

Optimisation de l'utilisation des spectres moyen infrarouge du lait de vache pour prédire les émissions de méthane entérique mesurées par le système GreenFeed

COPPA M. (1), VANLIERDE A. (2), BOUCHON M. (3), JURQUET J. (4), MUSATI M. (5, 6), DEHARENG F. (2), MARTIN C. (6)

(1) Chercheur Indépendant, Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, UMR 1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

(2) Walloon Agricultural Research Centre, B-5030 Gembloux, Belgium

(3) INRAE, UE1414 Herbipôle, 63122 Saint-Genès-Champanelle, France

(4) Institut de l'Élevage, 49071 Beaucouzé cedex, France

(5) Department Di3A, University of Catania, 95123 Catania, Italy

(6) Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, UMR 1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

RESUME

Différents protocoles de traitement des données ont été testés pour optimiser la prédiction des émissions de méthane entérique (CH₄) mesurées avec le système GreenFeed (GF), par la spectroscopie moyen infrarouge (MIR) du lait de vache. La production laitière individuelle (PL) et la PL corrigée en matières grasses et protéiques (PLcor) ont été enregistrées quotidiennement sur 115 vaches Holstein nourries avec des rations présentant différents potentiels méthanogènes. Des échantillons de lait quotidien ont été collectés deux fois par semaine pour l'obtention des spectres MIR. Vingt mesures ponctuelles et consécutives de CH₄ au GF ont été prises comme unité de mesure de base (UMB) des émissions quotidiennes moyennes de CH₄ (g/j). Les équations de régressions ont été calibrées et validées sur 2 jeux de données indépendantes. Les modèles basés sur les spectres quotidiens ont été calibrés en utilisant des données de référence du CH₄ pour une durée de mesure de 1, 2, 3 ou 4 UMB. Des modèles construits à partir de la moyenne des spectres journaliers collectés pendant les périodes correspondantes de mesure du CH₄ ont également été développés. La correction des spectres par le stade de lactation (SL) et l'inclusion de la parité, PL et PLcor comme variables explicatives a été testée. L'allongement de la durée de la période de mesure du CH₄ au GF améliore les performances des équations de prédiction : le R² de validation (R²V) pour le CH₄ en g/j passe ainsi de 0,52 à 0,60 de 1 à 4 UMB. La moyenne des spectres MIR du lait collecté tout au long de la période correspondante de mesure du CH₄ a donné une meilleure prédiction que l'utilisation d'un seul spectre quotidien (R²V = 0,70 vs 0,60 pour le CH₄ en g/j sur 4 UMB). La correction des spectres quotidiens du SL a amélioré le R²V par rapport aux modèles équivalents non corrigés (R²V = 0,67 vs 0,60 pour le CH₄ en g/j sur 4 UMB). L'ajout d'autres informations phénotypiques n'a pas amélioré les performances des modèles construits sur les spectres quotidiens corrigés du SL. L'inclusion de la PL a amélioré les performances des modèles construits sur la moyenne des spectres (non corrigés du SL) enregistrés au cours de la période de mesure du CH₄ (R²V = 0,73 vs 0,70 pour le CH₄ en g/j sur 4 UMB).

Optimal use of milk mid-infrared spectra to predict enteric methane emission measured by GreenFeed system

COPPA M. (1), VANLIERDE A. (2), BOUCHON M. (3), JURQUET J. (4), MUSATI M. (5, 6), DEHARENG F. (2), MARTIN C. (6)

(1) Independent Researcher, Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, UMR 1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

SUMMARY

Different protocols for data processing have been tested to optimize the prediction of enteric methane (CH₄) emissions measured with GreenFeed (GF) system, by mid-infrared spectroscopy (MIR) on cow milk. Individual milk yield (MY) and fat and protein corrected milk (FPCM) were recorded daily on 115 Holstein cows fed diets with different methanogenic potentials. Day milk samples were analysed twice a week for MIR spectra collection. Twenty consecutive spot measurements of CH₄ emissions at GF were taken as the basic measurement unit (BMU) of the average daily CH₄ emissions (g/d). The regressions equations were calibrated and validated using 2 independent datasets. Models based on day spectra were calibrated using CH₄ reference data for a measurement duration of 1, 2, 3 or 4 BMU. Models built from the average of the day spectra collected during the periods of measurement of the corresponding CH₄ emissions have also been developed. The correction of the spectra by lactation stage (DIM) and the inclusion of parity, MY and FPCM as explanatory variables were tested. Extending the duration of the CH₄ emissions measurement with GF improves the performance of the prediction equations: the validation R² (R²V) for CH₄ emissions in g/d raised from 0.52 to 0.60 from 1 to 4 UMB. Averaging milk MIR spectra collected throughout the corresponding CH₄ measurement period gave better predictions than using single day spectra (R²V = 0.70 vs 0.60 for CH₄ in g/d on 4 BMU). Correcting day spectra by DIM improved the R²V compared to the equivalent DIM-uncorrected models (R²V = 0.67 vs 0.60 for CH₄ in g/d for 4 BMU). Adding other phenotypic information did not improve the performance of models built on day DIM-corrected spectra. The inclusion of the MY improved the performance of the models built on the average of the DIM-uncorrected spectra recorded during the period of CH₄ measurement (R²V = 0.73 vs 0.70 for CH₄ in g/d on 4 BMU).

INTRODUCTION

Parmi les différentes techniques de mesure des émissions de méthane entérique (CH₄), le système GreenFeed (GF ; C-Lock Inc., Rapid City, SD, USA) apparaît comme le plus approprié pour une application dans les élevages commerciaux, mais son utilisation à grande échelle reste encore difficile à acter. Des proxys pour prédire les émissions de CH₄ sur le terrain sont donc nécessaires. Entre autres, la spectroscopie infrarouge moyen (MIR) sur le lait a été identifiée comme prometteuse (Vanlierde et al., 2020). Le GF permet d'estimer les émissions quotidiennes moyennes de CH₄ sur une période de durée variable à partir d'échantillons ponctuels de gaz expirés prélevés lorsque les animaux visitent le système GF. Des études ont été menées pour optimiser la gestion des données GF afin d'obtenir une estimation représentative et reproductible du CH₄ (Coppa et al., 2021). Par contre, la meilleure façon d'aligner les données CH₄ aux spectres MIR du lait pour construire avec succès des équations de prédiction du CH₄ n'est pas connue. Aucune recherche n'a identifié le nombre de spectres qu'il est préférable d'associer à une donnée CH₄ moyenne mesurée au GF sur plusieurs jours (spectres quotidiens, ou spectres moyens pendant la période correspondante de mesure au GF). Enfin, l'effet de variables phénotypiques (stade de lactation (SL), parité, production laitière (PL)) sur les performances des modèles de prédiction MIR, basées sur des données GF n'est pas connu. L'objectif de ce travail était de tester différents protocoles méthodologiques, à la fois en termes de données GF et de spectres MIR du lait afin d'identifier la meilleure approche pour prédire les émissions de CH₄ mesurées avec le système GF à partir des spectres MIR du lait de vache.

1. MATERIEL ET METHODES

La PL individuelle et la PL corrigée en matières grasses et protéiques (PLcor) ont été enregistrées quotidiennement sur 115 vaches Holstein nourries avec des rations présentant différents potentiels méthanogènes, en s'appuyant sur plusieurs expérimentations ayant utilisées les mêmes unités GreenFeed (GF 33 et GF 34, UMRH INRAE) de répétabilité et reproductibilité connues (Coppa et al., 2021). Des échantillons de lait quotidien (traites matin + soir) ont été collectés deux fois par semaine (selon le calendrier des analyses en routine du contrôle laitier) pour l'obtention des spectres MIR. Un minimum de vingt mesures ponctuelles et consécutives de CH₄ au GF a été pris comme unité de mesure de base (UMB) des émissions quotidiennes moyenne de CH₄ (g/j). Les équations, développées par régression *Partial Least Square* (PLS), ont été calibrées et validées sur 2 jeux de données indépendantes, en sélectionnant 2 groupes d'animaux homogènes pour leurs émissions de CH₄ et paramètres zootechniques au sein de chaque régime alimentaire. Les modèles basés sur les spectres quotidiens ont été calibrés en utilisant des données de référence du CH₄ de 1, 2, 3 ou 4 UMB, correspondant à un minimum de 20, 40, 60 et 80 mesures ponctuelles de CH₄, respectivement. Des modèles construits à partir de la moyenne des spectres journaliers collectés pendant les périodes correspondantes de mesure du CH₄ ont également été développés. La correction des spectres par le SL, la parité, PL et PLcor comme variables explicatives ont été testées sur les spectres corrigés par le SL ou non corrigés.

2. RESULTATS

L'allongement de la période de mesure du CH₄ au GF améliore le R² de validation (R²V) pour le CH₄ en g/j qui varie de 0,52 à 0,60 de 1 à 4 UMB. Les erreurs standard de prédiction corrigées par le biais (SEPC) restent cependant équivalentes passant de 61,7 à 61,4 g/j (Tableau 1). La moyenne des spectres MIR de laits collectés sur la période correspondante de mesure du CH₄ a donné une équation présentant de meilleures performances de prédiction que lorsqu'un seul spectre quotidien était considéré (R²V = 0,70 vs 0,6 ; SEPC =

53,1 vs 63,4 g/j ; pente 1,25 vs 1,34 pour le CH₄ sur 4 UMB ; Tableau 2). La correction des spectres quotidiens par le SL a amélioré le R²V par rapport aux modèles équivalents non corrigés (R²V = 0,67 vs 0,60 pour le CH₄ en g/j sur 4 UMB ; Tableau 3) et réduit les SEPC (SEPC min 52,2 vs 61,4 g/j). Lorsque les spectres ont été moyennés pendant une durée de mesure de CH₄ de 3 ou 4 UMB, les R²V étaient plus élevés pour le modèle utilisant des spectres non corrigés du SL par rapport aux spectres corrigés (0,66 vs 0,62 et 0,70 vs 0,68, pour 3 ou 4 UMB, respectivement ; Tableau 3). L'ajout d'autres informations phénotypiques n'a pas amélioré les performances des modèles construits sur les spectres quotidiens corrigés du SL (Tableau 4). L'inclusion de la parité a amélioré les performances des modèles construits sur la moyenne des spectres (non corrigés du SL) enregistrés au cours de la période de mesure du CH₄ (R²V = 0,73 vs 0,70 ; SEPC < 50 vs >52 g/j pour le CH₄ sur 4 UMB ; Tableau 4).

3. DISCUSSION

L'amélioration des performances du modèle lors de l'augmentation de la durée de mesure du CH₄ peut être due à l'augmentation parallèle de la répétabilité de la mesure du CH₄ au GF lorsque le nombre de mesures ponctuelles augmente (Coppa et al., 2021). Comme la mesure de CH₄ au GF exprime une estimation des émissions journalières moyennes pendant la période de mesure, la moyenne des spectres du lait peut réduire la variation quotidienne de la composition du lait et fournir une meilleure correspondance avec les données moyennes de CH₄. Les meilleures performances des modèles, lorsque la correction du SL est appliquée aux spectres journaliers, peuvent provenir d'une moindre influence du SL sur les résidus (Vanlierde et al., 2020). La correction SL des spectres moyennés pendant une période de mesure de CH₄ a amélioré les performances du modèle uniquement sur des courtes durées. Cela n'est pas surprenant, car sur des périodes longues, plusieurs facteurs externes et la variation de l'état physiologique de l'animal peuvent interférer, réduisant l'importance du SL comme facteur explicatif. La perte de performance des modèles basés sur les spectres journaliers corrigés par le SL, lorsqu'on inclue la PL ou PLcor comme facteurs explicatifs supplémentaires, suggère une partielle redondance d'information entre SL et PL. Shetty et al. (2017) ont ajouté au spectre MIR la PL, le SL et la parité comme variables explicatives supplémentaires pour améliorer les modèles développés à partir des mesures CH₄ réalisées au « sniffer » ; ils ont obtenu de modestes résultats. Une amélioration des performances a été montrée par Vanlierde et al. (2020), sur des modèles développés à partir des données CH₄ mesurées avec la méthode des enceintes respiratoires et du gaz traceur SF₆, en rajoutant la PL et la parité sur des spectres corrigés par le SL. En revanche dans notre étude, les performances de prédiction ont été améliorées en utilisant la moyenne des spectres journaliers non corrigée du SL pour une durée de mesure du CH₄ de 4 UMB et incluant la parité, PL, ou PLcor. Ces résultats suggèrent que le SL serait très informatif lors de la mesure des spectres et des émissions de CH₄ au jour le jour, en particulier en début de lactation (Vanlierde et al., 2020), alors que la parité, le PL ou le PLcor peuvent être plus informatifs que le SL lorsque les spectres sont moyennés sur une durée plus longue.

CONCLUSION

Une longue durée de mesure du CH₄ au GF est utile pour optimiser les performances prédictives des spectres MIR du lait. Il est préférable de moyenner plusieurs spectres collectés tout au long de la période de mesure du CH₄ au GF pour améliorer les prédictions. Si un seul spectre journalier est disponible, la correction des spectres journaliers par le SL permet d'augmenter les performances du modèle. L'ajout d'informations phénotypiques en tant que variables explicatives supplémentaires n'a pas amélioré davantage les performances des modèles construits sur des spectres

quotidiens corrigés du SL. D'autre part, les meilleures performances prédictives ont été obtenues en ajoutant la PL aux modèles construits sur la moyenne des spectres (non corrigés du SL) enregistrés pendant la période de mesure du CH₄ correspondante. Un enrichissement des populations des données de CH₄ et spectrales, en augmentant leur variabilité (par exemple en élargissant la gamme des régimes alimentaires des vaches, etc.) pourrait améliorer les

performances des modèles. La race pourrait également être testée comme une variable explicative supplémentaire.

Coppa M., Jurquet J., Eugène M., Dechaux T., Rochette Y., Lamy J.M., Ferlay A., Martin C. 2021 Methods 186, 59–67.

Shetty N., Difford G., Lassen J., Løvendahl P., Buitenhuis A. J. 2017 J. Dairy Sci. 100, 9052–9060.

Vanlierde A., Dehareng F., Gengler N., Froidmont E., McParland S., Kreuzer M., Bell M., Lund P., Martin C., Kuhla B., Soyeurt H. 2020. J. Sci. Food Agric.101 (8).

Durée de mesure du CH ₄ ¹	Calibration ²						Validation ³					
	n	SEC	R ² C	SECV	R ² CV	RPDCV	n	biais	pente	SEP	SEPC	R ² V
UMB 1	334	50,1	0,58	53,9	0,51	1,43	171	-8,7	1,03	62,1	61,7	0,52
UMB 2	215	45,4	0,58	49,4	0,51	1,42	110	-14,1	1,09	64,1	62,8	0,49
UMB 3	187	49,2	0,52	52,3	0,45	1,35	94	-15,0	1,27	63,1	61,6	0,55
UMB 4	162	52,7	0,49	55,1	0,44	1,33	78	-14,3	1,34	62,7	61,4	0,60

Tableau 1 Statistiques de calibration et de validation des équations de prédiction des émissions de CH₄ entérique basées sur des spectres MIR quotidiens du lait, selon la durée de mesure du CH₄ (g/j).

¹UMB, Unité de mesure de base = temps nécessaire pour atteindre 20 mesures ponctuelles de CH₄ par le système GreenFeed.

²n, nombre d'échantillons inclus dans le jeu de calibration ; SEC, erreur standard pour la calibration ; R²C, coefficient de détermination pour la calibration ; SECV, erreur standard pour la validation croisée ; RPD, le rapport de l'écart type des données de référence à la SECV ; R²CV, coefficient de détermination pour la validation croisée.

³SEP, erreur standard de prédiction en validation ; SEPC, SEP corrigé du biais ; R²V, coefficient de détermination en validation :

Durée de mesure du CH ₄ ¹	Calibration ²						Validation ³					
	n	SEC	R ² C	SECV	R ² CV	RPDCV	n	biais	pente	SEP	SEPC	R ² V
UMB 1	335	49,8	0,58	53,8	0,51	1,43	171	-4,1	0,99	60,9	61,0	0,53
UMB 2	217	45,2	0,61	48,2	0,56	1,50	110	-6,8	1,04	63,4	63,3	0,48
UMB 3	187	40,6	0,68	46,4	0,58	1,55	94	-6,2	1,12	53,0	52,9	0,66
UMB 4	163	42,2	0,67	46,5	0,59	1,57	78	-7,7	1,25	53,3	53,1	0,70

Tableau 2 Statistiques de calibration et de validation des équations de prédiction des émissions de CH₄ entérique basées sur la moyenne des spectres MIR du lait collecté pendant différentes durées de mesure du CH₄ (g/j).

Durée de mesure du CH ₄ ¹	Calibration ²						Validation ³					
	n	SEC	R ² C	SECV	R ² CV	RPDCV	n	biais	pente	SEP	SEPC	R ² V
Spectres quotidiens corrigé par le stade de lactation												
UMB 1	340	58,5	0,44	61,0	0,39	1,28	171	-10,5	1,11	66,2	65,5	0,46
UMB 2	214	38,6	0,72	44,7	0,62	1,61	110	-7,6	1,11	56,9	56,6	0,59
UMB 3	184	37,7	0,71	44,7	0,60	1,58	94	-17,7	1,22	54,9	52,2	0,68
UMB 4	158	43,2	0,66	46,5	0,60	1,59	78	-17,5	1,31	58,8	56,5	0,67
Moyenne des spectres collectés pendant les UMB, corrigée par le stade de lactation												
UMB 1	335	50,0	0,58	55,5	0,48	1,39	171	-1,0	1,01	59,3	59,5	0,55
UMB 2	219	45,4	0,60	49,7	0,52	1,45	110	-4,2	1,09	58,2	58,3	0,56
UMB 3	196	40,2	0,68	44,2	0,62	1,62	94	-4,9	1,08	54,7	54,8	0,62
UMB 4	170	51,1	0,51	52,5	0,49	1,40	78	-9,8	1,36	56,1	55,5	0,68

Tableau 3 Statistiques de calibration et de validation des équations de prédiction des émissions de CH₄ entérique basées sur des spectres MIR quotidiens du lait ou sur la moyenne des spectres collectés pendant différentes durées de mesure du CH₄ (g/j), corrigés par le stade de lactation

Variable phénotypique ¹	Calibration ²						Validation ³					
	n	SEC	R ² C	SECV	R ² CV	RPDCV	n	biais	pente	SEP	SEPC	R ² V
Spectres quotidiens corrigé par le stade de lactation vs CH ₄ mesurée sur 4 UBM												
Parité	160	50,8	0,49	52,4	0,46	1,36	78	-15,1	1,46	60,0	58,4	0,67
PL	161	52,7	0,48	55,2	0,42	1,32	78	-15,6	1,31	64,0	62,5	0,58
PLcor	161	52,6	0,48	55,3	0,42	1,32	78	-15,7	1,31	64,1	62,6	0,58
Parité + PL	160	51,6	0,48	53,2	0,45	1,35	78	-15,3	1,35	63,2	61,8	0,60
Parité + PLcor	161	52,5	0,48	55,1	0,42	1,32	78	-15,8	1,31	63,2	61,6	0,59
Moyenne des spectres collectés pendant les UMB, non corrigée par le stade de lactation vs CH ₄ mesurée sur 4 UMB												
Parité	158	37,6	0,72	44,7	0,61	1,60	78	-11,4	1,09	49,4	48,4	0,73
PL	160	38,5	0,72	46,0	0,60	1,59	78	-8,3	1,16	50,9	50,5	0,72
PLcor	160	38,5	0,72	46,0	0,60	1,59	78	-8,6	1,16	50,8	50,4	0,72
Parité + PL	161	38,1	0,73	46,6	0,59	1,56	78	-9,7	1,13	50,1	49,5	0,72
Parité + PLcor	161	38,1	0,73	46,6	0,59	1,56	78	-9,7	1,13	50,3	49,6	0,72

Tableau 4 Statistiques de calibration et de validation des équations de prédiction des émissions de CH₄ entérique basées sur des spectres MIR quotidiens du lait ou sur la moyenne des spectres collectés pendant différentes durées de mesure du CH₄ (g/j), et l'ajout des variables explicatives phénotypiques supplémentaires.