



HAL
open science

Adapted methods to quantify, predict and mitigate enteric methane in sub-Saharan Africa

Gérard Xavier Gbenou, Mohamed Habibou Assouma, Nouhoun Zampaligre, Cécile Martin, Denis Bastianelli, Laurent Bonnal, Timbilfou Kiendrebeogo, Ollo Sib, Bérénice Bois, Souleymane Sanogo, et al.

► To cite this version:

Gérard Xavier Gbenou, Mohamed Habibou Assouma, Nouhoun Zampaligre, Cécile Martin, Denis Bastianelli, et al.. Adapted methods to quantify, predict and mitigate enteric methane in sub-Saharan Africa. INRAE Productions Animales, 2024, 37 (1), pp.7648. 10.20870/productions-animales.2024.37.1.7648 . hal-04578917

HAL Id: hal-04578917

<https://hal.inrae.fr/hal-04578917>

Submitted on 17 May 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Mesurer, prédire et réduire les émissions de méthane entérique en Afrique subsaharienne

Gérard Xavier GBENOU^{1,3,5}, Mohamed Habibou ASSOUMA^{2,3,4}, Nouhoun ZAMPALIGRE¹, Cécile MARTIN⁶, Denis BASTIANELLI³, Laurent BONNAL³, Timbilfou KIENDREBEOGO¹, Ollo SIB^{2,3,4}, Bérénice BOIS³, Souleymane SANOGO⁴, Luc Hippolyte DOSSA⁵

¹Centre National de Recherche Scientifique et Technologique (CNRST), Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA), Station de Farako-Ba, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

²CIRAD, UMR SELMET, dP ASAP, Bobo Dioulasso, Burkina Faso

³SELMET, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France

⁴Centre International de Recherche-Développement sur l'Élevage en zone Subhumide (CIRDES), Bobo-Dioulasso, Burkina Faso

⁵Laboratoire des Sciences Animales (LaSA), Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, 526 Cotonou, Benin

⁶Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, UMR Herbivores, 63122, Saint-Genès-Champanelle, France

Courriel : habibou.assouma@cirad.fr

■ L'élevage de ruminants en Afrique subsaharienne est singulier par les milieux et ressources qu'il exploite et par des systèmes d'élevage aux effectifs parfois élevés mais souvent peu productifs. L'évaluation de son impact environnemental est toutefois complexe car les modèles classiquement utilisés ne sont pas adaptés aux animaux et aux modes d'élevage de cette région. Il est important d'apporter des connaissances objectives sur la production du méthane entérique, principal gaz à effet de serre de ces élevages.

Introduction

L'élevage de ruminants en Afrique subsaharienne (ASS) est pratiqué dans divers systèmes de production : systèmes mixtes agriculture-élevage, pastoraux, agropastoraux, intensifs des petits exploitants, et commerciaux intensifs de production de lait ou de viande (Vall *et al.*, 2014). Les races locales de ruminants sont favorisées dans ces systèmes en raison de leur capacité à s'adapter aux conditions climatiques, alimentaires et sanitaires en contexte tropical. L'alimentation des ruminants en ASS se base principalement sur une diversité de ressources fourragères : les fourrages naturels herbacés et ligneux (*Zornia*

glochidiata, *Pennisetum pedicellatum*, *Combretum glutinosum*, *Sclerocarya birrea*), les fourrages cultivés d'espèces herbacées et ligneuses (*Panicum maximum*, *Brachiaria ruziziensis*, *Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium*) et les coproduits agricoles (pailles, tourteaux, sons). Les gaz à effet de serre (GES) émis pendant la production de ressources alimentaires sont essentiellement le CO₂ et le N₂O (Gerber *et al.*, 2013) tandis que l'utilisation de ces ressources par l'animal est à l'origine d'émissions de méthane entérique (eCH₄) essentiellement, de CO₂, de CH₄ et de N₂O issus de la dégradation des déjections. Le secteur agricole (agriculture et élevage) de l'ASS contribue à 12 % des émissions mondiales de méthane (CH₄) dont 71 % de eCH₄

(Climatewatch, 2020). Selon la FAO (2023), l'élevage de ruminants dans cette région engendre une émission de eCH₄ élevée lorsqu'elle est rapportée à la quantité de produits, due à la faible efficacité alimentaire des animaux. Les intensités d'émissions de eCH₄ sont par exemple de 58 g/kg lait en Afrique contre 24 g/kg lait en Asie et 17 g/kg lait en Europe de l'Ouest (GIEC, 2019).

Les facteurs de variation de eCH₄ sont l'aliment (composition chimique, digestibilité), l'animal (niveau d'ingestion, espèce animale ou race, stade physiologique) et les conditions environnementales (Goopy *et al.*, 2016). Mais il y a peu d'informations sur la situation spécifique de l'élevage de l'ASS. En

effet, les études sur les émissions de eCH₄ dans cette région sont peu nombreuses, fragmentaires et imprécises. Pour élaborer les inventaires nationaux de eCH₄, les pays de l'Afrique de l'Ouest, à l'instar de nombreux pays au monde, ont utilisé les équations du niveau 2 du GIEC qui ne prennent pas en compte les spécificités des systèmes d'élevage que sont la saisonnalité de la qualité et de la quantité des ressources fourragères et les pratiques d'alimentation des éleveurs (Ndao *et al.*, 2020 ; Tongwane & Moeletsi, 2020). Les données obtenues doivent donc être améliorées par des mesures *in vivo* sur les animaux et des prédictions. Pour cela, il est nécessaire d'inventorier les méthodes adaptées et applicables aux systèmes d'élevage de l'ASS. Par ailleurs, il convient d'analyser les stratégies possibles de réduction des émissions dans les contextes d'ASS.

Dans cette synthèse nous avons distingué les systèmes d'élevage de ruminants en ASS en trois groupes selon les conditions d'élevage et donc des modalités possibles de mesure des GES. Il s'agit des systèmes d'élevage avec les animaux au pâturage (PAT), avec les animaux en bâtiment d'élevage chez l'éleveur (ELE) et le cas spécifique des animaux en station expérimentale (STA). Nous passerons en revue successivement 1) les techniques de mesure individuelle *in vivo* de eCH₄ et discuterons leur application à ces conditions d'élevage, 2) les possibilités de prédire ces émissions et 3) les stratégies potentielles de leur atténuation.

1. Techniques de mesure *in vivo* du méthane entérique

Les techniques de mesure *in vivo* du eCH₄ chez les ruminants sont nombreuses et ont fait l'objet d'un grand nombre de synthèses bibliographiques (Broucek, 2014). Dans cette partie, nous présenterons brièvement les techniques de mesure directe des flux de gaz à l'échelle individuelle pour discuter de leur application dans les conditions bien spécifiques (PAT, ELE et STA) des systèmes d'élevage de l'ASS.

■ 1.1. La chambre respiratoire

La chambre respiratoire (CR) est une enceinte dont toutes les entrées et sorties de gaz (flux et concentration) sont analysées. Son principe est de collecter tous les gaz émis par voies orale et rectale chez l'animal (Broucek, 2014). Elle est considérée comme la méthode de référence pour la mesure du eCH₄. Elle implique des compétences techniques élevées pour son utilisation, installation ou déplacement. Un contrôle de certains facteurs tels que le taux de récupération des gaz, les conditions environnementales (température, humidité relative), et le taux de ventilation est impératif (Mathot *et al.*, 2016). Son utilisation n'est absolument pas possible au PAT et en ELE excepté si les animaux sont déplacés en STA pour le temps des mesures. De plus, ce dispositif est très coûteux. Les facteurs cités peuvent plus facilement être contrôlés en STA. Cette technique est donc adaptée en STA pour des recherches aboutissant à des données d'une haute précision (Huhtanen *et al.*, 2019). L'intérêt des CR est de pouvoir réaliser des mesures en cinétique sur la journée. En ASS le coût élevé de la CR et les contraintes de son fonctionnement la limitent à des centres de recherche très bien équipés. En outre, les résultats produits sont très éloignés des conditions réelles d'élevage des animaux, et leur représentativité peut être remise en cause. Pour cette raison, en ASS, la CR ne pourrait servir qu'à étudier l'effet de facteurs liés à l'ingéré (quantité, composition), à l'animal (race, stade physiologique, âge) ou aux conditions climatiques si le système le permet. Dans cette région, Ali *et al.* (2019) l'ont utilisé en STA au Kenya pour étudier l'effet de la supplémentation avec des blocs uréo-mélassés pour réduire les émissions de eCH₄ de 93,1 à 85,3 g/jour chez les génisses holstein x boran. Dans ce même pays, Goopy *et al.* (2020) ont testé l'effet de la non-couverture des besoins d'entretien chez les taurillons boran et ont rapporté que les rations carencées augmentaient le eCH₄ produit par kg de matière sèche ingérée (MSI).

Face au confinement de l'animal qu'exige la CR, une autre technique simplifiée utilisant un principe similaire

a été développée pour contourner chacune de ces insuffisances. Il s'agit de la hotte ventilée (HV) (Suzuki *et al.*, 2007). La HV ne couvre que la tête de l'animal au lieu de son corps entier. Les mesures de gaz peuvent être générées pendant que les animaux ont accès à l'aliment et à l'eau (Goopy *et al.*, 2016). Contrairement à la CR, elle ne capture que les émissions de eCH₄ éructé et exclut la quantité émise sous forme de flatulence, mais elle restreint moins le comportement et les mouvements de l'animal. Elle n'est pas adaptée au PAT et à un grand nombre d'animaux. De même que la CR, le contrôle impératif des constantes la disqualifie pour des mesures en ELE, mais elle pourrait être utilisée en STA pour des recherches.

■ 1.2. Le système GreenFeed® (C-Lock)

Le principe du système GreenFeed® (GF, C-Lock Inc., Rapid City, SD, USA) est d'effectuer des mesures ponctuelles de eCH₄ (concentration et flux d'air) d'un animal lorsqu'il visite un distributeur automatique de concentrés (DAC) intégré au système (Hristov *et al.*, 2015). L'obtention d'une valeur quotidienne de eCH₄ est possible en moyennant les valeurs ponctuelles d'une vingtaine de visites de trois à cinq minutes chacune, étalées sur plusieurs jours et bien réparties dans la journée avec une représentativité de la cinétique d'ingestion (Manafiazar *et al.*, 2017). Le GF ne tient pas compte des émissions de eCH₄ provenant de la fermentation dans le gros intestin, mais il permet d'analyser simultanément les émissions de plusieurs animaux (jusqu'à une vingtaine) ayant accès au DAC (Münger *et al.*, 2018). Il est moins contraignant pour l'animal qu'une CR et demande moins d'équipements complexes et de technicité. Il est conçu pour pouvoir être utilisé aussi bien en ELE ou en STA qu'au PAT (Hristov *et al.*, 2015). Pour limiter les biais liés aux conditions extérieures, le GF est équipé d'un système qui tient compte des changements de la direction et de la vitesse du vent. Dans les études de Denninger *et al.* (2017) et de Coppa *et al.* (2021), le GF a été testé respectivement au PAT et en ELE. Le besoin de surveillance de l'équipement et d'intrants limite toutefois

Figure 1. Taurillon zébu peulh soudanais au GreenFeed® pour la mesure du méthane entérique (Cirdes, Burkina Faso).



l'utilisation au PAT à des situations proches de réseaux de communication et panneaux solaires pour l'autonomie électrique. Le GF est installé pour des mesures de eCH₄ en STA (figure 1) par le Cirdes et le Cirad sur les bovins (Gbenou *et al.*, 2022) et par l'Inera sur les petits ruminants (Ouermi *et al.*, 2022) au Burkina Faso.

■ 1.3. L'hexafluorure de soufre comme gaz traceur

La technique utilisant l'hexafluorure de soufre (SF₆) comme gaz traceur consiste à administrer par voie orale un

petit tube en laiton à libération contrôlée de gaz SF₆ dans le rumen de l'animal (Johnson *et al.*, 1994). La capsule génère un flux de SF₆ constant et calibré *in vitro*, et un dispositif de collecte échantillonne en continu les gaz émis au niveau des naseaux sur une période donnée. Le ratio CH₄/SF₆ dans la boîte de collecte ainsi que la vitesse de diffusion du SF₆ *via* le bolus permet d'estimer la quantité de eCH₄ émise pendant la durée de la collecte, et donc le flux. Une caractéristique essentielle est que la mesure résulte d'un échantillonnage continu et pas seulement de mesures ponctuelles comme c'est le cas avec le GF. Les concentrations de CH₄ et de SF₆ sont ensuite mesurées par chromatographie en phase gazeuse. La technique SF₆ a un effet restreint sur le comportement des animaux dans des conditions typiques de leur gestion (Johnson *et al.*, 1994). Même si cette technique peut être utilisée sur un grand nombre d'animaux au pâturage ou en stabulation, il faut pouvoir approcher les animaux (et les attacher) régulièrement (tous les jours ou deux jours) pour collecter les gaz. Par ailleurs, il est rapporté que cette approche demande beaucoup de technicité pour gérer et calibrer les équipements, et qu'elle dépend de la qualité de l'échantillonnage des gaz collectés sur les animaux. Expérimentée plusieurs fois avec succès en Afrique du Sud au PAT (van Wyngaard *et al.*, 2018a, 2018b), la technique SF₆ peut également être utilisée en STA et en ELE pour minimiser le travail laborieux et augmenter la précision des mesures.

Le **tableau 1** regroupe les informations sur les techniques de mesure *in*

vivo individuelle du eCH₄ dans les différents groupes (PAT, ELE et STA).

■ 2. Prédiction du méthane entérique en Afrique subsaharienne

Les techniques de prédiction de eCH₄ *via* des biomarqueurs (proxys) sont une alternative intéressante pour la réalisation d'un grand nombre d'estimations dans des conditions pratiques (Martin, 2021 ; Negussie *et al.*, 2022). Elles permettent également de limiter les contraintes sur les animaux en expérimentation si les matrices servant à mesurer les biomarqueurs ne nécessitent pas de prélèvement invasif, comme les aliments, le lait, et les fèces. Les proxys capables d'expliquer les émissions de eCH₄ ont été résumés par Negussie *et al.* (2017). Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux proxys applicables dans les différentes conditions d'élevage (PAT, ELE et STA). Plusieurs modèles basés sur ces proxys ont d'ailleurs été développés dans le monde pour estimer les émissions de eCH₄ (Benaouda *et al.*, 2020). Par ailleurs, le GIEC (2019) a élaboré des méthodes standardisées de prédiction de eCH₄ qui sont généralement stratifiées en niveaux (1, 2 et 3) en fonction de leur complexité. Mais il n'existe pas de modèles de référence spécifiques pour les pays d'ASS. Ainsi, le niveau 2 du GIEC est le principal utilisé pour estimer les émissions de eCH₄ dans cette région (Ndao *et al.*, 2020 ; Tongwane & Moeletsi, 2020). Différents indicateurs, techniques et leurs combinaisons pouvant être utilisés pour développer des modèles sont examinés ci-dessous

Tableau 1. Les techniques de mesure *in vivo* du méthane entérique et leur adaptation aux différentes conditions.

Techniques	Présence en ASS	PAT	ELE	STA	Niveau de précision par rapport à la CR	Mesure sur 24 h	Références des niveaux de précision
CR	Oui	-	-	+	-	Continue	-
HV	Non	-	-	+	84 %	Continue	Troy <i>et al.</i> (2016)
GF	Oui	+	+	+	92 %	Discontinue	Huhtanen <i>et al.</i> (2019)
SF ₆	Oui	+	+	+	70-80 %	Intégrative	Doreau <i>et al.</i> (2018)

PAT : Pâturage, ELE : stabulation chez l'éleveur, STA : station expérimentale, CR : chambre respiratoire, HV : hotte ventilée, GF : système GreenFeed® (C-Lock), SF₆ : traceur, + : adapté, - : non adapté.

en fonction de leur faisabilité et de leur simplicité d'application dans le contexte de l'ASS.

■ 2.1. À partir de l'ingestion

L'ingestion est caractérisée par la quantité de matière sèche ingérée (MSI) et sa composition. Elle est le premier facteur de variation des émissions de eCH₄ (Congio *et al.*, 2022). Des modèles de prédiction basés sur l'ingestion ont été synthétisés pour les pays du Nord (Benaouda *et al.*, 2020 ; Congio *et al.*, 2022). Les modèles utilisant la MSI sont assez précis mais n'existent pas encore pour l'ASS. La difficulté majeure est d'obtenir une mesure ou prédiction fiable de MSI. Pour estimer l'ingestion au PAT dans cette région, c'est la méthode de collecte du berger (« *hand-plucking* »), consistant à prélever à la main les ressources consommées en imitant l'animal, qui est utilisée (De Paula *et al.*, 2019 ; Gbenou *et al.*, 2020). Cependant la faible précision de l'imitation du comportement de préhension alimentaire (quantité et qualité) variant en fonction de l'animal et de l'opérateur entraîne une forte incertitude dans les valeurs d'ingestion mesurées.

En ELE et en STA, l'ingestion peut être plus facilement mesurée. Les quantités ingérées et les émissions de eCH₄ dépendent également de la digestibilité du régime alimentaire et de l'énergie digestible (Tedeschi, 2019). Ainsi, Negussie *et al.* (2022) ont constaté une augmentation de la précision des prédictions à l'intérieur d'un troupeau (0,52 à 0,77 pour r²) et entre troupeaux (de 0,77 à 0,79 pour r²) après avoir ajouté des variables de la composition chimique de la ration dans les modèles. Ces variables peuvent être les fractions de fibres et d'extrait éthéré (Ribeiro *et al.*, 2020), la digestibilité et l'énergie ingérée (GIEC, 2019). Des logiciels tels que INRATION V5 Rumin'al (2020) sont mis en place pour le rationnement des animaux (<https://www.inration-ruminal.fr>). Ils s'appuient sur les tables de valeurs et intègrent les aspects technique, économique, environnemental. Ces logiciels fournissent les teneurs des éléments nutritifs à intégrer dans les modèles de prédiction du eCH₄. Si leurs principes sont universels, ils sont cependant calibrés pour des

animaux et régimes différents de ceux rencontrés en ASS. En dehors de ces logiciels, la composition chimique des aliments peut être obtenue par l'analyse de laboratoire ou par des prédictions. L'ingestion est un proxy qui peut potentiellement prédire les émissions de eCH₄ pour toutes les catégories de ruminants.

■ 2.2. À partir des constituants du lait

La production laitière dépend de la composition des aliments ingérés et du métabolisme des microorganismes qui fermentent les aliments. Un lien existe entre la quantité de lait, sa composition (en acides gras, en protéines) et la production de eCH₄. Les acides gras du lait (AGL) sont donc des marqueurs potentiels des émissions de eCH₄ (Chilliard *et al.*, 2009). Quelques modèles utilisant les AGL et la teneur en protéines pour prédire le eCH₄ ont été rapportés par Bougouin *et al.* (2019) et Marumo *et al.* (2023). Cependant, jusqu'à présent, il n'existe pas d'équations développées sur le lait et sa composition pour prédire le eCH₄ dans les pays d'ASS.

La complexité des analyses de laboratoire pour l'obtention des AGL mineurs par chromatographie gazeuse et le fait que ce proxy ne peut pas être utilisé pour les catégories d'animaux ne produisant pas de lait sont les principales limites de l'utilisation des AGL comme proxy. Néanmoins, la spectrométrie dans le moyen infrarouge (MIR) appliquée au lait qui permet d'analyser en routine et à faible coût la composition chimique globale et certains AG, pourrait être appliquée en ASS. Le lait et sa composition ont l'avantage de pouvoir être utilisés dans toutes les conditions (PAT, ELE et STA) pour prédire le eCH₄. Vanlierde *et al.* (2021) ont développé des modèles de prédiction par la MIR. Le principe de la composition chimique globale du lait est intéressant, mais vu les différences considérables entre animaux en termes de production et de composition du lait, il faudra probablement, soit vérifier que ces conditions appartiennent au domaine de validité des modèles

globaux – et sinon les intégrer – soit établir des modèles spécifiques aux conditions d'ASS.

■ 2.3. À partir des constituants des fèces

Les archées méthanogènes du rumen sont responsables de la production de eCH₄. Un lipide membranaire de ces archées (l'archéol, 2,3-diphityl-O-sn-glycérol) est détectable dans les fèces et constitue une molécule potentielle de prédiction des émissions de eCH₄ (Gill *et al.*, 2011). Les concentrations en archéol dans les fèces sont corrélées positivement (r² = 0,53) avec les émissions de eCH₄ dans le rumen (Cheng *et al.*, 2021), mais les résultats dépendent du temps qui sépare l'ingestion de la collecte fécale (Görs *et al.*, 2016). Il est possible d'évaluer la concentration de cette molécule dans les fèces des ruminants au laboratoire par chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse, après extraction par la méthode Soxhlet ou par sonication (Görs *et al.*, 2016). L'analyse des archéols doit se faire sur des échantillons de fèces prélevés à différents moments de la journée sur tous les animaux. Mais cette analyse au laboratoire est techniquement complexe et limiterait l'utilisation de l'archéol en ASS comme proxy du eCH₄ malgré la possibilité d'obtention des matières fécales dans les trois conditions d'élevage discutées (PAT, ELE et STA) et pour toutes catégories de ruminants.

La spectrométrie proche infrarouge (SPIR) appliquée aux fèces pourrait être développée comme une approche indirecte pour prédire le eCH₄ au PAT, en ELE et en STA. Elle a déjà fait l'objet de travaux dans le projet SmartCow (2020) (<https://www.smartcow.eu>). Elle nécessite cependant un étalonnage consistant à bâtir une base de références associant des spectres de fèces aux mesures de eCH₄ comme détaillé par Sun *et al.* (2022) pour la SPIR sur les rations. Pour réaliser l'étalonnage, les spectres SPIR devront être mesurés sur des échantillons de fèces collectés sur des animaux lors des mesures de eCH₄ réalisées dans les expérimentations menées dans les structures expérimentales d'ASS. Avec les premiers résultats,

il faudra évaluer si la meilleure stratégie d'étalonnage est de développer des bases spécifiques pour l'ASS, ou d'ajouter des échantillons provenant d'ASS à des bases plus générales.

■ 2.4. Le « détecteur laser méthane »

Le « détecteur laser méthane » (LMD) mesure l'absorption de la lumière par le CH_4 à une longueur d'onde spécifique (infrarouge à 1 653 nm) produite par un laser. Il s'agit d'une mesure de concentration de CH_4 (ppm.mètre) et non du flux. Un étalonnage entre ces mesures est donc nécessaire. En pratique le faisceau laser est dirigé vers l'orifice nasal de l'animal pour évaluer la concentration de eCH_4 et nécessite 240 s pour une bonne mesure (Boré *et al.*, 2022). Le LMD a été testé au PAT par Gautier *et al.* (2022) qui ont rapporté que les mesures sont influencées par les conditions météorologiques et l'activité des animaux. De plus, elles nécessitent de la main-d'œuvre pour le suivi des animaux. Ces mesures peuvent également être effectuées en STA et en ELE pour réduire la pénibilité des mesures fréquentes. Cette technique a été appliquée sur des animaux au cours de différentes activités (alimentation, abreuvement, rumination, repos) (Jonker *et al.*, 2020). Les mesures nécessitent une adaptation préalable des animaux aux opérateurs qui doivent pouvoir approcher des animaux pour faire les mesures dans des conditions standardisées. Le changement d'opérateur peut malgré tout influencer la mesure (Sorg *et al.*, 2017). En ASS, grâce à sa portabilité, le LMD permet le suivi d'animaux en mobilité, et donc la mesure dans des conditions les plus proches possibles des comportements naturels des animaux. L'influence des conditions de mesures (température ambiante, rayonnement naturel) doit cependant être vérifiée.

■ 2.5. À partir des gaz expirés

La prédiction de eCH_4 chez les ruminants est possible à partir d'un gaz comme marqueur interne, le CO_2 expiré. Elle a été proposée par Madsen *et al.* (2010). Elle consiste à mesurer la concentration expirée de CH_4 en même

temps que celle de CO_2 en tant que gaz marqueur dans l'air contenant de faibles concentrations de gaz expirés par les animaux. Le volume de eCH_4 émis est déterminé comme le produit du rapport CH_4/CO_2 et des émissions quotidiennes de CO_2 prévues par l'unité de production de chaleur (UPC) et l'équivalent UPC en CO_2 . Cette méthode de prédiction a fait ses preuves selon Suzuki *et al.* (2021), mais elle exige aussi des équipements tels que le sniffer pour les mesures. Ces équipements pourraient être limités dans leur utilisation au PAT et ne permettraient pas d'avoir une prédiction précise dans ces conditions d'élevage. En revanche, en ELE et en STA, ces équipements pourraient facilement être contrôlés. La prédiction par le ratio CH_4/CO_2 est adaptée à toute catégorie de ruminants.

Les différents proxys décrivent des sources indépendantes de variation du eCH_4 . Leur combinaison est donc susceptible d'augmenter la précision des prédictions et constitue une meilleure solution (Ribeiro *et al.*, 2020). L'hypothèse est qu'un proxy peut corriger les lacunes d'un autre (Negussie *et al.*, 2017). Il est impératif d'avoir bien étudié, bien connaître la faisabilité, la simplicité d'application pour chaque proxy décrit avant d'étudier les différentes combinaisons entre eux. Dans cette synthèse, les différents proxys discutés et susceptibles d'être individuellement utilisés pour prédire le eCH_4 dans une condition d'élevage donnée et pour une catégorie d'animaux donnée sont ceux dont les combinaisons pourraient être envisagées.

3. Stratégies d'atténuation du méthane entérique en Afrique subsaharienne

Un grand nombre de méthodes d'atténuation des émissions de eCH_4 ont été proposées et synthétisées dans la littérature par de nombreux auteurs comme Martin (2021), Beauchemin *et al.* (2022), Fouts *et al.* (2022). Ces méthodes peuvent être classées en quatre catégories (tableau 2) : afin d'évaluer la pertinence de ces stratégies dans les

conditions de l'ASS, quatre critères ont été pris en compte :

i) la concurrence avec la sécurité alimentaire humaine : lorsque les stratégies entrent en concurrence avec l'homme pour l'utilisation de ressources alimentaires, elles ne sont pas recommandées ;

ii) la disponibilité ou accessibilité : les stratégies doivent être disponibles et accessibles aux éleveurs en tenant compte notamment de leur pouvoir d'achat et de leur technicité ;

iii) la satisfaction des besoins des éleveurs : les stratégies ne doivent pas seulement être conçues pour protéger l'environnement, mais doivent permettre l'amélioration des moyens de subsistance des éleveurs grâce à des pratiques respectueuses du climat (stratégies « gagnantes-gagnantes ») ;

iv) la bonne performance *in vivo* : plusieurs stratégies sont au stade d'étude *in vitro* et n'ont pas encore démontré leur efficacité sur le terrain. Elles devraient être testées et validées avant d'être proposées aux éleveurs.

Sur la base de la combinaison de ces critères, les stratégies applicables en ASS ont été sélectionnées et sont discutées dans cette partie. Les principales stratégies utilisables sont les stratégies nutritionnelles et celles portant sur la gestion des troupeaux.

■ 3.1. Stratégies nutritionnelles

Parmi les stratégies nutritionnelles rapportées dans la littérature, celles applicables en ASS incluent l'utilisation des légumineuses arbustives, des sous-produits agricoles, des coproduits agricoles et des fourrages conservés ainsi que l'amélioration du pâturage ; sachant que les rations de base sont souvent déséquilibrées et ne permettent pas des apports nutritionnels suffisants.

a. Apport de légumineuses arbustives

Les feuilles de légumineuses arbustives sont riches en protéines, mais

Tableau 2. Stratégies d'atténuation des émissions de méthane entérique chez les ruminants et principaux leviers d'actions à l'étude pour chaque stratégie.

Stratégies d'atténuation	Leviers d'action
Stratégies nutritionnelles	Amélioration de la qualité des aliments et du niveau d'ingestion par les : <ul style="list-style-type: none"> – légumineuses arbustives, aliments concentrés, – coproduits des cultures, – suppléments lipidiques, – huiles essentielles, – conservations des fourrages, – améliorations du pâturage.
Manipulation des fermentations du rumen	Utilisation d'additifs : <ul style="list-style-type: none"> – antibiotiques ionophores, – 3-nitrooxypropanol, – macro-algues, – fumarate, malate, nitrate, sulfate.
Atténuation précoce	Utilisation en début de vie : <ul style="list-style-type: none"> – vaccin, – probiotiques, – défaunation du rumen, – apport de biochar, – apport bactéries oxydant le méthane.
Gestion du troupeau	Limitation du nombre/proportion d'animaux improductifs. Maintien du bon état sanitaire des animaux. Réduction de l'âge des femelles au premier vêlage. Sélection d'animaux moins émetteurs. Réduction du cheptel à l'échelle nationale.

aussi en métabolites secondaires qui peuvent avoir des effets positifs sur le métabolisme ruminal. L'utilisation des légumineuses est déjà ancrée dans les habitudes des éleveurs en ASS pour alimenter leurs ruminants. Le choix des légumineuses arbustives dépend de l'espèce de ruminant et de ses besoins nutritionnels spécifiques (FAO, 2014). Au PAT, elles sont offertes aux animaux par émondage en saison sèche alors qu'en saison pluvieuse les animaux les consomment à volonté directement sur l'arbuste. En ELE, elles peuvent être apportées aux animaux en saison sèche pour relever la valeur nutritive d'aliments souvent très carencés en azote. Plusieurs espèces ligneuses ont en outre été testées sous forme de banque fourragère arbustive à forte densité et haute valeur protéique. Il s'agit du *Leucaena leucocephala*, *Albizia lebbeck*, *Gliricidia sepium*, *Samanea saman* et du *Morus alba* décrits par Sib et al. (2019) au Burkina Faso. Ces ressources possèdent une teneur élevée en protéines qui équilibre la ration. À la suite de plusieurs études *in vitro* et *in vivo*, Naumann et al. (2015) et Archimède et al. (2016) ont rapporté le potentiel de ces ressources

à atténuer les émissions de eCH_4 grâce à leurs teneurs élevées en tanins ou saponines. En Afrique du Sud, du Toit (2017) a rapporté des réductions significatives de eCH_4 (g/kg MSI) de – 18 % et – 14 % dans des essais *in vitro* après avoir substitué *Eragrostis curvula* par *Lepedezacuneata* à hauteur respectivement de 60 % et 90 % de l'ingéré chez les ovins. Cependant, la composition chimique du fourrage varie en fonction de son stade de développement, de la saison et de l'état de distribution (frais ou sec). Cet aspect n'a pas été considéré par ces auteurs dans leurs analyses. Leurs résultats nécessitent donc d'être complétés avec d'autres mesures *in vivo* pour évaluer le potentiel réel de réduction des émissions de eCH_4 par les légumineuses arbustives.

b. Apport d'aliments concentrés à base de coproduits des industries agroalimentaires

Les concentrés peuvent être fabriqués à partir de coproduits disponibles localement : oléagineux (tourteaux), céréales (sons de mil, de sorgho, de maïs), brasserie (drêche) et sucreries

(mélasse, bagasse). Les aliments concentrés sont aussi connus pour leur potentiel de réduction des émissions de eCH_4 (van Wyngaard et al., 2018b). En premier lieu, ils permettent une complémentation de la ration qui assure un meilleur fonctionnement du rumen et un transit plus rapide. En second lieu, ils peuvent orienter les fermentations vers des voies métaboliques moins productrices de eCH_4 (la propionogenèse rend l'hydrogène moins disponible pour les archées méthanogènes).

Selon leur formulation et la quantité ingérée, les aliments concentrés ne présentent pas le même potentiel réducteur (Muñoz et al., 2018). En ASS (Bénin), Laibi et al. (2015) ont mis en évidence *in vitro* la réduction de – 7 à – 23 % ($\mu\text{mol}/\text{mmol}$ d'acide gras volatils) des émissions de eCH_4 par un concentré (à base de son de blé, tourteau de coton). En Afrique du Sud, la complémentation au pâturage avec 4 ou 8 kg de concentré (à base de maïs, soja et mélasse) des vaches laitières jersey a réduit en moyenne les émissions de eCH_4 de – 14 % en rendement (g/kg MSI) et de – 29 % en

intensité (g/kg lait) (van Wyngaard *et al.*, 2018a). Toutefois, la complémentation des rations par des aliments concentrés doit tenir compte du coût pour le producteur et veiller à maintenir un fonctionnement normal du rumen. En effet, l'alimentation des ruminants doit comporter de 300 à 500 g de NDF/kg MS pour garantir un fonctionnement normal (pH = 5,5 à 6,6) du rumen (INRA, 2018). Un excès de concentrés (jusqu'à 60 à 80 % de l'ingéré) peut entraîner une acidose ruminale qui va induire une baisse de la production et l'apparition de problèmes pathophysiologiques (Martin *et al.*, 2006).

c. Apport de coproduits et résidus de culture

En ASS, les coproduits et résidus de culture sont utilisés par les éleveurs dans l'alimentation des ruminants en milieu réel (Savadogo *et al.*, 1999) surtout en saison sèche dans la période post-récolte. Les principaux coproduits disponibles sont issus des cultures de légumineuses (fanés d'arachide, de niébé, de voandzou) et de céréales (pailles de maïs, de mil, de sorgho, de riz), des racines et des tubercules (épluchures de manioc, d'igname, de patate) (Savadogo *et al.*, 1999 ; Montcho *et al.*, 2016), ou encore du maraîchage (carottes, feuilles de chou, pommes de terre et haricots verts abîmés) (de Bon *et al.*, 2019). Une augmentation de leur disponibilité, liée à l'augmentation de la production de céréales, est prévisible dans les années à venir en ASS (FAO, 2014) et l'optimisation de leur utilisation est un enjeu particulier (Zoungrana *et al.*, 2023).

Ces ressources n'ont pas fait l'objet d'étude exploratoire pour leur potentiel de réduction de eCH_4 . La composition chimique des principaux coproduits agricoles analysés par Savadogo *et al.* (1999) et Gbenou *et al.* (2023) révèle que les pailles de céréales sont pauvres en protéines, mais elles permettent aux animaux de subsister surtout pendant les périodes de soudure. Les coproduits de légumineuses sont en général plus riches aussi bien en protéines qu'en énergie. Ils permettent une amélioration de l'ingestion par rapport aux animaux non complémen-

tes des coproduits de céréales, les éleveurs peuvent les traiter à l'urée (Aruwayo, 2018) ou aux nitrates (Chivandi *et al.*, 2007). Si cette pratique est simple, facilement maîtrisable et techniquement efficace en théorie, son adoption est cependant très faible en raison du prix élevé de l'urée et de la faible disponibilité des nitrates en ASS. Enfin, elle comporte un risque d'intoxication des animaux en cas de mauvaise maîtrise technique conduisant à une grande consommation d'urée ou de nitrates (Abdelbagi *et al.*, 2023 ; Gimelli *et al.*, 2023). Rebelo *et al.* (2019) a rapporté au Brésil que l'apport d'urée réduit la production *in vivo* de eCH_4 . De la même manière, les nitrates sont connus pour leur capacité à réduire *in vivo* ces émissions (Guyader *et al.*, 2015). Cependant, l'utilisation des coproduits et résidus de cultures et l'apport d'urée ou de nitrates dans l'alimentation restent des pistes non suffisamment documentées en ASS pour l'atténuation de eCH_4 chez les ruminants.

d. Apport de fourrages conservés

Les fourrages conservés en ASS sont issus des cultures fourragères, de l'herbe de parcours naturels, et des coproduits et résidus de culture (Ajayi, 2011). Ces fourrages sont généralement conservés après séchage sous forme de pailles. Des essais d'introduction de la technique d'ensilage ont eu lieu mais ils ont rencontré très peu de succès. Pourtant l'ensilage se présente comme un meilleur candidat pour la réduction du rendement eCH_4 (Dall-Orsoletta *et al.*, 2019a). En effet, la méthanogenèse est plus faible chez l'animal alimenté avec de l'ensilage (car plus digestible) que chez celui nourri avec le foin (Beauchemin *et al.*, 2008). L'ensilage augmente l'ingestion volontaire et réduit ainsi le temps de séjour des aliments dans le rumen. Le rendement de eCH_4 est par conséquent réduit. De plus, la digestion post-ruminale est énergétiquement plus efficace (par rapport à la fermentation microbienne ruminale) et améliore les performances des animaux d'où la réduction de l'intensité de eCH_4 .

Le fort potentiel de réduction de eCH_4 de l'ensilage a été mis en évidence

in vivo au Brésil par Dall-Orsoletta *et al.* (2019a). Au Kenya, Ali *et al.* (2019) ont testé *in vivo* l'inclusion de 19 % d'ensilage de patate douce dans la ration pour augmenter l'apport azoté chez les génisses et ont rapporté une réduction de 9 % de eCH_4 (g/kg MSI). Une forte réduction de eCH_4 est probable avec un taux élevé d'inclusion de l'ensilage dans la ration. Cependant, fabriquer de l'ensilage demande des fourrages de base de bonne qualité, des investissements, du travail et un lieu sécurisé pour le stocker. L'alimentation des animaux avec de l'ensilage ne peut pas se faire au PAT, mais pourrait plus facilement être adoptée en ELE et en STA, en cas de disponibilité de ressources alimentaires pour des reports de stocks.

e. Amélioration du pâturage

Au pâturage, la réduction de eCH_4 peut aussi être mise en place *via* une stratégie permettant d'améliorer la quantité et la qualité des herbacées. Cette amélioration peut se faire à travers l'introduction d'espèces appétentes et déclarées inductrices de faibles émissions de eCH_4 . En Afrique du Sud, du Toit *et al.* (2018) ont étudié *in vitro* le potentiel méthanogène de la plupart des fourrages consommés par les ruminants au pâturage. Selon ces auteurs, les espèces fourragères à faible potentiel méthanogène sont, entre autres, *Andropogon gayanus*, *Bothriochloa bladhii*, *Panicum maximum*, *Eragrostis curvula*, *Trachypogon spicatus*, *Elionurus miticus*. L'introduction de ces espèces dans les stratégies de restauration et d'amélioration des parcours naturels ou leur utilisation en culture fourragère peuvent être envisagées comme stratégies de réduction de eCH_4 en ASS au PAT, en ELE et en STA. Toutefois la pérennisation de ces pâturages améliorés nécessite une gestion adéquate, notamment une répartition rationnelle du bétail et la mise en pâture de la catégorie d'animaux convenant le mieux aux différents types de pâturages.

■ 3.2. Gestion des animaux et des troupeaux

a. Réduction du nombre d'animaux improductifs

En ASS, la présence d'animaux improductifs augmente l'intensité de eCH_4 au

niveau du troupeau. Ces animaux sont les vaches en fin de carrière et les taureaux âgés qui peuvent être remplacés par des animaux jeunes et performants ou efficaces. Dall-Orsoletta *et al.* (2019b) ont rapporté une réduction de l'intensité de eCH₄ du troupeau suite à un remplacement des vaches âgées par des génisses. Le remplacement des animaux improductifs dans le troupeau est une stratégie pour réduire l'intensité de eCH₄. Cette stratégie peut être appliquée au PAT, en ELE et en STA.

b. Maintien du bon état sanitaire des animaux

La production de eCH₄ chez les ruminants est également liée à leur état de santé (Grešáková *et al.*, 2021). L'animal malade ingère peu et lorsque l'animal ingère en dessous de sa capacité d'ingestion, l'aliment passe plus de temps dans le rumen et induit un rendement et une intensité de eCH₄ élevés. Aussi, Fox *et al.* (2018) ont rapporté que les animaux parasités émettent plus de eCH₄. Assurer un bon état sanitaire (déparasitage, soins ponctuels, vaccination) des animaux leur permet de mieux ingérer, digérer et de produire moins de eCH₄ par unité d'ingéré ou de produit. Que cela soit au PAT, en ELE ou en STA, une attention ponctuelle doit être accordée au comportement des animaux afin d'identifier tout dysfonctionnement sanitaire et traiter l'animal malade ou le sortir du troupeau s'il s'agit d'une maladie contagieuse. En ASS, cette stratégie peut s'appliquer à condition que les éleveurs soient rigoureux pour faire vacciner leurs animaux pendant les campagnes de vaccinations nationales organisées périodiquement par les États.

c. Réduction de l'âge au premier vêlage

En ASS, l'âge au premier vêlage est tardif, généralement 48 mois en moyenne (Tellah *et al.*, 2015). Dall-Orsoletta *et al.* (2019b) ont rapporté que plus l'âge au premier vêlage des vaches était élevé plus l'intensité des émissions de eCH₄ du troupeau était importante. L'âge tardif au premier vêlage réduit la productivité, les performances reproductives et économiques pour les éleveurs. Il est possible de ramener cet âge à 36 mois (N'Diaye *et al.*, 2002), ce qui se traduirait par une augmentation de la production

de lait par jour de vie productive de la vache et une réduction de la durée d'élevage des génisses. L'éleveur produit donc plus de lait sans augmenter l'effectif de son troupeau, ce qui a pour conséquence de réduire les émissions de eCH₄ par unité de produit. Cette stratégie peut s'appliquer au PAT, en ELE et en STA.

d. Sélection des animaux faibles émetteurs

La sélection génétique des animaux faibles émetteurs permet de réduire les émissions de eCH₄. Elle a fait ses preuves (Hegarty *et al.*, 2007), et permet d'espérer des réductions de 10 % sur 10 ans (Fouts *et al.*, 2022). Elle nécessite une mesure de eCH₄ qui peut être effectuée directement ou indirectement pour chaque animal. Mais la précision et la mise en œuvre de la sélection directe nécessitent des données de eCH₄ sur 12 000 à 25 000 animaux (de Haas *et al.*, 2011). La mesure directe pour la sélection est peu pratique et coûteuse (Fouts *et al.*, 2022) pour les États d'ASS. En plus, elle ne pourra être appliquée qu'en STA. Indirectement, la sélection des animaux pourrait être possible au PAT et en ELE. En tout état de cause, il n'y a actuellement pas de programme de sélection et de suivi de performances individuelles à grande échelle en ASS.

Dans tous les cas, il convient de faire attention aux compromis avec les autres phénotypes d'intérêt. Pour une même production, il existe des différences dans les émissions de eCH₄ entre les races, les individus (Maciel *et al.*, 2019) et le sexe (Washaya *et al.*, 2018). Le phénotypage d'animaux sur leurs émissions de eCH₄ est une approche qui nécessite de pouvoir mesurer un grand nombre d'animaux dans des environnements variés. La sélection d'animaux faibles émetteurs est devenue pertinente à partir du moment où il a été montré que le phénotype est répétable et héritable. Avec des rations riches en fibres ou en amidon chez les bovins viande, les émissions de eCH₄ en g/jour et en g/kg MSI sont répétables aussi bien pour les régimes différents (Coppa *et al.*, 2021) que contrastés (Bes *et al.*, 2022). La faisabilité de la sélection en ELE et au PAT doit impliquer l'État qui peut sub-

ventionner les activités et encourager les éleveurs dans ce sens.

e. Diminution de la taille du cheptel

La réduction du cheptel national est une solution efficace pour réduire les émissions de eCH₄ en g/j mais il est nécessaire d'avoir des animaux plus productifs pour à la fois réduire l'intensité de eCH₄ et assurer la production de produits animaux afin de nourrir la population (Ulyatt & Lassey, 2001). En ASS, l'apport quotidien en protéines animales est de 11 g/j et par habitant alors que le minimum nécessaire est estimé à 20 g (Chatellier, 2020). Dans le même temps, la demande en produits animaux (viande et lait) augmente rapidement avec la croissance démographique. L'intensification de la production animale doit donc aller de pair avec la protection de l'environnement afin de garantir la disponibilité des ressources alimentaires aux animaux et le revenu des éleveurs. Au lieu d'augmenter le nombre de têtes animales pour nourrir la population, il serait plus judicieux d'élever des animaux plus efficaces et plus productifs. La réduction du cheptel national par la sortie des animaux peu productifs pourrait alors s'effectuer aussi bien au PAT, en ELE et en STA.

■ 3.3. Combinaison de stratégies

La combinaison de plusieurs stratégies pour réduire les émissions de eCH₄ est susceptible d'augmenter ou de diminuer l'efficacité des stratégies considérées individuellement. Martin (2021) a rapporté un effet additif entre deux stratégies alimentaires (apport de lipides et de nitrates) sur les émissions de eCH₄. Pour l'ASS, il convient d'abord de bien connaître les effets de chacune des stratégies avant d'étudier les interactions entre les stratégies et leurs conséquences non seulement sur les émissions de eCH₄ mais aussi sur d'autres phénotypes d'intérêt (production, efficacité, santé) et d'autres index environnementaux. Le **tableau 3** récapitule, pour chaque groupe d'élevage en ASS, les stratégies potentielles de réduction des émissions de eCH₄ qui peuvent être utilisées individuellement ou en combinaison.

Tableau 3. Stratégies d'atténuation du méthane entérique et leur adaptation aux différentes conditions d'élevage en Afrique subsaharienne.

Stratégies	PAT	ELE	STA	Effet sur eCH ₄				
				g/jour	g/MSI	g/lait	g/PV	g/GMQ
Stratégie nutritionnelle								
Légumineuses arbustives	Adapté	Adapté	Adapté	↑	↓↓↓	↓↓	↑	↓↓
Concentrés issus de coproduits agroalimentaires	Non adapté	Adapté	Adapté	↑	↓↓	↓↓	↑	↓↓
Coproduits et résidus de culture	Non adapté	Adapté	Adapté	↓	↓↓	–	↓	–
Fourrages conservés	Non adapté	Adapté	Adapté	↑	↓↓	↓↓	↑	↓↓
Amélioration du pâturage	Adapté	Adapté	Adapté	↑	↓↓	↓↓	↑	↓↓
Gestion des animaux et du troupeau								
Réduction des animaux improductifs	Adapté	Adapté	Adapté	–	↓	↓	–	–
Maintien du bon état sanitaire	Adapté	Adapté	Adapté	–	–	–	–	–
Réduction de l'âge des vaches au premier vêlage	Adapté	Adapté	Adapté	↓↓	0	↓	–	↓↓
Sélection animale	Non adapté	Adapté	Adapté	↓	↓↓	↓	–	↓
Réduction de la taille du cheptel	Adapté	Adapté	Adapté	↓	–	↓	–	–

MSI : matière sèche ingérée, PV : poids vif, GMQ : gain moyen quotidien.

Les pourcentages de réduction de eCH₄ sont représentés par les flèches comme proposé par Beauchemin *et al.* (2022) : ↓ : diminution jusqu'à 15 % ; ↓↓ : diminution de 15 à 24 % ; ↓↓↓ : diminution à partir de 25 % ; 0 : pas d'effet ; – : non rapporté ; ↑ : augmentation jusqu'à 15 % ; ↑↑ : augmentation de 15 à 24 %.

Conclusion

L'élevage en Afrique subsaharienne est soumis à de multiples pressions : la réduction des espaces de parcours, le réchauffement climatique et ses effets sur les ressources, les attentes sociétales. Il doit produire plus pour faire face à l'insécurité alimentaire en termes de protéines animales parallèlement à une alimentation plus équilibrée, et répondre à des injonctions de réduction de son impact environnemental. Il existe de grandes marges de progrès sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre, et principalement de méthane entérique, si on les rapporte à la production car celle-ci est actuellement faible notamment en éle-

vage pastoral. Les gains de potentiels sont très élevés en augmentant la productivité des animaux *via* une alimentation mieux adaptée et en améliorant les pratiques de gestion des troupeaux.

Mais pour progresser le plus efficacement possible dans la mise en place de systèmes d'élevage vertueux, l'effort doit porter sur la création de connaissances solides et objectives sur les principaux facteurs de variation de la production de méthane entérique en Afrique subsaharienne. Ceci implique tout d'abord la production de données de référence précises. Celles-ci permettront également de valider des prédicteurs (proxys) faciles d'accès à grande échelle et en conditions pratiques. La recherche a donc un grand rôle à jouer

dans cet appui au développement durable de la filière animale dans cette région du monde.

Par ailleurs il est important d'élargir l'évaluation environnementale en considérant non seulement les émissions de GES (méthane et oxyde nitreux) des animaux, mais également les autres aspects de leur interaction avec l'environnement. En effet dans les conditions d'élevage extensif qui prévalent en ASS et notamment dans les zones sahéliennes, les animaux ont un rôle central dans le cycle du carbone, avec une capacité à restituer au sol de la matière organique qui serait autrement dégradée ou brûlée. Ils peuvent contribuer au stockage de carbone avec des valeurs faibles par hectare, mais sur des surfaces considérables.

Contribution des auteurs

GXG a défini les grandes lignes de l'article qui ont été validées par MHA, CM, DB et LHD. La première version de l'article a été rédigée par GXG. LB, OS, BB, NZ, TB et SS ont corrigé l'article. MHA, CM, DB et LHD ont visé les corrections

et la version finale. Tous les auteurs ont approuvé la version soumise.

Remerciements

Cette revue est rendue possible par le projet CaSSECS « *Carbon Sequestration and greenhouse gas emissions in (agro)*

Sylvopastoral Ecosystems in the sahelian CILSS States ». Ce projet régional a été financé par l'Union européenne (programme européen DeSIRA, au titre de la convention de subvention N°FOOD/2019/410-169).

Références

- Abdelbagi, M., Ridwan, R., Fitri, A., Nahrowi & Jayanegara, A. (2023). Performance, methane emission, nutrient utilization, and the nitrate toxicity of ruminants with dietary nitrate addition: A meta-analysis from *in vivo* trials. *Tropical Animal Science Journal*, 46(1), 74-84. <https://doi.org/10.5398/tasj.2023.46.1.74>
- Ajayi, F. T. (2011). Effects of feeding ensiled mixtures of elephant grass (*Pennisetum purpureum*) with three grain legume plants on digestibility and nitrogen balance of West African dwarf goats. *Livestock Science*, 142(13), 80-84. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2011.06.020>
- Ali, A. I. M., Wassie, S. E., Korir, D., Merbold, L., Goopy, J. P., Butterbach-Bahl, K., Dickhoefer, U., & Schlecht, V. (2019). Supplementing tropical cattle for improved nutrient utilization and reduced enteric methane emissions. *Animals*, 9(5), 210. <https://doi.org/10.3390/ani9050210>
- Archimède, H., Rira, M., Barde, D. J., Labirin, F., Marie-Magdeleine, C., Calif, B., Periacarpin, F., Fleury, J., Rochette, Y., Morgavi, D. P., & Doreau, M. (2016). Potential of tannin-rich plants, *Leucaena leucocephala*, *Glyricidia sepium* and *Manihot esculenta*, to reduce enteric methane emissions in sheep. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 100(6), 1149-1158. <https://doi.org/10.1111/jpn.12423>
- Aruwayo, A. (2018). Use of urea treated crop residue in ruminant feed. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, 4(7), 54-64. <https://doi.org/10.31695/IJASRE.2018.32794>
- Beauchemin, K. A., Kreuzer, M., O'Mara, F., & McAllister, T. A. (2008). Nutritional management for enteric methane abatement: A review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(2), 21. <https://doi.org/10.1071/EA07199>
- Beauchemin, K. A., Ungerfeld, E. M., Abdalla, A. L., Alvarez, C., Arndt, C., Becquet, P., Benchaar, C., Berndt, A., Maurício, 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>
- Benaouda, M., González-Ronquillo, M., Appuhamy, J. A. D. R. N., Kebreab, E., Molina, L. T., Herrera-Camacho, J., Ku-Vera, J. C., Ángeles-Hernández, J. C., & Castelán-Ortega, O. A. (2020). Development of mathematical models to predict enteric methane emission by cattle in Latin America. *Livestock Science*, 241, 104177. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104177>
- Bes, A., Nozière, P., Renand, G., Rochette, Y., Guarnido-Lopez, P., Cantalapiedra-Hijar, G., & Martin, C. (2022). Individual methane emissions (and other gas flows) are repeatable and their relationships with feed efficiency are similar across two contrasting diets in growing bulls. *Animal*, 16, 100583. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100583>
- Boré, R., Bruder, T., El Jabri, M., March, M., Hargreaves, P. R., Rouillé, B., Dewhurst, R. J., & Chagunda, M. G. G. (2022). Measurement duration but not distance, angle, and neighbour-proximity affects precision in enteric methane emissions when using the laser methane detector technique in lactating dairy cows. *Animals*, 12, 1295. <https://doi.org/10.3390/ani12101295>
- Bougouin, A., Appuhamy, J. A. D. R. N., Ferlay, A., Kebreab, E., Martin, C., Moate, P. J., Benchaar, C., Lund, P., & Eugène, M. (2019). Individual milk fatty acids are potential predictors of enteric methane emissions from dairy cows fed a wide range of diets: Approach by meta-analysis. *Journal of Dairy Science*, 102(11), 10616-10631. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15940>
- Broucek, J. (2014). Production of methane emissions from ruminant husbandry: A review. *Journal of Environmental Protection*, 05(15), 1482-1493. <https://doi.org/10.4236/jep.2014.515141>
- Chatellier, V. (2020). La dépendance de l'Afrique de l'Ouest aux importations de produits laitiers. *INRAE Productions Animales*, 33(2), 125-140. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2020.33.2.4027>
- Cheng, L., Cantalapiedra-Hijar, G., Meale, S. J., Rugoho, I., Jonker, A., Khan, M. A., Al-Marashdeh, O., & Dewhurst, R. J. (2021). Review: Markers and proxies to monitor ruminal function and feed efficiency in young ruminants. *Animal*, 15(10), 100337. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100337>
- Chilliard, Y., Martin, C., Rouel, J., & Doreau, M. (2009). Milk fatty acids in dairy cows fed whole crude linseed, extruded linseed, or linseed oil, and their relationship with methane output. *Journal of Dairy Science*, 92(10), 5199-5211. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2375>
- Chivandi, E., Chipfupa, L., & Ncube, S. (2007). In Situ dry matter and nitrogen degradability of ammonium nitrate and urea treated dry veld grass and Zea mays stover in mature goats. *Livestock Research for Rural Development*, 19(28). <http://www.lrrd.org/lrrd19/2/chiv19028.htm>, consulté le 18 janvier 2024
- Climatewatch (2020). Global Historical Emissions. <https://www.climatewatchdata.org/>, consulté le 18 mai 2023
- Congio, G. F. S., Bannink, A., Mayorga, O. L., Rodrigues, J. P. P., Bougouin, A., Kebreab, E., Silva, R. R., Maurício, R. M., da Silva, S. C., Oliveira, P. P. A., Muñoz, C., Pereira, L. G. R., Gómez, C., Ariza-Nieto, C., Ribeiro-Filho, H. M. N., Castelán-Ortega, O. A., Rosero-Noguera, J. R., Tieri, M. P., Rodrigues, P. H. M., ... & Hristov, A. N. (2022). Prediction of enteric methane production and yield in dairy cattle using a Latin America and Caribbean database. *Science of The Total Environment*, 825, 153982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153982>
- Coppa, M., Jurquet, J., Eugène, M., Dechaux, T., Rochette, Y., Lamy, J., Ferlay, A., & Martin, C. (2021). Repeatability and ranking of long-term enteric methane emissions measurement on dairy cows across diets and time using GreenFeed system in farm-conditions. *Methods*, 186, 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2020.11.004>
- Dall-Orsoletta, A. C., Leurent-Colette, S., Launay, F., Ribeiro-Filho, H. M. N., & Delaby, L. (2019a). A quantitative description of the effect of breed, first calving age and feeding strategy on dairy systems enteric methane emission. *Livestock Science*, 224, 8795. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.04.015>
- Dall-Orsoletta, A. C., Oziembowski, M. M., Berndt, A., & Ribeiro-Filho, H. M. N. (2019b). Enteric methane emission from grazing dairy cows receiving corn silage or ground corn supplementation. *Animal Feed Science and Technology*, 253, 6573. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.05.009>
- de Bon, H., Brun-Diallo, L., Sène, J., Simon, S., & Sow, M. A. (2019). Rendements et pratiques des cultures maraîchères en agriculture biologique au Sénégal. *Cahiers Agricoles*, 28, 2. <https://doi.org/10.1051/cagri/2019001>
- De Paula, N. F., Paulino, M. F., Couto, V. R. M., Detmann, E., Maciel, I. F. S., Barros, L. V., Lopes, S. A., Valente, E. E. L., Zervoudakis, J. T., & Martins, L. S. (2019). Effects of supplementation plan on intake, digestibility, eating behavior, growth performance, and carcass characteristics of grazing beef cattle. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, 40(6), 3233-3248. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n6Supl2p3233>

- de Haas, Y., Windig, J. J., Calus, M. P. L., Dijkstra, J., de Haan, M., Bannink, A., & Veerkamp, R. F. (2011). Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection. *Journal of Dairy Science*, 94(12), 6122-6134. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4439>
- Denninger, T. M., Dohme-Meier, F., Schwarm, A., Kreuzer, M., Dufey, P. A., Martin, C., Rochette, Y., & Mürger, A. (2017). *Methane emissions from grazing dairy cows: comparison of data using the sulphur hexafluoride tracer technique and the GreenFeed system*. Poster published by Agroscope. [Poster], Congress: Good food, healthy environment. Swiss. 1p. Consulté le 14 mai 2023. https://www.agroscope.admin.ch/dam/agroscope/de/dokumente/themen/nutztiere/wiederkaeuer/Poster_MethaneEmissionsFromGrasingDairyCows.pdf.download.pdf/Poster_MethaneEmissionsFromGrasingDairyCows.pdf
- Doreau, M., Arbre, M., Rochette, Y., Lascoux, C., Eugène, M., & Martin, C. (2018). Comparison of 3 methods for estimating enteric methane and carbon dioxide emission in nonlactating cows. *Journal of Animal Science*, 96(4), 1559-1569. <https://doi.org/10.1093/jas/sky033>
- du Toit, C. J. (2017). *Mitigation of enteric methane emissions from ruminants in sub-tropical production systems*. [PhD thesis in Animal Science]. University of Pretoria. 217p
- 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>
- FAO (2014). *Résidus agricoles et sous-produits agro-industriels en Afrique de l'ouest—Etat des lieux et perspectives pour l'élevage*. Rome. 73p. <https://www.fao.org/3/i3562f/i3562f.pdf>
- FAO (2023). *Pathways towards lower emissions – A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems*. Rome. 77p. <https://doi.org/10.4060/cc9029en>
- Fouts, J. Q., Honan, M. C., Roque, B. M., Tricarico, J. M., & Kebreab, E. (2022). Enteric methane mitigation interventions. *Translational Animal Science*, 6(2), txac041. <https://doi.org/10.1093/tas/txac041>
- Fox, N.J., Smith, L.A., Houdijk, J.G.M., Athanasiadou, S., & Hutchings, M.R. (2018). Ubiquitous parasites drive a 33% increase in methane yield from livestock. *International Journal for Parasitology*, 48(13), <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2018.06.001>
- Gautier, L., Boré, R., & Rouillé, B. (2022). *Test d'un protocole d'estimation du méthane entérique, avec le laser méthane detector, pour des vaches laitières au pâturage*. Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, 26, 293-296. <https://journées3r.fr/spip.php?rubrique485>
- Gbenou, G. X., Soule, A. H., Sidi, I. H., Djenontin, A. J. P., Akpo, Y., Babatounde, S., Houinato, M., & Mensah, G. A. (2020). Eating behavior and forage intake of mixed-breed cattle (Gir x Borgou) complemented with sorghum brewer's at Panicum maximum C1 grazing in Northern Benin. *Agricultural Science Research Journal*, 10(7), 205-212. https://www.researchgate.net/publication/344771926_Eating_behavior_and_forage_intake_of_mixed_breed_cattle_Gir_x_Borgou_complemented_with_sorghum_brewer's_at_Panicum_maximum_C1_grazing_in_Northern_Benin/related
- Gbenou, G. X., Assouma, M. H., Zampaligre, N., Bois, B., Kiendrebeogo, T., Martin, C., Sanogo, S., Bastianelli, D., & Dossa, L. H. (2022). *Emission de méthane entérique en saison sèche froide chez les Zébus Peulh soudaniens en Afrique de l'Ouest*. Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, 26, 275-278. <https://journées3r.fr/spip.php?rubrique485>
- Gbenou, G. X., Assouma, M. H., Martin, C., Bastianelli, D., Bonnal, L., Kiendrebeogo, T., Sib, O., Bois, B., Sanogo, S., & Dossa, L. H. (2023). *Local feeding strategies allow to reduce enteric methane emission from cattle in Sahel*. 74th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science, Lyon, <https://eaap2023.org/wp-content/uploads/2023/08/EAAP2023-programme-booklet-1.pdf>
- Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. & Tempio, G. (2013). *Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. 139p. <https://www.fao.org/3/i3437e/i3437e.pdf>
- GIEC (2019). *Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Published: IPCC, Switzerland, ISBN 978-4-88788-232-4.
- Gill, F. L., Dewhurst, R. J., Evershed, R. P., McGeough, E., O'Kiely, P., Pancost, R. D., & Bull, I. D. (2011). Analysis of archaeal ether lipids in bovine faeces. *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 87-92. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.006>
- Gimelli, A., Pupin, R. C., Guizelini, C. C., Gomes, D. C., Franco, G. L., Vedovatto, M., Gaspar, A. O., & Lemos, R. A. A. (2023). Urea poisoning in cattle: A brief review and diagnostic approach. *Pesquisa Veterinária Brasileira* 43:e07228. <https://doi.org/10.1590/1678-5150-PVB-7228>
- Goopy, J. P., Chang, C., & Tomkins, N. W. (2016). Chapter 5: A Comparison of Methodologies for Measuring Methane Emissions from Ruminants. In T. S. Rosenstock, M. C. Rufino, K. Butterbach-Bahl, L. Wollenberg & M. Richards (dirs.), *Methods for Measuring Greenhouse Gas Balances and Evaluating Mitigation Options in Smallholder Agriculture* (97-117). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29794-1>
- Goopy, J. P., Korir, D., Pelster, D., Ali, A. I. M., Wassie, S. E., Schlecht, E., Dickhoefer, U., Merbold, L., & Butterbach-Bahl, K. (2020). Severe below-maintenance feed intake increases methane yield from enteric fermentation in cattle. *British Journal of Nutrition*, 123(11), 1239-1246. <https://doi.org/10.1017/S0007114519003350>
- Görs, S., Kuhla, B., Krattenmacher, N., Thaller, G., & Metges, C. C. (2016). Technical note: Analytical refinements of the methane indicator archaeol in bovine feces, rumen fluid, and feedstuffs. *Journal of Dairy Science*, 99(11), 9313-9318. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2016-11447>
- Grešáková, L., Holodová, M., Szumacher-Strabel, M., Huang, H., Ślósarz, P., Wojtczak, J., Sowińska, N., & Cieślak, A. (2021). Mineral status and enteric methane production in dairy cows during different stages of lactation. *BMC Veterinary Research*, 17(1), 287. <https://doi.org/10.1186/s12917-021-02984-w>
- Guyader, J., Eugène, M., Meunier, B., Doreau, M., Morgavi, D. P., Silberberg, M., Rochette, Y., Gerard, C., Loncke, C., & Martin, C. (2015). Additive methane-mitigating effect between linseed oil and nitrate fed to cattle. *Journal of Animal Science*, 93, 3564-3577. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8196>
- Hegarty, R. S., Goopy, J. P., Herd, R. M., & McCorkell, B. (2007). Cattle selected for lower residual feed intake have reduced daily methane production. *Journal of Animal Science*, 85(6), 1479-1486. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-236>
- Hristov, A. N., Oh, J., Giallongo, F., Frederick, T., Weeks, H., Zimmerman, P. R., Harper, M. T., Hristova, R. A., Zimmerman, R. S., & Branco, A. F. (2015). The use of an automated system (GreenFeed) to monitor enteric methane and carbon dioxide emissions from ruminant animals. *Journal of Visualized Experiments*, 103, 52904. <https://doi.org/10.3791/52904>
- Huhtanen, P., Ramin, M., & Hristov, A. N. (2019). Enteric methane emission can be reliably measured by the GreenFeed monitoring unit. *Livestock Science*, 222, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.01.017>
- INRA (2018). *Alimentation des ruminants : Apports nutritionnels - Besoins et réponses des animaux - Rationnement - Tables des valeurs des aliments*. Éditions Quae. 728p. ISBN : 978-2-7592-2867-6.
- INRAtion V5 Rumin'al (2020). *La référence des logiciels de rationnement des ruminants*. <https://www.inration-ruminal.fr/> accédé le 9 janvier 2024
- Johnson, K., Huyler, M., Westberg, H., Lamb, B., & Zimmerman, P. (1994). Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF6 tracer technique. *Environmental Science and Technology*, 28(2), 359-362.
- Jonker, A., Chagunda, M. G. G., Grobler, M., Waghorn, G. C., & van Wyngaard, J. D. (2020). Hand-held laser methane detector to determine methane plume concentrations from ruminants. In A. Jonker & G. C. Waghorn (dirs.), *Guideline for estimating methane emissions from individual ruminants using: GreenFeed, sniffers, hand-held laser detector and portable accumulation chambers*, 41- 47p, (New Zealand Agricultural Greenhouse Gas Research Centre, New Zealand). <https://globalresearchalliance.org/publication-library/?doctype=223&research-group=212>

- Laibi, A., Senou, M., Sagbo, E., Dahouda, M., Ahyi, V., & Tchangbedji, G. (2015). The use of clay as a methane emission mitigating feed additive in Djallonké rams. *Journal of Environmental Protection*, 06(10), 1176-1185. <https://doi.org/10.4236/jep.2015.610105>
- Maciel, I. C. dF., Barbosa, F. A., Tomich, T. R., Ribeiro, L. G. P., Alvarenga, R. C., Lopes, L. S., ... & Lana, A. M. Q. (2019). Could the breed composition improve performance and change the enteric methane emissions from beef cattle in a tropical intensive production system? *PLoS ONE*, 14(7): e0220247. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220247>
- Madsen, J., Bjerg, B. S., Hvelplund, T., Weisbjerg, M. R., & Lund, P. (2010). Methane and carbon dioxide ratio in excreted air for quantification of the methane production from ruminants. *Livestock Science*, 129(1-3), 223-227. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.01.001>
- Manafiazar, G., Zimmerman, S., & Basarab, J. A. (2017). Repeatability and variability of short-term spot measurement of methane and carbon dioxide emissions from beef cattle using GreenFeed emissions monitoring system. *Canadian Journal of Animal Science*, 97, 118-126. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1139/cjas-2015-0190>
- Martin, C. (2021). *Identification and validation of biomarkers for designing enteric methane mitigation strategies in cattle* [Oral presentation]. Annual Animal Nutrition Conference of Canada, Canada, May 10-14, <https://en.engormix.com/MA-feed-machinery/events/animal-nutrition-conference-canada-2021-t3510.htm>
- Martin, C., Brossard, L., & Doreau, M. (2006). Mécanismes d'apparition de l'acidose ruminale latente et conséquences physiopathologiques et zootechniques. *INRA Productions Animales*, 19(2), 93-108. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2006.19.2.3488>
- Marumo, J. L., LaPierre, P. A., & Van Amburgh, M. E. (2023). Enteric methane emissions prediction in dairy cattle and effects of monensin on methane emissions: A meta-analysis. *Animals*, 13, 1392. <https://doi.org/10.3390/ani13081392>
- Mathot, M., Decruyenaere, V., Lambert, R., & Stilmant, D. (2016). Deep litter removal frequency rate influences on greenhouse gas emissions from barns for beef heifers and from manure stores. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 233, 94-105. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.022>
- Montcho, M., Babatounde, S., Aboh, B. A., Chrysostome, A. A. M. C., & Mensah, G. A. (2016). Disponibilité, valeurs marchande et nutritionnelle des sous-produits agricoles et agroindustriels utilisés dans l'alimentation des ruminants au Bénin. *European Scientific Journal*, 12(33), 422. <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n33p422>
- Münger, A., Denninger, T., Martin, C., & Eggerschwiler, L. (2018). Émissions de méthane de vaches au pâturage : Comparaison de deux méthodes de mesure. *Recherche agronomique suisse* 9(6), 180-185. <https://www.agrarforschungschweiz.ch/fr/2018/06/emissions-de-methane-de-vaches-au-paturage-comparaison-de-deux-methodes-de-mesure/>
- Muñoz, C., Herrera, D., Hube, S., Morales, J., & Ungerfeld, E. M. (2018). Effects of dietary concentrate supplementation on enteric methane emissions and performance of late lactation dairy cows. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 78(3), 429-437. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392018000300429>
- N'Diaye, A. M., Gbangboche, A. B., Ogodja, O. J., & Hanzen, C. (2002). Fécondité de la vache Borgou au Bénin : Effet de l'âge au premier vêlage sur l'intervalle entre vêlages. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 55(2), 159. <https://doi.org/10.19182/remvt.9836>
- Naumann, H. D., Lambert, B. D., Armstrong, S. A., Fonseca, M. A., Tedeschi, L. O., Muir, J. P., & Ellersieck, M. R. (2015). Effect of replacing alfalfa with panicle-tick clover or sericea lespedeza in corn-alfalfa-based substrates on in vitro ruminal methane production. *Journal of Dairy Science*, 98(6), 3980-3987. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8836>
- Ndao, S., Traoré, E. H., Ickowicz, A., & Moulin, C.-H. (2020). Estimation of enteric methane emission factors for Ndama cattle in the Sudanian zone of Senegal. *Tropical Animal Health and Production*, 52(6), 2883-2895. <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02280-z>
- Negussie, E., de Haas, Y., Dehareng, F., Dewhurst, R. J., Dijkstra, J., Gengler, N., Morgavi, D. P., Soyeurt, H., van Gastelen, S., Yan, T., & Biscarini, F. (2017). Invited review: Large-scale indirect measurements for enteric methane emissions in dairy cattle: A review of proxies and their potential for use in management and breeding decisions. *Journal of Dairy Science*, 100, 2433-2453. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12030>
- Negussie, E., González-Recio, O., Battagin, M., Bayat, A.-R., Boland, T., de Haas, Y., Garcia-Rodriguez, A., Garnsworthy, P. C., Gengler, N., Kreuzer, M., Kuhla, B., Lassen, J., Peiren, N., Pszczola, M., Schwarm, A., Soyeurt, H., Vanlierde, A., Yan, T., & Biscarini, F. (2022). Integrating heterogeneous across-country data for proxy-based random forest prediction of enteric methane in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 105(6), 5124-5140. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20158>
- W. S., Zampaligre, N., Kere, M., Traore, K., Yoda, G. L. M., Gnanda, I. B., Bougouma-Yameogo, V. M. C., Balehegn, M., Adegbola, A., & Kebreab, E. (2022). *Enteric methane emissions from djallonke sheep fed diets with increasing level of metabolizable energy* [Oral presentation], 8th International Greenhouse Gas & Animal Agriculture Conference, Florida, USA, 5-9 Juin, <https://conference.ifas.ufl.edu/ggaa/>
- Rebello, L. R., Luna, I. C., Messina, J. D., Araujo, R. C., Simioni, T. A., Granja-Salcedo, Y. T., Vito, E. S., Lee, C., Teixeira, I. A. M. A., Rooke, J. A., & Berchielli, T. T. (2019). Effect of replacing soybean meal with urea or encapsulated nitrate with or without elemental sulfur on nitrogen digestion and methane emissions in feedlot cattle. *Animal Feed Science and Technology*, 257, 114293. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2019.114293>
- Ribeiro, R. S., Rodrigues, J. P. P., Maurício, R. M., Borges, A. L. C. C., Reis e Silva, R., Berchielli, T. T., Valadares Filho, S. C., Machado, F. S., Campos, M. M., Ferreira, A. L., Guimarães Júnior, R., Azevêdo, J. A. G., Santos, R. D., Tomich, T. R., & Pereira, L. G. R. (2020). Predicting enteric methane production from cattle in the tropics. *Animal*, 14, s438s452. <https://doi.org/10.1017/S1751731120001743>
- Savado, M., Zemmeling, G., Keulen, H. V., & Nianogo, A. J. (1999). Contribution of crop residues to ruminant feeding in different agroecological zones of Burkina Faso. *Revue d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, 52(34), 255-262. <https://doi.org/10.19182/remvt.9672>
- Sib, O., Vall, E., Bougouma-Yameogo, V. M. C., Blanchard, M., Navarro, M., & Gonzalez-Garcia, E. (2020). Establishing high-density protein banks for livestock in Burkina Faso (West Africa): Agronomic performance under contrasting edaphoclimatic conditions. *Agroforestry Systems*, 94, 319-333. <https://doi.org/10.1007/s10045-019-00394-4>
- SmartCow (2020). *An integrated infrastructure for increased research capability and innovation in the European cattle sector*. <https://www.smartcow.eu>, consulté le 11 Janvier 2024.
- Sorg, D., Mühlbach, S., Rosner, F., Kuhla, B., Derno, M., Meese, S., Schwarm, A., Kreuzer, M., & Swalve, H. (2017). The agreement between two next-generation laser methane detectors and respiration chamber facilities in recording methane concentrations in the spent air produced by dairy cows. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 262-272. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.024>
- Sun, X., Pacheco, D., Taylor, G., Janssen, P. H., & Swainson, N. M. (2022). Evaluation of feed near-infrared reflectance spectra as predictors of methane emissions from ruminants. *Animals*, 12, 2478. <https://doi.org/10.3390/ani12182478>
- Suzuki, T., Kamiya, Y., Oikawa, K., Nonaka, I., Shinkai, T., Terada, F., & Obitsu, T. (2021). Prediction of enteric methane emissions from lactating cows using methane to carbon dioxide ratio in the breath. *Animal Science Journal*, 92(1) e13637. <https://doi.org/10.1111/asj.13637>
- Suzuki, T., McCrabb, G., Nishida, T., Indramanee, S., & Kurihara, M. (2007). Construction and operation of ventilated hood-type respiration calorimeters for in vivo measurement of methane production and energy partition in ruminants. In *Measuring Methane Production from Ruminants*, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 125-135. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6133-2_8
- Tedeschi, L. O. (2019). Symposium: Future of data analytics in nutrition: Mathematical modeling in ruminant nutrition: approaches and paradigms, extant models, and thoughts for upcoming predictive analytics. *Journal of Animal Science*, 97(5), 1921-1944. <https://doi.org/10.1093/jas/skz092>
- Tellah, M., Mbaindingatoloum, F. M., & Logtene, Y. M. (2015). Âge au premier vêlage et intervalle entre vêlages de quatre races bovines en zone périurbaine de N'Djaména, Tchad. *Afriq Science*, 11(3), 229-240. <https://www.ajol.info/index.php/afsci/article/view/120098>

- Tongwane, M. I., & Moeletsi, M. E. (2020). Emission factors and carbon emissions of methane from enteric fermentation of cattle produced under different management systems in South Africa. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121931. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121931>
- Troy, S. M., Duthie, C. A., Ross, D. W., Hyslop, J. J., Roehe, R., Waterhouse, A., & Rooke, J. A. (2016). A comparison of methane emissions from beef cattle measured using methane hoods with those measured using respiration chambers. *Animal Feed Science and Technology*, 211, 227-240. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.12.005>
- Ulyatt, M. J., & Lassey, K. R. (2001). Methane emissions from pastoral systems: The situation in New Zealand. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 9(1), 118-126. https://ojs.alpa.uy/index.php/ojs_files/article/view/266.
- Vall, E., Salgado, P., Corniaux, C., Blanchard, M., Dutilly, C., & Alary, V. (2014). Changements et innovations dans les systèmes d'élevage en Afrique. *INRA Productions Animales*, 27(2), 161-174. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2014.27.2.3064>
- van Wyngaard, J. D. V., Meeske, R., & Erasmus, L. J. (2018a). Effect of concentrate feeding level on methane emissions, production performance and rumen fermentation of Jersey cows grazing ryegrass pasture during spring. *Animal Feed Science and Technology*, 241, 121-132. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.04.025>
- van Wyngaard, J. D. V., Meeske, R., & Erasmus, L. J. (2018b). Effect of concentrate level on enteric methane emissions, production performance, and rumen fermentation of Jersey cows grazing kikuyu-dominant pasture during summer. *Journal of Dairy Science*, 101(11), 9954-9966. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14327>
- Vanlierde, A., Dehareng, F., Gengler, N., Froidmont, E., McParland, S., Kreuzer, M., Bell, M., Lund, P., Martin, C., Kuhla, B., & Soyeurt, H. (2021). Improving robustness and accuracy of predicted daily methane emissions of dairy cows using milk mid-infrared spectra. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(8), 3394-3403. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10969>
- Washaya, S., Mupangwa, J., & Muchenje, V. (2018). Chemical composition of *Lablab purpureus* and *Vigna unguiculata* and their subsequent effects on methane production in Xhosa lop-eared goats. *South African Journal of Animal Science*, 48(3), 445. <https://doi.org/10.4314/sajas.v48i3.5>
- Zoungrana, S. R., Saadatou, D., Sib, O., Loabé Pahimi, A., Ouédraogo, S., Bougouma-Yaméogo, V. M., & Vall, E. (2023). Le CoProdScope : un outil de bilan et de conseil pour la gestion des co-produits de culture et d'élevage pour une intensification agroécologique des exploitations agropastorales. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 76, 1-10. <https://doi.org/10.19182/remvt.37167>

Résumé

Plusieurs méthodes ont été proposées pour la mesure *in vivo*, la prédiction et la réduction des émissions de méthane entérique (eCH_4) des ruminants. La plupart de ces méthodes sont coûteuses, techniquement complexes et parfois non adaptées aux spécificités des systèmes d'élevage en Afrique subsaharienne (ASS). L'objectif de cette synthèse est d'analyser les différentes techniques de mesure individuelle selon les conditions d'élevage en ASS. Les techniques de mesure individuelle *in vivo* regroupent la chambre respiratoire, la hotte ventilée, le système GreenFeed® (C-Lock) et l'hexafluorure de soufre comme traceur. Elles sont discutées et classées selon le terrain d'utilisation. Les approches de mesure indirecte de eCH_4 s'appuient sur des proxys (ou prédicteurs) issus de différentes matrices biologiques. En ASS, les proxys susceptibles d'être utilisés dans les différentes conditions d'élevage sont les caractéristiques de l'ingéré (quantité, composition), du lait (quantité, composition globale estimée par spectres MIR), des fèces (archéols, composition globale estimée par spectres SPIR) ou des gaz expirés. Par ailleurs, les stratégies potentielles de réduction de eCH_4 adaptées en ASS sont 1) l'utilisation de légumineuses arbustives, d'aliments concentrés à base de sous-produits, de coproduits et résidus de cultures, et de fourrages conservés ; 2) l'amélioration du pâturage ; 3) le remplacement des animaux improductifs ; 4) le maintien du bon état sanitaire des animaux ; et 5) la réduction de l'âge au premier vêlage des femelles.

Abstract

Adapted methods to quantify, predict and mitigate enteric methane in sub-Saharan Africa

Several methods have been proposed for *in vivo* measurement, prediction and mitigation of ruminant enteric methane (eCH_4) emissions. Most of these methods are expensive, technically complex and not adapted to the specificities of livestock systems in Sub-Saharan Africa (SSA). This review aims to analyze the different individual measurement techniques according to farming conditions in SSA. *In vivo* measurement techniques include the respiratory chamber, the ventilated hood, the GreenFeed system (C-Lock) and sulfur hexafluoride as a tracer. They are discussed and classified according to their field of application. The eCH_4 's indirect measurement approaches rely on proxies (or predictors) derived from different biological matrices. In SSA, the proxies likely to be used in the various rearing conditions are the characteristics of intake (quantity, composition), milk (quantity, global composition estimated by MIR spectra), faeces (archeols, global composition estimated by SPIR spectra) or exhaled gases. Furthermore, potential eCH_4 mitigation strategies adapted to SSA include 1) the use of tree legumes, by-product-based concentrates, crop co-products and residues, and preserved forages; 2) grazing improvement; 3) replacement of unproductive animals; 4) maintaining of animal good health; and 5) reducing of females first calving age.

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. (2024). 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>



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr>

La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, les pages et le DOI en respectant les informations figurant ci-dessus.