entérique. Nous analyserons l'efficacité comparée des différentes approches, leurs implications pratiques, ainsi que les verrous techniques et les perspectives de recherche pour intégrer ces solutions à grande échelle.

I. Méthodologie d'approche de la recherche documentaire pour la synthèse bibliographique

Pour identifier les sources pertinentes, des articles publiés dans des revues scientifiques sur les stratégies nutritionnelles en vigueur pour réduire les émissions de méthane entérique chez les ruminants en zone tropicale ont été rassemblés en utilisant plusieurs moteurs de recherche en ligne. Il s'agit entre autres de Google Scholar (www.scholar.google.fr), de ScienceDirect (www.sciencedirect.com), de Scopus (<https://www.scopus.com>), et également de African Journals Online qui contient la littérature africaine (HOUNDONUGBO *et al.*, 2020 ; HOUEVO DAÏ *et al.*, 2022). Afin de documenter de manière critique les nombreux aspects liés aux stratégies nutritionnelles de réduction des émissions de méthane entérique, la recherche documentaire a été conduite toute période confondue. Toutefois ce domaine de recherches connaît ces dernières années un engouement inédit (BEAUCHEMIN *et al.*, 2022), si bien que l'essentiel des sources utilisées dans la présente revue ont été publiées durant la dernière décennie. Les publications scientifiques ont été collectées en utilisant les mots et groupes de mots clés suivants : "Stratégies nutritionnelles" ; "Réduction des émissions de méthane entérique" ; "Zone tropicale".

Les résultats de la recherche ont été examinés pour toutes les bases de données en utilisant les titres, les résumés et les mots-clés des publications. Pour l'inclusion dans la revue, toutes les publications ont été passées au crible suivant les quatre étapes suivantes (HOUNDONUGBO *et al.*, 2020) : (1) vérification de la pertinence de la publication sur la base du titre ; (2) lecture des résumés pour

déterminer s'ils sont pertinents pour la revue ; (3) téléchargement et lecture de l'article complet lorsque la deuxième étape n'a pas fourni d'informations suffisantes pour justifier son inclusion dans la revue ; (4) récupération des publications qui répondaient aux critères d'inclusion de cette revue. A l'issue de ce processus, 87 sources au total ont été retenues, dont 62% publiées durant la dernière décennie. Elles ont été lues en détail pour résumer les informations et connaissances disponibles, en se basant sur le thème de recherche.

II. Mécanisme de production du méthane

II.1. Particularité anatomique et digestive des ruminants

Les ruminants sont dits polygastriques du fait que leur système digestif est composé de quatre (4) compartiments. Les trois premiers compartiments (rumen, réseau et feuillet) sont qualifiés de préestomacs et font suite à la caillette souvent qualifiée d'estomac vrai. Parmi ces compartiments, le rumen (ou panse) est le plus volumineux. Il présente les caractéristiques d'une cuve de fermentation de type chémostat. Les conditions ambiantes qui y règnent sont caractérisées par un milieu riche en eau, un pH neutre ou légèrement acide (de 6,4 à 7,0) qui est stabilisé par une sécrétion abondante de salive qui joue le rôle de tampon, une température également stable fixée aux alentours de 39 °C, une absence d'oxygène, un apport régulier de nutriments, une élimination continue des produits de la digestion et une purge régulière du contenu digestif vers l'intestin (JOUANY et THIVEND, 2008). L'environnement qui en résulte fait du rumen un écosystème propice à développement microbien. On y trouve une communauté microbienne extrêmement riche qui peut varier entre autres en fonction de l'espèce de ruminant, de son habitat et de son alimentation (ORTIZ-CHURA *et al.*, 2024). Par ordre d'importance numérique, on distingue (JOUANY et THIVEND, 2008 ; POPOVA *et al.*, 2011 ; ROQUES *et al.*, 2024) :

- des bactéries qui sont les microorganismes les plus nombreux avec une concentration pouvant atteindre 10^{11} cellules par ml de jus de rumen ;
- des protozoaires de l'ordre de 10^5 à 10^6 cellules par ml de jus de rumen ;
- des champignons compris entre 10^3 et 10^4 cellules par ml de jus de rumen ;
- des Archaea méthanogènes représentant 1 à 4 % de la biomasse microbienne ;

- une fraction de micro-organismes variée et peu étudiée (bactériophages, mycoplasmes, virus ...).

ORTIZ-CHURA *et al.* (2024), ont toutefois relevé que très peu d'informations sont actuellement disponibles sur la composition de la flore microbienne de certaines espèces telles que les caprins. C'est également le cas des animaux vivant dans certaines zones géographiques, notamment d'Afrique subsaharienne. Il en résulte, que ces animaux pourraient présenter des compositions de flore microbienne quelque peu différentes des proportions mentionnées précédemment.

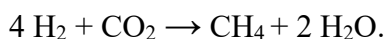
Néanmoins, c'est cette microflore qui, en agissant en synergie, joue un rôle prépondérant aussi bien dans la santé que dans la digestion des aliments ingérés par l'animal et l'impact environnemental de l'élevage des ruminants (POPOVA *et al.*, 2011 ; ORTIZ-CHURA *et al.*, 2024). Elle synthétise des enzymes de grande taille qui décompose puis fermentent les macromolécules complexes, composés majoritairement de polymères glucidiques et de protéines (JOUANY et THIVEND, 2008). Les différentes fermentations en jeu, réunies sous le terme « fermentation entérique », vont générer principalement :

- des Acides Gras Volatils (AGV), dont les principaux sont l'acétate, le propionate et le butyrate, qui sont absorbés à travers la paroi du rumen et constitueront plus de 70 % de l'énergie utilisée par l'animal ;
- de l'énergie sous forme d'Adénosine Tri Phosphate (ATP) qui va servir de source d'énergie pour les microorganismes ;
- une biomasse microbienne conséquente qui après passage dans l'intestin constitue, 50 à 90 % de la totalité des acides aminés absorbés ;
- des vitamines hydrosolubles ;
- une quantité importante de gaz sous forme de CH₄ et CO₂ ;
- etc.

II.2. Méthanogenèse ruminale

Le méthane en question est formé à partir de l'hydrogène (H₂), libéré par les microorganismes (bactéries, champignons et protozoaires) au cours des réactions fermentaires. En effet, ces réactions produisent des gaz (CO₂, N₂, H₂ et H₂S). Ces gaz sont en partie éliminés par la

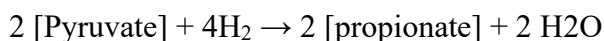
respiration et les éructations régulières. Toutefois, la fraction qui est dissoute s'accumule dans le contenu ruminal, c'est le cas de l'hydrogène qui constitue l'élément clé de la méthanogenèse (MORGAVI *et al.*, 2010). En effet, pour que les réactions fermentaires se poursuivent, l'hydrogène ainsi produit doit progressivement être éliminé, car son accumulation provoque un ralentissement de l'activité des microbes impliqués dans la fermentation (BOIS, 2019), compromettant ainsi le processus de la digestion dans son ensemble. C'est à ce niveau qu'interviennent les Archaea méthanogènes qui utilisent le H₂ pour réduire le CO₂ en CH₄, selon la réaction suivante :



Il existe cependant d'autres voies possibles d'utilisation du H₂, mais elles sont minoritaires et de moindre efficacité (FIGURE)

Il s'agit :

- de la synthèse de propionate qui mobilise 2H₂ par mole de propionate formée contre 4H₂ par mole de CH₄ synthétisée.



- de l'acétogenèse, qui produit de l'acétate à partir de CH₄ et CO₂ grâce à des bactéries acétogènes. Elle ne mobilise que 2H₂ par mole de CO₂ suivant la réaction ci-dessous :



Elle ne mobilise que 2H₂ par mole de CO₂ et en outre a été mis en évidence plutôt dans le gros intestin du ruminant, n'intervenant qu'à faible échelle au niveau du rumen (JOUANY *et al.*, 1995).

- de la réduction des nitrates, des sulfates, ainsi que la saturation des acides gras insaturés, considérée comme mineures au niveau du rumen.
- les fermentations lactique et alcoolique qui présentent peu d'intérêt au niveau de la production énergétique et sont normalement peu actives dans le rumen

De toutes les voies métaboliques présentées, la méthanogenèse s'avère être la principale voie métabolique naturelle, pour l'élimination de l'hydrogène ruminale (ROQUES *et al.*, 2024). CZERKAWSKI (1986) estimait que 48 % du pool total d'H₂ étaient utilisés par les Archaea

méthanogènes. C'est donc une voie métabolique indispensable à la l'élimination nécessaire de l'hydrogène métabolique du rumen (JOUANY et THIVEND, 2008)

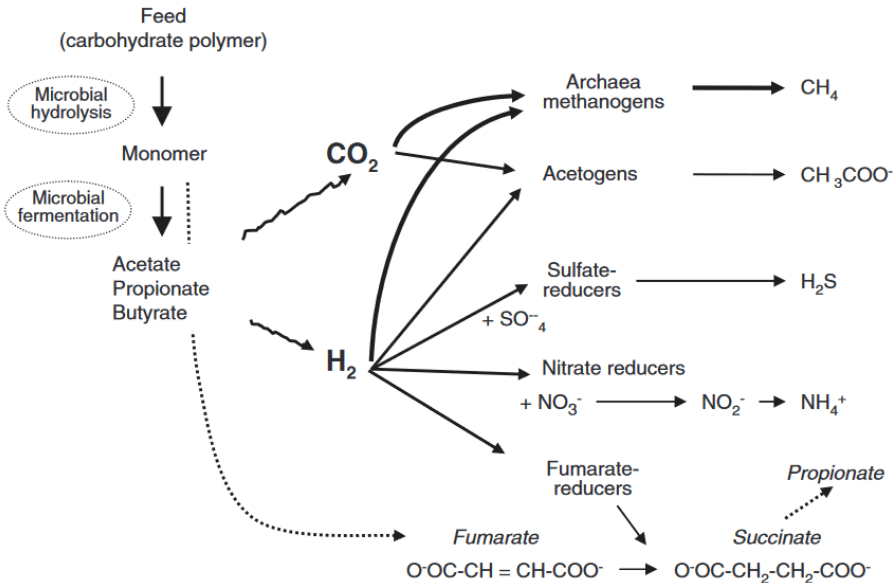


Figure 1 : Fermentation microbienne et des voies de réduction du H_2 dans le rumen

III. Stratégies de mitigation des émissions de méthane

La vitalité de la recherche sur la mitigation du méthane donne lieu à une génération continue de connaissance autour de la thématique. De nombreuses stratégies éprouvées ou en cours de finalisation, de même que des pistes prometteuses sont documentées. ARNDT *et al.*, (2022) ont recensé 98 stratégies d'atténuation décrites dans 430 revues et ont réparti ces stratégies dans trois (3) grandes catégories à savoir la Gestion des animaux et des aliments, la formulation des régimes alimentaires et la manipulation du rumen.

Il faut noter que ces différentes stratégies de réduction des émissions peuvent être évaluées en fonction de la production totale de CH_4 (émissions absolues, g/j), du rendement en CH_4 (g/kg de Matière Sèche Ingérée (MSI) ou de l'intensité en CH_4 (g/kg de viande, de lait ou de laine produits) (BEAUCHEMIN *et al.*, 2022). Il convient donc de toujours prendre en compte l'unité de mesure, car il peut y arriver pour une même stratégie que les émissions de méthane diminuent

lorsqu'elles sont exprimées par une unité de mesure, mais augmente quand on considère une unité différente.

Parmi les nombreuses stratégies existantes, celles relatives à l'alimentation (composition du régime alimentaire, qualité des aliments, etc.) occupent une place particulière (ROQUES et *al.*, 2024), du fait de l'interaction qui existe entre la méthanogenèse, les aliments et les processus digestifs (BLAXTER et CLAPPERTON, 1965 ; FU et *al.*, 2020). En outre, ces stratégies sont les plus accessibles à court terme (simplicité et coût) et pourraient réduire jusqu'à 70 % des émissions de méthane suivant la stratégie (TSETEN et *al.*, 2022)

Les stratégies alimentaires agissent sur la méthanogenèse soit en modifiant la production de substrats utilisés par les méthanogènes soit en affectant les méthanogènes eux-mêmes, ou les deux simultanément (POPOVA et *al.*, 2011 ; ROQUES et *al.*, 2024).

III.1. Amélioration de la qualité du fourrage

La production de méthane est fonction de la composition et l'activité de la microflore du rumen, elles-mêmes principalement influencées par le régime alimentaire des animaux (BOIS, 2019 ; FU et *al.*, 2020). Étant donné que les fourrages constituent l'aliment principal chez les ruminants, sa qualité influe sur la production de méthane entérique (EUGENE et *al.*, 2021 ; MORSHEDY, 2025). SHIBATA et TERADA (2010) ont souligné que les animaux nourris avec du fourrage de mauvaise qualité, riche en fibres, produisaient une proportion élevée d'acétate induisant une plus grande production de méthane. De plus, ces fourrages séjournent plus longtemps dans le rumen, ce qui favorise une augmentation de la production de méthane. Par contre, lorsque les animaux sont nourris avec des fourrages de meilleure qualité, plus digestes, le niveau d'ingestion augmente. Ce qui réduit le temps de séjour occasionnant moins de fermentation et une diminution du méthane produit par kg de matière sèche ingérée (JOUANY et THIVEND, 2008 ; ROQUES et *al.*, 2024).

Pour améliorer la qualité des fourrages, il faut agir sur les principaux déterminants de la qualité du fourrage qui sont selon EUGENE et *al.* (2021), la composition botanique et le stade phénologique. Ainsi par les options d'amélioration possible, la composition chimique du fourrage étant liée à son stade de maturité, une attention particulière doit porter sur cet aspect. En effet, les jeunes fourrages sont de meilleure qualité, car ils contiennent plus d'hydrates de carbone et moins de fibres et

lignine (EUGENE et *al.*, 2021). Leur digestibilité et le taux de passage sont donc plus élevés, permettant en plus de la baisse des processus fermentaires dans le rumen, une orientation vers le propionate (JOUANY et THIVEND, 2008 ; TSETEN et *al.*, 2022). Dans ce sens, les travaux de RAMIN et HUHTANEN (2013) ont mentionné une réduction des émissions pouvant atteindre 30 % entre de jeunes fourrages et ceux matures.

Dans la pratique, les fourrages sont surtout exploités après leur maturité quand la biomasse est la plus importante, mais que la valeur nutritive est plus basse. L'incorporation des résidus de cultures, qui ont généralement une valeur alimentaire supérieure à celle du pâturage naturel surtout en saison sèche, permet d'améliorer la qualité du fourrage ingérée. Cette amélioration permet de réduire significativement les émissions de méthane. En effet, GBENOU et *al.* (2024a), ont montré que l'incorporation de résidus de cultures, les fanes de niébé en occurrence, à une ration constituée de pâturage naturel pouvait réduire de près de 20 % les émissions de méthane entérique.

L'amélioration de la qualité des fourrages et entre autres des légumineuses, peut aussi se faire par l'introduction d'espèces à faible potentiel méthanogène. HATEW (2015) a révélé que les légumineuses produisaient en général 15 à 20 % moins de méthane (g CH₄/kg MSI) que les graminées. Dans la même dynamique, LEON et *al.* (2025) qui ont travaillé sur graminées tropicales ont montré que la supplémentation à l'aide de légumineuse induisait une baisse de 17 % des émissions de méthane entérique. En effet, les légumineuses ont une meilleure digestibilité, un taux de passage du rumen plus élevé et sont riches en protéines d'où une augmentation des taux d'ammoniac nécessaire à la synthèse microbienne. Elles entraînent une modification des proportions d'AGV produits et une réduction de la méthanogenèse (BOIS, 2019 ; LAWAL, 2023). En outre, les légumineuses contiennent fréquemment des métabolites secondaires tels les tanins et saponines qui ont un effet reconnu sur la réduction des émissions de méthane (LEON et *al.*, 2025).

Certaines espèces graminéennes ont également montré un potentiel méthanogène intéressant. En effet, les travaux de DU TOIT et *al.* (2018), ont permis d'identifier un certain nombre d'espèces parmi lesquelles *Andropogon gayanus*, *Panicum maximum*, *Eragrostis curvula*, etc. qui pourrait être privilégié dans le choix des cultures fourragères et même dans la restauration et l'amélioration des parcours

naturelles. Ce potentiel de réduction serait lié à la composition des fourrages, notamment à la nature des glucides. La digestion des fourrages riches en glucides non structuraux favorise la production de propionate, d'où la réduction de la disponibilité d'hydrogène pour la méthanogenèse. Par contre, les fourrages riches en glucides structuraux entraînent une plus grande production d'acétate, générant ainsi plus d'hydrogène pour la méthanogenèse (RIDLA *et al.*, 2025). Par ailleurs, au sein des glucides structuraux, la cellulose produit trois fois plus de CH₄ que l'hémicellulose (MOE et TYRRELL 1979).

Les différents types de traitements, le mode de stockage de même que et toutes stratégies efficaces pour améliorer leur valeur nutritionnelle pourrait également réduire les émissions de GES en plus d'améliorer la productivité du bétail (ADESOGAN *et al.*, 2025 ; ZANON *et al.*, 2025). En effet, les traitements (physiques, chimiques ou biologiques), en facilitant la décomposition de la biomasse lignocellulosique, contribuent à la réduction des émissions de méthane (SARNKLONG *et al.*, 2010). En guise d'exemple, les travaux de PRESSMAN *et al.* (2018) menés en Éthiopie et au Kenya sur l'impact du traitement de la paille à l'urée, ont permis de réduire respectivement de 6 % et 9 % les émissions de méthane entérique. L'augmentation de la productivité observée a permis dans le même temps de réduire respectivement de 27,4 % et 31,4 % l'intensité des émissions de méthane dans ces 2 pays. En outre, les traitements physiques du fourrage, en aboutissant à la réduction de la taille des particules, diminuent le temps de séjour dans le rumen, contribuant également à la réduction des émissions de méthane. Les travaux de JOHNSON et WARD (1996) ont en effet montré une diminution de 20 à 40 % de la production de méthane pour les fourrages broyés ou granulés comparativement aux fourrages non transformés. En ce qui concerne le mode de stockage, la conservation du fourrage sous forme d'ensilage a montré une production de méthane inférieure aux fourrages séchés (SHINGFIELD *et al.*, 2002 ; BEAUCHEMIN *et al.*, 2008). En effet, une part majeure du processus de digestion du fourrage se déroule grâce aux réactions fermentaires au cours de l'ensilage. Ce qui rend l'ensilage plus facile à digérer dans le rumen et les nutriments plus facilement assimilables (ZANON *et al.*, 2025). Ces modifications jouent également un rôle dans l'accélération du transit digestif, réduisant le rendement de la méthanogenèse. Aussi, la meilleure efficacité énergétique de la digestion post-ruminale favorise une productivité accrue et donc une réduction de la production de méthane par unité de production (GBENOU *et al.*, 2024b).

III.2. Valorisation des métabolites secondaires : les tanins

Les ressources alimentaires tropicales contiennent en quantité significative plusieurs métabolites secondaires, qui interviennent dans les interactions entre la plante et l'environnement extérieur (MOLIRABOTERO *et al.*, 2024). Longtemps considérés comme toxiques pour les animaux, certains de ces composés ont montré des propriétés anti méthanogènes intéressantes, sans pour autant nuire à la santé et à la productivité des animaux (MATABANE *et al.*, 2024). Il s'agit entre autres des tanins, des saponines, des flavonoïdes et des huiles essentielles (KU-VERA *et al.*, 2020). De plus, contrairement aux additifs de synthèse, ces composés sont naturels. Ils font donc l'objet d'un réel engouement en raison des préoccupations croissantes de l'opinion publique sur les impacts négatifs de produits chimiques synthétiques (BATURE *et al.*, 2024).

Parmi ces métabolites secondaires, les tanins présentent de nombreux avantages lorsqu'ils sont adéquatement utilisés (GARBA et FIRINCIOGLU, 2023). Ce sont des substances naturelles polyphénoliques, hydrosolubles, de masse moléculaire comprise entre 500 et 3000 daltons (Da), participant au mécanisme de défense de la plante contre les agressions externes (RIRA, 2019). Ils sont très particulièrement répandus dans les légumineuses arbustives fourragères en régions tropicales où ils sont localisés dans divers organes avec les plus fortes concentrations retrouvées dans les fruits, les fleurs et les feuilles. On distingue plusieurs catégories de tanins dont les principaux sont ceux hydrolysables et ceux condensés (KU-VERA *et al.*, 2020). Les tanins hydrolysables, constitués de molécules phénoliques simples, sont facilement hydrolysables. Lors de la digestion dans le rumen, ils peuvent libérer des substances nocives qui, consommées en grandes quantités, exposent les animaux à des risques sanitaires. Les tanins condensés, quant à eux, ont un poids moléculaire plus élevé et sont non hydrolysables. C'est sous cette forme que les tanins sont généralement rencontrés et ils présentent plusieurs avantages nutritionnels (GARBA et FIRINCIOGLU, 2023).

Longtemps considérés uniquement comme facteur antinutritionnel quand les niveaux d'ingestion sont élevés (> 4 % MS), les tanins lorsqu'ils sont utilisés à dose adéquate présentent de nombreux effets positifs dont une alternative solide pour la réduction des émissions de méthane entérique (BATTELLI *et al.*, 2023 ; CREMONESI *et al.*, 2025). Dès lors, ils font l'objet de nombreuses investigations,

particulièrement ceux condensés en raison de la toxicité associée aux produits de dégradations des tanins hydrolysables (NAUMANN *et al.*, 2017). Toutefois, le mécanisme d'action précis n'est pas entièrement défini et est toujours en cours d'investigation (BATTELLI *et al.*, 2023). Mais pour l'heure, grâce aux nombreuses recherches, plusieurs pistes ont été identifiées. Ainsi, PEPETA *et al.* (2024) indiquent que le mécanisme d'action des tanins peut en partie être expliqué par leur action directe du fait de leur toxicité sur les colonies de protozoaires et d'archées. Ils notent également leur aptitude à impacter négativement la dégradation des fibres dans le rumen grâce à leur capacité de se lier aux polysaccharides et en augmentant la production de propionate.

Tableau I : Effets des tannins sur l'écologie du rumen et mécanismes potentiels

Effet sur l'écologie du rumen	Mécanisme potentiel	Références Bibliographiques
Bactériostatique dans le rumen	Inhiber les activités des microbes du rumen	MCSWEENEY <i>et al.</i> , 2001 ; JAYANEGARA <i>et al.</i> , 2015
Réduction de la digestion des fibres dans le rumen.	Réduit la méthanogénèse en diminuant le niveau de H ₂ disponible nécessaire à la production de méthane	PATRA, 2012 ; BODAS <i>et al.</i> , 2012 ; PEPETA <i>et al.</i> , 2024
Augmentation de l'abondance des bactéries productrices de butyrate et d'autres bactéries probiotiques, telles que <i>Bifidobacterium</i> et <i>Lactobacillus</i> amino.	Diminution de la production d'acides gras à chaîne courte comme l'acétate et réduction de la production de méthane	BUCCIONI <i>et al.</i> , 2015 ; CORREA <i>et al.</i> , 2020
Suppression des communautés d'archées et augmentation des populations totales de bactéries du rumen	Diminution de la production de méthane	FAGUNDES <i>et al.</i> , 2020
Suppression directe de la croissance des méthanogènes	Réduction de la production de CH ₄	ABOAGYE <i>et al.</i> , 2019
Diminution de la digestion de la matière organique dans le rumen	Réduire la méthanogénèse	GRAINGER <i>et al.</i> , 2009
Diminution de l'abondance relative des protozoaires, des méthanogènes et de <i>Ruminococcus albus</i> .	Réduire la méthanogénèse en inhibant la croissance des méthanogènes et des protozoaires	YANG <i>et al.</i> , 2017 ; VOLPE <i>et al.</i> , 2018 ; WITZIG <i>et al.</i> , 2018, PEPETA <i>et al.</i> , 2024

Source : Adapté de BATURE *et al.* (2024)

Ainsi, dans les pays tropicaux, particulièrement ceux à faibles revenus, les tanins, utilisés sous forme d'extraits ou de fragment de plante incorporé dans la ration, constituent une solution économique viable pour la réduction des émissions de méthane. Les niveaux de réduction atteints varient considérablement entre les études (de 2 % à 67 %) suivant la source, la nature, la structure chimique, la dose employée entre autres (RIRA, 2019, BEKELE et al., 2025). Parmi les plantes régulièrement citées, *Acacia sp*, *Ziziphus sp*, *Gliricidia sepium* et *Leucena leucocephala* ont démontré des potentialités intéressantes. En effet, BEKELE et al. (2025) ont montré que l'incorporation de feuilles d'*Acacia Nilotica* et de *Ziziphus spina-christi* dans l'alimentation des ovins *Menz* en Ethiopie induisait une baisse des émissions de méthane pouvant atteindre 67 %. ZAIN et al. (2020) ont obtenu une réduction de 50 % de la production de méthane à partir de rations complémentées à 30 % de *Gliricidia sepium*. Quant à HARRISON et al. (2015), MOLINA et al. (2016), ils ont montré une réduction de 20 % des émissions de méthane avec une supplémentation de *Leucena Leucocephala*.

Il faut cependant noter qu'il existe certaines contraintes à l'utilisation des tanins. Parmi les limites à long terme, ORTIZ-CHURA et al. (2024) ont révélé que dans les systèmes d'élevage extensif, les races indigènes pouvaient développer des mécanismes microbiens adaptatifs pour neutraliser les effets des métabolites secondaires, entraînant une tolérance progressive. On peut donc supposer qu'à long terme, l'incorporation de ces composés pourrait aboutir à des résultats mitigés en matière de réduction des émissions de méthane entérique. En outre, il y a également la question de l'accès même des tanins. En effet l'émondage des ligneux pour l'alimentation des animaux doit être géré durablement pour éviter la surexploitation et la dégradation du couvert végétal. Il faudrait promouvoir une sensibilisation sur les bonnes pratiques de récolte, les campagnes de reboisement et l'entretien, de même que les banques fourragères dans l'optique de sécuriser la production de biomasse ligneuse.

III.3. Taux d'incorporation des concentrés

L'augmentation de la proportion d'aliments concentrés (surtout riche en amidon) dans les régimes alimentaires des animaux est une stratégie largement répandue qui influe sur les émissions de méthane entérique (RIRA, 2019 ; LILEIKIS et al., 2023). Cette modification de la composition de la ration entraînerait une modification des substrats, de

la flore microbienne et des orientations des voies fermentaires (JOUANY et THIVEND, 2008 ; HENDERSON *et al.*, 2015). En effet, les aliments concentrés riches en hydrates de carbone rapidement fermentescibles orientent les voies de fermentation vers la production de propionate (HRISTOV, 2024). Ces hydrates de carbone rapidement fermentescibles entraînent en outre une baisse du pH du liquide du rumen inhibant la croissance des Archaea méthanogènes qui sont sensibles aux changements modérés, en particulier aux basses valeurs de pH (ROQUES *et al.*, 2024 ; WANG, 2025). La croissance des protozoaires est aussi inhibée réduisant ainsi leur rôle de protection des Archaea méthanogènes contre la toxicité de l'oxygène (JANSSEN, 2010) et réduisant leur approvisionnement en hydrogène (NEWBOLD *et al.*, 2015). La modification de ration entraîne également une baisse de la population des bactéries cellulolytiques au profit de celle amylolytiques qui produisent du propionate au lieu de l'acétate (LILEIKIS *et al.*, 2023). POPOVA *et al.* (2011) relevait que pour les rations contenant uniquement du fourrage, l'acétate représentait en moyenne 70 % des Acides Gras Volatils produits, le propionate près de 20 % et le butyrate environ 10 %. Pour les rations contenant plus de céréales par contre, on note une augmentation de la proportion molaire du propionate (qui peut monter jusqu'à 30 %) et une baisse des proportions de butyrate et d'acétate. Or les voies de fermentation ont des bilans hydrogène différents. L'acétate et le butyrate libèrent des atomes d'hydrogène lors de leur production au contraire de la synthèse du propionate qui en consomme, réduisant ainsi la méthanogenèse (MOSS *et al.*, 2000 ; BOIS, 2019). Par ailleurs, l'augmentation de la proportion de concentré entraîne une réduction de la proportion d'hydrates de carbone structurels et une augmentation de la vitesse de transit du contenu du rumen vers l'intestin (JANSSEN 2010). Davantage de nutriments qui étaient auparavant digérés dans le rumen vont être digérés dans l'intestin, d'où une baisse de l'activité digestive du rumen et une baisse de la méthanogenèse (LILEIKIS *et al.*, 2023 citant plusieurs auteurs). Un autre aspect porte sur le niveau d'énergie de la ration. L'augmentation du niveau de concentré se traduit par des rations plus énergétiques, d'où une meilleure efficacité énergétique et une réduction des pertes sous forme d'émissions de méthane (TANGJITWATTANACHAI *et al.*, 2015). Cette efficacité énergétique accrue est également favorisée par le fait que la digestion des concentrés induit une plus faible production de chaleur que les fourrages (VERA *et al.*, 2014). JOHNSON *et al.*, (2003) ont en effet évalué pour les concentrés, l'augmentation de chaleur entre 15 % à 25 % de l'Énergie

Métabolisable (EM), tandis que pour les fourrages, elle se situe entre 35 % et 60 % de l'EM. L'augmentation du taux de concentré est donc un atout, surtout en climat tropical où les températures sont élevées et que le maintien de l'homéothermie est un réel challenge. L'accroissement du taux de concentré dans la ration a donc été reconnu comme étant une stratégie efficace de réduction des émissions de méthane par plusieurs auteurs, dont ARNDT *et al.* (2022) et HRISTOV (2024). En guise d'exemple, les travaux de OLIJHOEK *et al.* (2018) ont mis en exergue une réduction des émissions de méthane à hauteur de 27,2 % chez les vaches Holstein en faisant passer le rapport Fourrage / Concentré de 68 : 32 à 39 : 61. De plus, les concentrés fournissant plus de nutriments que les fourrages grossiers, l'accroissement du taux de concentré se traduit en général par une augmentation de la productivité, d'où une baisse de l'intensité des émissions de méthane (HRISTOV, 2024).

Cependant, cette stratégie de mitigation peut, dans certaines situations, présenter un certain nombre d'inconvénients qui convient de prendre en compte pour bénéficier du plein potentiel d'atténuation des émissions. En guise d'exemple, un niveau trop élevé de concentré dans la ration augmente les risques d'acidoses subaiguë ou aiguë, d'abcès du foie et d'autres troubles digestifs (BEAUCHEMIN *et al.*, 2022 ; WANG, 2025). Le recours à plus de concentrés représente un coût financier important et pourrait également créer une compétition entre les ruminants et les humains pour les aliments tels que le maïs et le soja (RIRA, 2019). De plus, la production de ces concentrés peut constituer une source supplémentaire d'émissions de GES à travers le CO₂ dégagé par les usines de production d'aliment et d'engrais, le transport des aliments, etc., de même que les Oxyde nitrates libérés lors de l'utilisation des engrais pour la production de la matière première nécessaire à la production des aliments concentrés. Pour lever ces différentes contraintes, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour déterminer en fonction de nos races et systèmes d'élevages, les niveaux d'incorporation adéquats pour garantir un bon état de santé des animaux, une rentabilité des exploitations et un bilan carbone favorable.

III.4. Utilisation du Biochar

Le biochar est un matériau à haute teneur de carbone, issu de la pyrolyse partielle de matières organiques en condition limitée en oxygène (LEHMANN et JOSEPH, 2009). Initialement utilisées comme amendement pour améliorer les propriétés du sol, de récentes études

tendent à le désigner comme compléments d'aliments pouvant réduire les émissions de méthane entérique sans compromettre la productivité (MARTINEZ-FERNANDEZ et al., 2024). En effet, de par ses propriétés, quand il est incorporé aux rations des ruminants, il joue un rôle significatif sur les paramètres de fermentation du rumen, la production de méthane, la digestibilité des nutriments. Parmi les mécanismes impliqués, il ressort entre autres l'absorption de gaz et l'altération des populations microbiennes ou de leurs habitats. A travers la littérature, plusieurs travaux ont contribué à classer le biochar comme une stratégie efficace dans la lutte pour la réduction des émissions de méthane entérique (Tableau 2). En effet, à travers des travaux réalisés, l'usage du biochar a conduit à des baisses d'émissions de méthane entérique pouvant allant jusqu'à 23,5 % en condition *in vitro* (SALEEM et al., 2018) et jusqu'à 39 % en condition *in vivo* (HANG et al., 2019). Toutefois, plusieurs facteurs peuvent affecter et voir annuler l'impact de l'usage du biochar sur les émissions de méthane. Il s'agit entre autres du type de biochars adaptés, des doses et les méthodes de distribution, de la composition du régime alimentaire, des différentes rations fourrage-concentré, des espèces de plantes fourragères (KONKOVA ET HALMEMIES-BEAUCHET-FILLEAU, 2024 ; MARTINEZ-FERNANDEZ et al., 2024). Dans l'optique de maximiser l'impact de l'incorporation du biochar dans nos conditions d'élevage, il reste nécessaire d'explorer toutes ces interactions avec rations et pratiques alimentaires en vigueur dans les systèmes d'élevage subsahariens.

Tableau II : Effet du biochar sur la fermentation ruminale et la production de méthane

Références Bibliographiques	Espèces	Condition expérimental	Quantité distribué (% du PV ou g)	Réduction méthane
LENG et al., 2012	Bovins	In Vivo	0,6	22 %
WINDERS et al., 2019	Bovins	In Vivo	0 ; 0,8 ; 3	9 à 18 %
HANG et al., 2019	Caprins	In Vivo	0 ; 0,5 ; 1 ; 1,3	15 à 39 %
MARTINEZ-FERNANDEZ et al., 2024	Bovins	In Vivo	50 g, 100 g, 200 g	8,8 à 12,9 %
DUNG et al., 2022	Bovins	In Vitro	1 ; 3 ; 5 ; 7	10 à 17 %
CABEZA et al., 2018	Bovins	In Vitro	1 ; 10	1 à 6 %
SALEEM et al., 2018	Bovins	In Vitro	0,5 ; 1 ; 2	25 %
HANSEN et al., 2012	Bovins	In Vitro	9	20 %
LENG et al., 2012	Bovins	In Vitro	0,5 ; 1 ; 2 ; 3,5	10 à 13 %

Source : KONKOVA et HALMEMIES-BEAUCHET-FILLEAU (2024)

III.5. Incorporation d'insectes dans les rations alimentaires

Les insectes comestibles constituent une source alternative durable en vogue en alimentation animale. En effet, avec une composition riche en protéines (32 - 74 %), en acides aminés (8-39 %), en minéraux (jusqu'à 278,3 mg par 100 g de poids sec) et en graisses saines (6 - 21 %), les insectes présentent un profil nutritionnel comparable à celle d'autres sources traditionnelles telles que le soja, et d'autres légumineuses (AHMED et *al.*, 2021). Ces dernières années, les travaux sur l'effet de leur utilisation sur la réduction des émissions de méthane a été mis en lumière (MORSHEDY, 2025). Parmi les insectes les plus prometteurs, *Gryllus bimaculatus* et *Hermetia illucens* ont fait l'objet de nombreux travaux avec des résultats probants. Les travaux de AHMED et *al.* (2021) ont relevé une réduction de 16 % des émissions de méthane entérique en substituant 25 % du soja par la farine de *Gryllus bimaculatus*. Dans la même lancée, PHESATCHA et *al.* (2023) en utilisant le même insecte en substitution totale à la farine de soja, ont montré une baisse significative des émissions de méthane. Quant à RENNA et *al.* (2022), sur la base d'une étude in vitro portant sur huit farines d'insectes en comparaison à des protéines végétales conventionnelles, ils ont mis en exergue une baisse significative des émissions de méthane.

Parmi les facteurs explicatifs, la baisse des émissions de méthane serait liée à la composition des insectes, en particulier les fortes concentrations en lipides (sous forme d'acides gras insaturés), en chitine (AHMED et *al.*, 2021 ; RENNA et *al.*, 2022). En effet, il est bien établi que l'ajout de matières grasses à l'alimentation des ruminants réduit la production de méthane. Le mode d'action mis en lumière peut être lié à la réduction de la fermentation de la matière organique, diminuant ainsi le H₂ disponible pour les méthanogènes et/ou un effet toxique direct sur les archées et les protozoaires méthanogènes. Pour ce qui est de la chitine, il a été démontré qu'elle avait la capacité d'orienter la fermentation du rumen vers moins d'acétate et plus de propionate, tout en réduisant la production de méthane et la population de méthanogènes (AHMED et *al.*, 2021).

III.6. Utilisation du fourrage hydroponique

Afin de faire face au déficit fourrager, surtout en saison sèche, de nombreuses initiatives sont explorées pour soutenir le développement de l'élevage des ruminants. La production de fourrage hydroponique, une technique de culture de plantes sans sol, est de plus en plus promue

comme alternative à la production de fourrage conventionnelle OKOLI et al. (2023). La technique consiste à faire germer des graines (maïs, blé, sorgho, etc.) avec peu d'eau, dans un délai de 6 à 7 jours, et à récolter les plantules atteignant 30 à 50 cm en guise de fourrage (RAHMAN et al., 2019). La pratique tire profit des modifications chimiques et structurelles induites par la germination des grains pour augmenter significativement la qualité et la quantité des nutriments. On peut produire tout au long de l'année, du fourrage vert, sur de petites superficies, avec des besoins en eau et en main-d'œuvre réduit. Ainsi, à partir d'un kg de grain, on peut produire 4 à 10 kg de fourrage vert, avec un besoin en eau de 1,5 à 2 litres d'eau pour produire 1 kg de fourrage vert, contre 73 à 160 litres d'eau nécessaires pour produire 1 kg de fourrage vert dans le du système conventionnel (NAVQI et al., 2015).

L'apport de fourrage hydroponique aux ruminants s'avère être une option viable pour la réduction des émissions de méthane entérique. En effet, les récents travaux de DHLAMINI (2024) ont mis en évidence que les émissions de méthane sont négativement corrélées à l'augmentation de la supplémentation en fourrage hydroponique. Ces travaux indiquent, en guise d'exemple, une réduction de 20 % en incorporant du fourrage hydroponique dans la ration des ovins. Plusieurs facteurs tendent à justifier cet état de fait. Dans un premier temps, les transformations induites par la germination accroissent la digestibilité des nutriments qui sont dès lors plus facilement utilisables pour la flore microbienne (OKOLI et al., 2023). La digestibilité est pourtant positivement corrélée à une baisse des émissions de méthane. Dans un second temps, les fourrages hydroponiques ont une quantité adéquate de vitamines et d'enzymes, qui agit comme catalyseur bioactif pour améliorer le métabolisme des fibres et l'efficacité d'utilisation digestive de l'énergie (AL-SAADY et AL-ZUBIADI, 2016). Ce qui pourrait contribuer à réduire les pertes énergétiques sous forme de méthane. Par ailleurs, la consommation de fourrage hydroponique induit une baisse du pH ruminal, avec une baisse des populations de microorganismes méthanogènes et une orientation des voies fermentaires vers la production de propionate.

III.7. Utilisation de rations équilibrées

Parmi les nombreuses stratégies nutritionnelles de réduction des émissions de méthane, l'usage des rations équilibré apparaît être l'une des approches les plus prometteuses, particulièrement pour dans les

systèmes d'élevage tropicaux (HRISTOV *et al.*, 2013 ; GARG et SHERASIA, 2015, ADESOGAN *et al.*, 2025). En effet, la connaissance des besoins nutritionnels permet de formuler des rations à même fournir les nutriments nécessaires au bon fonctionnement de l'organisme et plus particulièrement de la flore microbienne. Ce qui permet d'améliorer l'efficacité de la conversion alimentaire et de limiter les pertes sous forme d'émissions de méthane entérique (GARG et SHERASIA, 2015 ; KANNAN *et al.*, 2011). LENG *et al.* (1993) ont rapporté que des animaux soumis à des régimes de faible qualité perdaient environ 15 à 18 % de l'énergie digestible (ED) sous forme de méthane, tandis que ceux recevant des régimes équilibrés réduisaient leurs émissions de méthane d'environ 7 %.

Par ailleurs, l'équilibrage des besoins nutritionnels favorise l'orientation des processus fermentaires du rumen vers la production de propionate et de protéines microbiennes, contribuant ainsi à la réduction des émissions de CH₄ entériques (LENG, 1991 ; VALLI, 2020). En plus de cela, on assiste également à la réduction de l'intensité du méthane. En effet, les rations lorsqu'elles sont adéquates, équilibrées aussi bien pour l'énergie, les protéines et les minéraux, permettent un accroissement significatif de la productivité, d'où la baisse de l'intensité de méthane. MCALLISTER *et al.* (1996) ont en effet souligné que la disponibilité des nutriments, notamment pour la flore du rumen constituait un facteur déterminant de production. En guise d'exemple, les travaux de GARG *et al.* (2013) ont montré que l'équilibrage des rations augmentait la production laitière de 2 à 14 %, tout en réduisant les émissions entériques de CH₄ de 15 à 20 %, ce qui est associé à une réduction de 10,3 % de l'énergie brute perdue par le CH₄. Par contre, lorsque les rations ne sont pas en adéquation avec les besoins des animaux, BLUMMEL (2000) révèle que la majeure partie des matières organiques produit après fermentation, de l'acétate et du butyrate, entraînant ainsi une production plus importante de CH₄.

Dans un autre sens, la production de méthane entérique est fortement corrélée à la quantité d'aliment ingérée (BORGES *et al.*, 2023). En effet, cette corrélation a été mise en exergue depuis la première moitié du 20e siècle (LAKAMP *et al.*, 2022). Estimée chez les ovins à $r^2 = 0,83$ par MOLANO et CLARCK (2008), une augmentation des quantités ingérées est associée à une augmentation des émissions de méthane. L'équilibrage des rations permet donc de prévenir les gaspillages. En contrôlant les quantités ingérées, on peut réduire substantiellement les émissions de méthane tout en boostant la

productivité avec les économies réalisées sur l'alimentation, qui en rappel mobilise dans la majeure partie des cas, plus de 50 % des coûts de production. Les travaux de SINGH et *al.* (2024) sur les vaches laitières en Inde, ont révélé que 71 % d'entre elles avaient un apport excessif en Protéines Brutes (PB) et en Energie Métabolisable (EM) par rapport à leurs besoins de production.

Malgré les efforts des producteurs dans l'optique de l'optimisation l'alimentation, l'accès à des informations et à des outils fiables pour une formulation précise des rations reste un défi (BALEHEGN et *al.*, 2020). Dans de nombreux pays, notamment au Burkina Faso, les estimations des besoins nutritionnels sont basées sur des valeurs établies pour les races et des conditions d'élevage occidentales, qui peuvent ne pas refléter avec précision les besoins des races tropicales et subtropicales indigènes (OUERMI et *al.*, 2023). La définition de besoins nutritionnels propres aux races locales tropicales peut jouer un rôle important dans la réduction des émissions de méthane entérique et la lutte contre les changements climatiques.

IV. Analyse comparée des stratégies nutritionnelles de mitigation des émissions de méthane

Au vu de son empreinte environnementale, l'élevage est souvent pointé du doigt (MORGAVI et *al.*, 2010) et il y a dans certaines sphères, un sentiment grandissant en faveur d'une transition des régimes alimentaires vers des aliments de source végétale. Il est donc important de rappeler aux yeux du monde le rôle haut combien important que joue l'élevage. Avec une contribution évaluée à 17 % des calories et 33 % des protéines, les aliments d'origine animale fournissent à l'homme des nutriments essentiels qui sont difficiles à obtenir à partir d'aliments d'origine végétale (FAO, 2023). En outre, le rôle de l'élevage ne se limite pas qu'à l'aspect purement alimentaire. Il joue un rôle socioéconomique majeur, surtout dans les pays en voie de développement où le développement est indissociable de l'élevage. Il s'avère donc plus judicieux d'envisager des solutions d'atténuation de l'impact négatif de l'élevage plutôt qu'un abandon.

Les stratégies nutritionnelles discutées dans la présente synthèse offrent toutes des potentialités réelles de réduction du méthane entérique en zone tropicale. Ces potentialités varient en fonction des stratégies et pour chaque stratégie, on relève une hétérogénéité relativement élevée dans l'efficacité rapportée. L'utilisation des tanins présente la plage

d'efficacité la plus large (2-67 % de réduction), reflétant une forte dépendance aux conditions d'utilisation : source botanique, nature, structure chimique et dose. Cette variabilité constitue aussi bien une opportunité en termes de potentiel élevé, mais également un risque tant les résultats peuvent être imprévisibles. À l'inverse, l'amélioration de la qualité des fourrages offre une efficacité plus faible mais une meilleure homogénéité dans les résultats (15-30 % de réduction), avec des mécanismes d'action bien documentés. Ce qui laisse présager une meilleure reproductibilité. Quant aux stratégies les plus novatrices telles que l'incorporation du biochar, des insectes, ou du fourrage hydroponique, elles affichent des niveaux de réductions intermédiaires (15-25 % de réduction en moyenne), mais reposent sur des bases expérimentales limitées, majoritairement issues d'essais in vitro.

Du point de vue de l'accessibilité, l'amélioration de la qualité des fourrages de même que l'utilisation de tanins semblent être les mieux indiquées pour les systèmes tropicaux extensifs. En effet, les ressources fourragères et ligneuses sont la plupart du temps localement disponibles et ces stratégies ne nécessitent pas d'infrastructures sophistiquées. L'augmentation du taux de concentrés aussi bien que les stratégies novatrices demeurent des options viables pour les systèmes semi-intensifs ou intensifs disposant de ressources financières et de technicité plus élevées.

Il ressort également que chacune des stratégies passées en revue présente des contraintes (d'ordre zootechnique, économique ou écologique) qui conditionnent leur mise en œuvre effective. Pour ce qui est de l'amélioration de la qualité du fourrage, la disponibilité des fourrages à un stade phénologique optimal est limitée car dans la pratique, les fourrages sont majoritairement exploités à maturité pour maximiser la biomasse. De même, les traitements (physique, chimique et biologique) nécessitent des intrants, du matériel et un savoir-faire parfois peu accessibles aux petits éleveurs. C'est également le cas des stratégies novatrices qui requièrent en plus des ressources financières pour les infrastructures, une technicité encore peu vulgarisée et maîtrisée par les éleveurs. En ce qui concerne les tanins, parmi les principaux risques relevés, on note la baisse de digestibilité et d'ingestion à forte dose, la variabilité des effets, la possibilité d'adaptation microbienne à long terme et la surexploitation des ligneux. Quant à l'usage des concentrés, les coûts élevés, la forte compétition entre consommation humaine et animale sur certains produits tels que les céréales, les risques d'acidose et de troubles métaboliques en cas

d'excès, et les émissions GES liées à la fabrication des provendes réduisent l'efficacité de la pratique. Il en est de même pour l'absence de références spécifiques sur les besoins nutritionnels des races locales, qui réduit l'efficience dans la formulation des rations alimentaires.

Ainsi, pour impacter durablement les émissions de méthane entérique en zone tropicale, il apparaît fort probable qu'aucune des stratégies prises individuellement ne constitue la solution. Une meilleure alternative serait une approche plus holistique, qui prône une combinaison des stratégies en prenant en compte la disponibilité locale, l'impact sur la productivité des animaux ainsi que la durabilité du système.

Conclusion

La synthèse bibliographique met en lumière les stratégies, les limites et les perspectives de recherche sur la réduction du méthane entérique chez les ruminants dans les zones tropicales. Parmi les solutions passées en revue, l'amélioration de la qualité des fourrages et l'exploitation des métabolites secondaires locaux, notamment les tanins condensés, offrent des potentiels de réduction substantiels et économiquement viables, atteignant jusqu'à 67 % selon certaines sources. Cependant, plusieurs contraintes dont les suivantes entre autres freinent la mise à l'échelle des stratégies proposées : le coût des concentrés ; la compétition qui existe pour certains aliments entre l'alimentation humaine et animale ; la durabilité de l'exploitation des ressources ligneuses riches en métabolites secondaires ; le risque d'adaptation microbienne à long terme ; le déficit de connaissances sur la microflore des ruminants tropicaux. Ainsi, les priorités de recherche doivent prendre en compte ces limites pour réellement impacter les émissions de méthane entériques. Par conséquent, il faut axer les recherches futures tant sur la caractérisation génomique du microbiote ruminal local et l'étude des synergies entre stratégies complémentaires, que sur l'impact économique sur les producteurs.

Conflit d'intérêt

Tous les auteurs déclarent aucun conflit d'intérêt

Contributions des auteurs

Conception, désignation, méthodologie : W. S. O. OUERMI ; B. I. GNANDA ; V. M. C. BOUGOUMA-YAMEOGO. Collecte des données : W. S. O. OUERMI ; E. SODRE ; Analyse des données,

rédaction du projet initial : W. S. O. OUERMI ; E. SODRE ; Révision finale et édition : W. S. O. OUERMI ; B. I. GNANDA ; E. SODRE ; V. M. C. BOUGOUMA-YAMEOGO.

Références Bibliographiques

ADESOGAN A. T., GEBREMIKAEL M. B., VARIJAKSHAPANICKER P., VYAS D., 2025. Climate-smart approaches for enhancing livestock productivity, human nutrition, and livelihoods in low- and middle-income countries. *Animal Production Science*, **65**, AN24215. <https://doi.org/10.1071/AN24215>

AHMED E., FUKUMA N., HANADA M., NISHIDA T., 2021. Insects as novel ruminant feed and a potential mitigation strategy for methane emissions. *Animals*, **11**(9): 2648. <https://doi.org/10.3390/ani11092648>.

AL-SAADIM. J.et AL-ZUBIADI I. A. H., 2016. Effects of substitution barley by 10 %, 30 % of sprouted barley on rumen characters, digestibility and feed efficiency in diet of Awassi male lambs. *International Journal of Science and Research*. **5** (4): 2228-2233

ARNDT C., HRISTOV A. N., PRICE W. J., MCCLELLAND S. C., PELAEZ A. M., CUEVA S. F., OH J., DIJKSTRA J., BANNINK A., BAYAT A. R., CROMPTON L. A., EUGÈNE M. A., ENAHORO D., KEBREAB E., KREUZER M., MCGEE M., MARTIN C., NEWBOLD C. J., REYNOLDS C. K., SCHWARM A., SHINGFIELD K. J., VENEMAN J. B., YÁÑEZ-RUIZ D. R., 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 U S A*; **119**(20): e2111294119 <https://doi.org/10.1073/pnas.2111294119>.

BALEHEGN M., DUNCAN A., TOLERA A., AYANTUNDE A. A., ISSA S., KARIMOU M., ZAMPALIGRÉ N., KIEMA A., GNANDA I. B., VARIJAKSHAPANICKER P., KEBREAB E., DUBEUX J., BOOTE K., MINTA, M., FEYISSA F., ADESOGAN A. T., 2020. Improving adoption of technologies and interventions for increasing supply of quality livestock feed in low- and middle- income countries. *Global Food Security*. **26**:100372. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100372>.

BATTELLI M., COLOMBINI S., PARMA P., GALASSI G., CROVETTO G. M., SPANGHERO M., PRAVETTONI D., ZANZANI S. A., MANFREDI M. T., RAPETTI L., 2023. In vitro effects of

different levels of quebracho and chestnut tannins on rumen methane production, fermentation parameters, and microbiota. *Frontiers, Veterinary Sciences*. **10**:1178288.

<https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1178288>

BATURE I., XIAOHU W., DING X., 2024. The roles of phytogetic feed additives, trees, shrubs, and forages on mitigating ruminant methane emission. *Frontiers Veterinary Sciences*. **11**:1475322.

<https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1475322>

BEAUCHEMIN K. A., UNGERFELD E. M., ABDALLA A. L., ALVAREZ C., ARNDT C., BECQUET P., BENCHAAAR C., BERNDT A., MAURICIO R. M., MCALLISTER T. A., OYHANTÇABAL W., SALAMI S. A., SHALLOO L., SUN Y., TRICARICO J., UWIZEYE A., DE CAMILLIS C., BERNOUX M., ROBINSON T., KEBREAB E., 2022. Invited review: Current enteric methane mitigation options, *Journal of Dairy Science*, **105**(12):9297-9326,

<https://doi.org/10.3168/jds.2022-22091>.

BEKELE W., ZEGEYE A., SIMACHEW A., KOBAYASHI N. 2025. Effect of best bet methane abatement feed on feed intake, digestibility, live weight change, and methane emission in local Menz breed sheep in Ethiopia. *Frontiers, Veterinary Sciences* **12** :1538758.

<https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1538758>

BLANFORT V., DEMENOIS J., HRABANSKI M., 2025. L'agriculture et les systèmes alimentaires du monde face au changement climatique. Enjeux pour les Suds, Versailles, éditions Quæ, 416 p. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4009-8>

BLAXTER, K. L., et CLAPPERTON, J. L., 1965. Prediction of the amount of methane produced by ruminants. *British Journal of nutrition*, **19**(1), 511-522.

BLUMMEL M., 2000. Predicting the partitioning of fermentation products by combined *in vitro* gas volume and true substrate degradability measurements: opportunities and limitations. *In*: Proceedings of the British Society of Animal Science on gas production: fermentation kinetics for feed evaluation and to assess microbial activity, Midlothian EH260RZ, United Kindom, pp 48–58

BOIS B., 2019. Dynamiques des émissions de méthane entérique et du métabolisme énergétique chez le Zébu gobra dans les systèmes pastoraux du Ferlo (Nord Sénégal). Thèse de Doctorat 3e cycle en

Sciences agricoles. Montpellier SupAgro, France, 197p, <https://theses.hal.science/tel-04095470v1>

BORGES A. L. D. C. C., E SILVA R. R., FERREIRA A. L., LAGE H. F., VIVENZA P. A. D., DE CARVALHO P. H. A., DA FONSECA M. P., GONÇALVES L. C., RODRIGUEZ N. M., 2023. Respiriometry and nutritional requirements of zebu and crossbred dairy cattle at different levels of feeding and physiological status. In « BR-CORTE: nutrient requirements of Zebu and Crossbred cattle », VALADARES FILHO S. C., SARAIVA D. T., BENEDETI P. B., SILVA F. A. S., CHIZZOTTI M. L., editores. -- 4th ed. -- Visconde de Rio Branco, MG: Suprema, 2023. Brésil, p. 159-172. <http://dx.doi.org/10.26626/978-85-8179-194-4.2023.C007.p.159-172>

CREMONESI P., SEVERGNINI M., BATTELLI M., MONISTERO V., PENATI M., GAZZONIS A. L., CASTIGLIONI B., RAPETTI L., MANFREDI M. T., ADDIS M. F., 2025. Reducing enteric methane emission in dairy goats: impact of dietary inclusions of quebracho tannin extract on ruminal microbiota. *Frontiers, Microbiology*, **16**:1595924. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1595924>

CZERKAWSKI J.W., 1986. An introduction to rumen studies. Pergamon Press (Ed.), Oxford, England, 236p.

DHLAMINI, T. C., 2024. Growth performance and methane emission of lambs supplemented with hydroponic barley fodder. Master of Science in Agriculture in the College of Agriculture and Environmental Sciences, Department of Agriculture and Animal Health, University of South Africa, South Africa

du TOIT C. J. L., VAN NIEKERK W. A., MEISSNER H. H., ERASMUS L. J., MOREY L., 2018. Nutrient composition and in vitro methane production of sub-tropical grass species in transitional rangeland of South Africa. *The Rangeland Journal*, **40**(1), 1. <https://doi.org/10.1071/RJ17057>

EUGÈNE M., KLUMPP K., SAUVANT D., 2021. Methane mitigating options with forages fed to ruminants. *Grass and Forage Science*, **76**(2): 196-204.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO), 2023. Pathways towards lower emissions- A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems. Rome, Italy, 77p. <https://doi.org/10.4060/cc9020en>

FU Z., XU X., ZHANG J., ZHANG L., 2020. Effect of different feeding methods on rumen microbes in growing Chinese Tan sheep. *Revista Brasileira de Zootecnia*, **49** : e20190258. <https://doi.org/10.37496/rbz4920190258>

GARBA A. M. et FIRINCIOGLU S. Y., 2023. Role of Encapsulation Nutrients for Improvement of Ruminant Performance and Ruminant Derived-Products. *Eurasian Journal of Agricultural Research*, **7(2)**: 109-126.

GARG M. R., SHERASIA P. L., 2015. Ration balancing: A practical approach for reducing methanogenesis in tropical feeding systems. In *Climate change impact on livestock: adaptation and mitigation* (pp. 285-301). New Delhi: Springer India. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2265-1_18

GARG M. R., SHERASIA P. L., BHANDERI B. M., PHONDBA B. T., SHELKE S. K., MAKKAR H. P. S., 2013. Effects of feeding nutritionally balanced rations on animal productivity, feed conversion efficiency, feed nitrogen use efficiency, rumen microbial protein supply, parasitic load, immunity and enteric methane emissions of milking animals under field conditions, *Animal Feed Science and Technology*, **179** (1-4): 24-35, <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.11.005>.

GBENOU G. X., ASSOUMA M. H., BASTIANELLI D., KIENDREBEOGO T., BONNAL L., ZAMPALIGRE N., BOIS B., SANOGO S., SIB O., MARTIN C., DOSSA L. H., 2024a. Supplementing zebu cattle with crop co-products helps to reduce enteric emissions in West Africa. *Archives of Animal Nutrition*. **78(2)** :125-141. <https://doi.org/10.1080/1745039X.2024.2356326>.

GBENOU G. X., ASSOUMA M. H., ZAMPALIGRE N., MARTIN C., BASTIANELLI D., BONNAL L., KIENDREBEOGO T., SIB O., BOIS B., SANOGO S., DOSSA L. H., 2024b. Mesurer, prédire et réduire les émissions de méthane entérique en Afrique subsaharienne. *INRAE Productions Animales*, **37** (1): 7648, <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2024.37.1.7648>

GERBER, P. J., STEINFELD, H., HENDERSON, B., MOTTET, A., OPIO, C., DIJKMAN, J., FALCUCCI, A., TEMPIO, G., 2014. Lutter contre le changement climatique grâce à l'élevage – Une évaluation des émissions et des opportunités d'atténuation au niveau mondial.

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Rome

JOHNSON D.E., WARD G.M., 1996. Estimates of animal methane emissions. *Environmental Monitoring and Assessment*, **42**:133–141. <https://doi.org/10.1007/BF00394046>

HANG L. T., PRESTON T. R., BA N. X., DUNG D. V., 2019. Effect of biochar on growth for and methane emissions of goats fed fresh cassava foliage. *Livestock Research Rural Development*, **31**:67. <http://www.lrrd.org/lrrd31/5/thuyhang31067.html>

HARRISON. M. T., MCSWEENEY C., TOMKINS N. W., ECKARD R. J., 2015. Improving greenhouse gas emissions intensities of subtropical and tropical beef farming systems using *Leucaena leucocephala*. *Agricultural System*. **136**:138–146. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.03.003>

HATEW B., 2015. Low emission feed: opportunities to mitigate enteric methane production of dairy cows, PhD thesis, Graduate School of Wageningen Institute of Animal Science, Wageningen University, Wageningen, NL, 228 p

HENDERSON G., COX F., GANESH S., JONKER A., YOUNG W., GLOBAL RUMEN CENSUS COLLABORATORS, JANSSEN P. H., 2015. Rumen microbial community composition varies with diet and host, but a core microbiome is found across a wide geographical range. *Scientific Reports* **5**. <https://doi.org/10.1038/srep14567>

HOUÉVO DAÏ E., HOUNDONUGBO J. S. H., IDOHOU R., ASSOGBADJO A. E., GLELE KAKAÏ R., 2022. Current knowledge and future prospects on the declining *Uvaria chamae* P. Beauv. in sub-Saharan Africa: A global systematic review for its sustainable management. *South African Journal of Botany*. **151**: 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.09.040>

HOUNDONUGBO J., KASSA B., MENSAH S., SALAKO V., GLELE KAKAÏ R., ASSOGBADJO A., 2020. A global systematic review on conservation and domestication of *Parkia biglobosa* (Jacq.) R. Br. ex G. Don, an indigenous fruit tree species in Sub-Sahara African traditional parklands: current knowledge and future directions. *Genetic Resources and Crop Evolution*. **67**: 1051–1066 <https://doi.org/10.1007/s10722-020-00892-w>

HRISTOV A. N., 2024. Invited review: Advances in nutrition and feed additives to mitigate enteric methane emissions, *Journal of Dairy Science*, **107**(7): 4129-4146, <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24440>.

HRISTOV A. N., OH J., FIRKINS J. L., DIJKSTRA J., KEBREAB E., WAGHORN G., MAKKAR H. P. S., ADESOGAN A. T., YANG W., LEE C., GERBER P. J., HENDERSON B., TRICARICO J. M., 2013. Special topics–Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *Journal of Animal Sciences*. **91** :5045–5069. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6583>

JANSSEN P. H., 2010. Influence of hydrogen on rumen methane formation and fermentation balances through microbial growth kinetics and fermentation thermodynamics. *Animal Feed Science Technology*; **160**:1-22. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2010.07.002>

JOHNSON D. E., FERRELL C. L., JENKINS T. G., 2003. The history of energetic efficiency research: Where have we been and where are we? *Journal of Animal Science*, **81**: 27-38.

JOUANY J. P., BROUDISCOU L., PRINS R. A., KOMISARCZUK-BONY S., 1995. Métabolisme et nutrition de la population microbienne du rumen. In *Nutrition des Ruminants Domestiques* (JARRIGE R., RUCKEBUSH Y., DEMARQUILLY C., FARCE M. H., JOURNET M. Eds), INRA Editions, Versailles, France, pp.349-381. <https://hal.inrae.fr/hal-02846751>

JOUANY J. ET THIVEND P., 2008. La production de méthane d'origine digestive chez les ruminants et son impact sur le réchauffement climatique. *Management & Avenir*, n° 20(6), 259-274. <https://doi.org/10.3917/mav.020.0259>.

KANNAN A., GARG M. R., MAHESH KUMAR B. V., 2011. Effect of ration balancing on milk production, microbial protein synthesis and methane emission in crossbred cows under field conditions in Chittoor district of Andhra Pradesh. *Indian Journal of Animal Nutrition*, **28** (2):117-123.

KLEIN H. D., RIPPSTEIN G., HUGUENIN J., TOUTAIN B., GUERIN H., 2014. Les cultures fourragères. Editions Quae. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-2169-1>

KONKOVA T., HALMEMIES-BEAUCHET-FILLEAU A., 2024. Effect of spruce (*Picea abies*) biochar on ruminal dry matter digestibility and methane production in vitro.

KU-VERA J. C., CASTELÁN-ORTEGA O. A., GALINDO-MALDONADO F. A., ARANGO J., CHIRINDA N., JIMÉNEZ-OCAMPO R., SOLORIO-SÁNCHEZ F. J., 2020. Strategies for enteric methane mitigation in cattle fed tropical forages. *Animal*, **14**(S3): s453-s463. <https://doi.org/10.1017/S1751731120001780>

LAKAMP A. D., WEABER R. L., BORMANN J. M., ROLF M. M., 2022. Relationships between enteric methane production and economically important traits in beef cattle. *Livestock Science*, **265**: 105102. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.105102>

LAWAL M., 2023. Mitigation of Enteric Methane Emission in Africa as a Climate-Smart Livestock Strategy. *FARA Research Report*. Vol 7(65): 827-843. <https://doi.org/10.59101/fr072365>

LEHMANN J. et JOSEPH S., 2009. Biochar for environmental management: an introduction. In: LEHMANN J., et JOSEPH S., editors, *Biochar for environmental management, science and technology*. Earthscan, London: p. 1–12

LENG R. A., 1993. Quantitative ruminant nutrition – A green house science. *Australian Journal of Agricultural Research*, **44** (3) :363 – 380. <https://doi.org/10.1071/AR9930363>

LENG R. A., 1991. Improving ruminant production and reducing methane emissions from ruminants by strategic supplementation. Environmental Protection Agency /400/1-91/004, Washington, DC

LEON E., HUGHES M., DALEY O., 2025. Kudzu [*Pueraria phaseoloides*] supplementation offsets maturity effects on tropical forage degradability and lowers enteric methane emissions. *Discover Agriculture*, **3**, 84. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00248-x>

LILEIKIS T., NAINIENĖ R., BLIZNIKAS S., UCHOCKIS V., 2023. Dietary Ruminant Enteric Methane Mitigation Strategies: Current Findings, Potential Risks and Applicability. *Animals*, **13**, 2586. <https://doi.org/10.3390/ani13162586>

MARTINEZ-FERNANDEZ G., KINLEY R., SMITH W. J., SIMINGTON J., JOSEPH S. D., TAHERY S., ... & VERCOE, P., 2024. Effect of fit-for-purpose biochars on rumen fermentation, microbial communities and methane production in cattle. *Frontiers in*

Microbiology, **15**, 1463817.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1463817>

MATABANE D. M., NG'AMBI J. W., MABELEBELE M., GUNYA B., MANYELO T. G., 2024. The Role of Secondary Metabolites on Methane Reduction in Small Ruminants. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1005461>

MCALLISTER A. T., OKINE E. K., MATHISON G. W., 1996. Dietary, environmental and microbiological aspects of methane production in ruminants. *Canadian Journal of Animal Science*, **76**:231-243. <https://doi.org/10.4141/CJAS96-035>

MOE P. W. et TYRRELL H. F., 1979. Methane production in dairy cows. *Journal of Dairy Science* **62**(10) :1583 -1586

MOLANO G. et CLARK H., 2008. The effect of level of intake and forage quality on methane production by sheep. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **48**: 219–222. <https://doi.org/10.1071/EA07253>

MORGAVI D. P., FORANO E., MARTIN C., NEWBOLD C. J., 2010. Microbial ecosystem and methanogenesis in ruminants. *Animal*, **4**(7): 1024-1036. <https://doi.org/10.1017/S1751731110000546>

MOLINA I., ANGARITA E., MAYORGA O., CHARÁ J., BARAHONA-ROSALES R., 2016. Effect of *Leucaena leucocephala* on methane production of *Lucerna* heifers fed a diet based on *Cynodon plectostachyus*. *Livestock Sciences*. **185**: 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2016.01.009>

MOLINA-BOTERO, I.C., VILLEGAS, D.M., MONTOYA, A., MAZABEL O., BASTIDAS M., RUDEN A., GAVIRIA H., PELÁEZ J. D., CHARÁ J., MURGUEITIO E., MOORBY J., ARANGO J., 2024. Effect of a silvopastoral system with *Leucaena diversifolia* on enteric methane emissions, animal performance, and meat fatty acid profile of beef steers. *Agroforestry Systems*, **98**: 1967–1984. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01046-y>

MORSHEDY, S. A., 2025. Modern nutritional approaches to mitigating enteric methane emissions in ruminants: A review. *Animal Reports*, **1**: 41-59. <https://doi.org/10.64636/ar.10>

MOSS A. R., JOUANY J. P., NEWBOLD J., 2000. Methane production by ruminants: its contribution to global warming. *Annales de zootechnie*, **49** (3): 231-253. <https://hal.science/hal-00889894v1>

NAUMANN H. D., TEDESCHI L. O., ZELLER W. E., HUNTLEY N. F., 2017. The role of condensed tannins in ruminant animal production: advances, limitations and future directions. *Revista Brasileira de Zootecnia*. **46**: 929–949. <https://doi.org/10.1590/s1806-92902017001200009>

NAQVI S. M. K., KUMAR D., KALYAN D., SEJIAN V., 2015. Climate change and water availability for livestock farming. *Indian Journal of Animal Science*. **1** : 81-96. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2265-1_6

NEWBOLD C. J., DE LA FUENTE G., BELANCHE A., RAMOS-MORALES E., MCEWAN N. R., 2015. The Role of Ciliate Protozoa in the Rumen. *Frontiers. Microbiology*. **6**:1313. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01313>

OKOLI I. C., ETUK U. N. E., MARTINS U., GIWA A. L., AZODO N. L., ACHONWA C. C., ETUK E. B., 2023. Potentials of Hydroponic Fodder System as a Sustainable Animal Feed Production Alternative in Nigeria: A Review. *Nigerian Journal of Animal Production*, **50**(4): 45-69. <https://doi.org/10.51791/njap.v50i4.3866>

OLIHOEK D., LØVENDAHL P., LASSEN J., HELLWING A., HÖGLUND J., WEISBJERG M., NOEL S., MCLEAN F., HØJBERG O., LUND P., 2018. Methane production, rumen fermentation, and diet digestibility of Holstein and Jersey dairy cows being divergent in residual feed intake and fed at 2 forage-to-concentrate ratios. *Journal of dairy Science*, **101**(11): 9926-9940. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14278>.

ORTIZ-CHURA A., POPOVA M., MORGAVI D. P., 2024. Ruminant microbiome data are skewed and unFAIR, undermining their usefulness for sustainable production improvement. *Animal microbiome* **6** : 61. <https://doi.org/10.1186/s42523-024-00348-x>

OUERMI, W. S. O., GNANDA, B. I., DELMA, B. J., ZAMPALIGRE, N., & BOUGOUMA-YAMEOGO, V. M. C., 2023. Les besoins énergétiques des caprins : méthodes courantes de détermination et applicabilité des résultats aux caprins de race locale du Burkina Faso. *Sciences Naturelles Et Appliquées*, **41**(2(1): 11–32.

PHESATCHA B., PHESATCHA K., MATRA M., WANAPAT M., 2023. Cricket (*Gryllus bimaculatus*) meal pellets as a protein supplement to improve feed efficiency, ruminal fermentation and

microbial protein synthesis in Thai native beef cattle. *Animal bioscience*, **36**(9): 1384. <https://doi.org/10.5713/ab.23.0107>.

PEPETA B. N., HASSEN A., TEFAMARIAM E. H., 2024. Quantifying the Impact of Different Dietary Rumen Modulating Strategies on Enteric Methane Emission and Productivity in Ruminant Livestock: A Meta-Analysis. *Animals*, **14**(5): 763. <https://doi.org/10.3390/ani14050763>

POPOVA M., MORGAVI D., DOREAU M., MARTIN C., 2011. Production de méthane et interactions microbiennes dans le rumen. *INRAE Productions Animales*, **24**(5), 447–460. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2011.24.5.3277>

PRESSMAN E., SCHAEFER J. M., KEBREAB E., 2018. Mitigation of enteric methane emissions from dairy cattle in East Africa through urea treatment of crop residue feeds. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2018, pp. GC51K-0929).

RAHMAN M. M., JAHAN S., AMANULLAH S. M., KABIR M. A., TAMANNA R. J., HASSAN M. M., DEB G. K., HOSSAIN S. M. J., 2019. Study on comparative biomass yield, nutritional quality and economics of hydroponic sprout produced from different grains; *Bangladesh Journal of Livestock Research*, **26** (1&2): 51 - 60. <https://doi.org/10.3329/bjlr.v26i1-2.49937>

RAMIN M. et HUHTANEN P., 2013. Development of equations for predicting methane emissions from ruminants. *Journal of dairy Science*, **96**(4): 2476-2493. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-6095>.

RENNA M., COPPA M., LUSSIANA C., LE MORVAN A., GASCO L., MAXIN G., 2022. Full-fat insect meals in ruminant nutrition: in vitro rumen fermentation characteristics and lipid biohydrogenation. *Journal of animal science and biotechnology*, **13**(1): 138. <https://doi.org/10.1186/s40104-022-00792-2>

RIDLA M., JAYANEGARA A., NAHROWI N., 2025. Evaluation of silage quality, rumen fermentation dynamics, degradability, and methane emissions of total mixed rations formulated from agricultural by-products: an in vitro analysis. *Journal of Animal and Feed Sciences*. <https://doi.org/10.22358/jafs/200863/2025>

RIRA M., 2019. Les tanins hydrolysables et condensés : une piste pour la réduction de la production du méthane entérique par les ruminants en milieu tropical. Thèse de Doctorat 3e cycle en Agronomie. Université

Clermont Auvergne, France, 232p, <https://theses.hal.science/tel-02861917v1>

SALEEM A. M., RIBEIROJR G. O., YANG W. Z., RAN T., BEAUCHEMIN K. A., MCGEOUGH E. J., OMINSKI K. H., OKINE E. K., MCALLISTER T. A., 2018. Effect of engineered biocarbon on rumen fermentation, microbial protein synthesis, and methane production in an artificial rumen (RUSITEC) fed a high forage diet. *Journal of Animal Sciences* **96**(8): 3121–3130. <https://doi.org/10.1093/jas/sky204>.

SARNKLONG C., CONE J. W., PELLIKAAN W., HENDRIKS W. H., 2010. Utilization of rice straw and different treatments to improve its feed value for ruminants: a review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, **23** (5): 680 -692. <https://doi.org/10.5713/ajas.2010.80619>

SHIBATA M. et TERADA F., 2010. Factors affecting methane production and mitigation in ruminants. *Animal Science Journal*, **81**:2-10. <https://doi.org/10.1111/j.1740-0929.2009.00687.x>.

SHINGFIELD K.J., JAAKKOLA S., HUHTANEN P., 2002. Effect of forage conservation method, concentrate level and propylene glycol on diet digestibility, rumen fermentation, blood metabolite concentrations and nutrient utilisation of dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, **97**(1):1-21. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(02\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(02)00006-8)

SINGH N., GUPTA R., AWASTHI A., KUMAR V., 2024. Feeding balanced ration for improving dairy cattle productivity: a review. *Journal of Biology and Nature*, **16**(1): 26-31.

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*, **12**(1), 321-343. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-021022-024931>

TANGJITWATTANACHAI N., PHAOWPHAISAL I., OTSUKA M., SOMMART K., 2015. Enteric methane emission, energetic efficiency and energy requirements for the maintenance of beef cattle in the tropics. *Japan Agricultural Research Quarterly*; **49**:399–407.

TSETEN T., SANJORJO R. A., KWON M., KIM S. W., 2022. Strategies to mitigate enteric methane emissions from ruminant animals. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, **32**(3), 269. <https://doi.org/10.4014/jmb.2202.02019>

VALLI C., 2020. Mitigating enteric methane emission from livestock through farmer-friendly practices. In “Global climate change and environmental policy”. (Eds VENKATRAMANAN V., SHAH S., PRASAD R.) pp. 257–273. (Springer: Singapore) https://doi.org/10.1007/978-3-030-45443-9_13

VERA J. K., RUIZ A., MAYO R., AYALA A. J., AGUILAR C. F., SOLORIO F. J., 2014. Manipulation of the energy metabolism of ruminants in the tropics: options for improving meat and milk production and quality. *Cuban Journal of Agricultural Science*, **48**(1): <https://www.researchgate.net/publication/281557219>

WANG Y., CHEN K., YUAN S., LIU J., GUO J., GUO Y., 2025. Research Progress on Methane Emission Reduction Strategies for Dairy Cows. *Dairy*, **6**(5): 48. <https://doi.org/10.3390/dairy6050048>

ZAIN M., PUTRI E., RUSMANA W, ERPOMENA MAKMUR M., 2020. Effects of supplementing *Gliricidia sepium* on ration based ammoniated rice straw in ruminant feed to decrease methane gas production and to improve nutrient digestibility (in-vitro). *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. **10**(2):724–729. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.2.11242>

ZANON T., HÖRTENHUBER S., FICHTER G., PERATONER G., ZOLLITSCH W., GATTERER M., & GAULY M., 2025. Effect of management system and dietary seasonal variability on environmental efficiency and human net food supply of mountain dairy farming systems. *Journal of dairy science*, **108**(1): 597-610. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25438>