

Relations entre émissions de méthane entérique et efficacité alimentaire chez des génisses charolaises en croissance

RENAND G. (1), VINET A. (1), MAUPETIT D. (2)

(1) UMR 1313 GABI, 78352 Jouy en Josas, France

(2) UE 332 Domaine de la Sapinière, 18390 Osmoy, France

RESUME

Sur le domaine INRA de la Sapinière, 153 génisses charolaises de 22 mois ont été contrôlées individuellement pendant huit semaines dans une stabulation équipée de portillons Calan pour mesurer les consommations individuelles de fourrage et de systèmes GreenFeed pour mesurer les émissions individuelles de méthane entérique. Le contrôle de l'ingestion s'est fait avec un ensilage de graminées (mélange dactyle-fétuque) distribué à volonté. Les émissions de méthane entérique ont été mesurées lors de courtes visites (3,9 minutes en moyenne) aux systèmes GreenFeed. Les génisses étaient attirées avec un aliment condensé distribué à raison de 125,5 g en moyenne à chaque visite. Au cours des huit semaines de contrôle leur émission a ainsi été mesurée lors de 208,5 visites en moyenne. L'émission de méthane entérique quotidienne (MEQ) de chaque génisse a été estimée à l'aide d'un modèle linéaire incluant l'heure et le jour de la mesure simultanément à l'effet de la génisse. Avec un poids moyen (PM) de 521 kg et une consommation moyenne quotidienne (CMQ) de matière sèche de 7,8 kg, dont 7,3 kg d'ensilage et 0,5 kg d'aliment condensé, les génisses ont réalisé un gain moyen quotidien (GMQ) de 970 g/j. Trois critères d'efficacité alimentaire ont été calculés : l'indice d'efficacité alimentaire ($IEA = GMQ/CMQ$), la croissance résiduelle (RGMQ) égale à la résiduelle de la régression de GMQ sur CMQ et la consommation résiduelle (CR) égale à la résiduelle de la régression multiple de CMQ sur PM et GMQ. La corrélation de +0,47 entre MEQ et GMQ indique que les génisses qui ont les vitesses de croissance les plus élevées émettent le plus de méthane entérique. Or les émissions de méthane entérique comme le gain de poids sont corrélées avec l'ingestion : +0,29 et +0,36 respectivement. Les émissions ont été rapportées à l'ingestion au moyen soit de l'indice d'émission ($IEME = MEQ/CMQ$), soit de l'émission résiduelle (RMEQ) égale à la résiduelle de la régression de MEQ sur CMQ. Des corrélations positives assez élevées ont été mises en évidence entre les indices IEA et IEME d'une part (+0,62) et entre les résiduelles RGMQ et RMEQ d'autre part (+0,41). La consommation résiduelle (CR) était quand à elle indépendante de MEQ (-0,07) et négativement corrélée avec RMEQ (-0,33). Il apparaît donc que les génisses les plus efficaces à utiliser leur ration de fourrage pour assurer leur croissance émettent plus de méthane entérique que les génisses de moindre efficacité alors qu'une relation inverse est souvent évoquée entre ces deux caractères sans toutefois faire l'objet d'un consensus.

Relationship between enteric methane emissions and feed efficiency of growing Charolais beef heifers

RENAND G. (1), VINET A. (1), MAUPETIT D. (2)

(1) UMR 1313 GABI, 78352 Jouy en Josas, France

SUMMARY

At the INRA experimental farm of Bourges, 153 charolais beef heifers aged 22 months were tested indoors where feed intake was recorded using Calan gates and enteric methane emission was recorded using GreenFeed Emission Monitoring (GEM) systems for eight weeks. Heifers received a grass silage (cultivated dactyle-fescue) diet distributed *ad libitum*. Methane emission was recorded during short visits (3.9 minutes on average) to the GEM feeder where 125.5 g. of pellets were delivered on average at each visit. During the eight week testing period, 208.5 spot measures of methane emission were recorded on average per heifer. Heifers' daily methane emission was estimated using all the spot measures in a model adjusted for the day and hour of measurement in addition to the heifer effect. Average performances were the following: 521 kg for mid test body weight (PM); 970 g/d for daily weight gain (GMQ); 7.8 kg for dry matter intake (MSI) of which 7.3 kg were silage and 0.5 kg were pellet dry matter. Three efficiency parameters were computed: the feed efficiency ratio ($IEA = GMQ/MSI$); the residual growth (RGMQ) that is the residual of the regression of GMQ on MSI; the residual feed intake (CR) that is the residual of the multiple regression of MSI on PM and GMQ. Fast growing heifers had high methane emission as evidenced by the +0.47 correlation between GMQ and CH₄. Part of this correlation may be a consequence of the positive relationship of both traits with feed intake (MSI): +0.36 for daily gain (GMQ) and +0.29 for methane emission (CH₄). Two methane emission parameters were adjusted for intake: the methane yield ($ICH_4 = CH_4/MSI$) and the residual methane (RCH₄) that is the residual of the regression of CH₄ on MSI. Positive correlations were found between IEA and ICH₄ (+0.62) and between RGMQ and RCH₄ (+0.41). Residual feed intake (CR) was found independent with CH₄ (-0.07) and moderately, but negatively, correlated with RCH₄ (-0.33). The heifers that were the most efficient in using their forage diet for growing were emitting slightly more enteric methane as compared to the less efficient heifers. These results did not support the positive relationship sometimes claimed between RFI and methane emission.

INTRODUCTION

Le maintien d'une production de viande bovine durable en France passe par une utilisation maximale de l'herbe pâturée et de fourrages grossiers dans l'alimentation des animaux conjointement à une réduction de l'empreinte carbone des élevages. Or ces rations à fortes teneurs en parois végétales sont aussi celles qui sont à l'origine des émissions de méthane entérique les plus élevées. En France, environ 40% de l'empreinte carbone des élevages allaitants est liée aux émissions de méthane entérique (Nguyen *et al.*, 2012). L'amélioration de l'efficacité alimentaire des bovins allaitants sur de telles rations représente un enjeu capital pour réduire les charges alimentaires et un espoir pour réduire également les rejets d'éléments polluants (déjections et méthane entérique) à la suite d'une meilleure utilisation des aliments pour assurer les besoins d'entretien et de production.

Pour améliorer l'efficacité alimentaire des bovins allaitants la consommation résiduelle est le critère de sélection privilégié car elle permet de réduire la consommation d'aliments à performances de croissance identiques (Arthur *et al.*, 2001). Les émissions de méthane réduisent d'autant l'énergie métabolisable disponible et, pour des rations à base de fourrages, peuvent représenter 6 à 7% de l'énergie brute ingérée par de jeunes bovins en croissance (Rooke *et al.*, 2014, McDonnell *et al.*, 2016, Mercadante *et al.*, 2016). De ce fait il a été suggéré qu'à toute réduction de la consommation résiduelle puisse être associée une réduction des émissions de méthane entérique (Herd *et al.*, 2002).

Le présent travail vise à apporter des résultats expérimentaux originaux sur la relation entre consommation résiduelle et émission de méthane entérique chez des génisses charolaises alimentées avec un fourrage grossier.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Cinq cohortes de 22 à 36 génisses charolaises du domaine expérimental de l'INRA à Bourges ont été contrôlées à 22 mois dans une stabulation équipée de portillons Calan pour mesurer leur ingestion avec un fourrage grossier. Après quatre semaines d'adaptation elles ont reçu *ad libitum* une ration constituée uniquement d'un ensilage de graminées (dactyle-fétuque). Les apports étaient pesés quotidiennement et les refus trois fois par semaine. A chaque contrôle des refus, des échantillons d'ensilage et de refus étaient prélevés pour mesurer leur teneur en matière sèche et ainsi déterminer la matière sèche d'ensilage ingérée pendant les contrôles. Pour éviter tout biais sur la mesure de l'ingestion, la litière était constituée de copeaux de bois. Après une double pesée à l'entrée en contrôles, les génisses ont été pesées toutes les deux semaines. La durée des contrôles était fixée à douze semaines, mais un problème avec le système de distribution pour l'une des cohortes a contraint de limiter les analyses aux huit premières semaines.

Logées par 10 à 12 par case, ces génisses avaient accès à trois systèmes GreenFeed. Ces systèmes développés par la société C-Lock (C-Lock Inc, 2016) permettent d'obtenir une mesure du flux de méthane émis lorsque les animaux visitent ces systèmes. Pour cela ils sont attirés avec un aliment condensé distribué dans une auge protégée par une enceinte semi-ouverte soumise à un flux continu d'air aspirant. La vitesse de l'air dans le conduit d'évacuation ainsi que la concentration en méthane dans cette colonne d'air sont enregistrés toutes les secondes. Ces mesures sont utilisées pour calculer le flux moyen de méthane émis lors de la visite. Chaque animal dispose ainsi d'une mesure ponctuelle du flux de méthane émis pour chacune de ses visites au GreenFeed. Un capteur infrarouge de la position de la tête est utilisé afin de ne conserver que les mesures ponctuelles réalisées quand l'animal est correctement positionné au fond de l'auge pour s'assurer que tous les gaz exhalés par l'animal sont bien

captés par le flux d'air. A chaque visite les génisses recevaient cinq portions de 25 g. environ d'un aliment condensé (29% luzerne déshydratée, 27% d'issues de céréales, 23% pulpe betterave, 12% son de blé). Les portions étaient espacées de 45 secondes afin que le flux de méthane puisse être mesuré pendant trois minutes au moins. Le nombre de visites par jour a été limité à quatre avec un intervalle entre visites de six heures minimum.

1.2. VARIABLES ANALYSEES

Les poids de chaque génisse furent régressés sur la durée de présence en contrôle pour estimer le gain moyen quotidien (GMQ). Le poids à mi-contrôle (PM) a été calculé à partir du poids à l'entrée et du gain de poids pendant 28 jours. La consommation moyenne quotidienne (CMQ) de matière sèche (MS) a été obtenue en additionnant les quantités de matière sèche de l'aliment et d'ensilage ingérées. L'efficacité alimentaire a été appréciée à partir de trois variables. L'indice d'efficacité alimentaire (IEA) est égal au rapport du gain de poids sur l'ingéré : $IEA = GMQ/CMQ$. Le gain moyen quotidien résiduel (RGMQ) est égal au résidu de la régression du gain de poids (GMQ) sur l'ingéré (CMQ), c'est-à-dire la capacité à croître plus ou moins vite par rapport à la croissance attendue compte tenu de la MS ingérée. La consommation résiduelle (CR) est égale au résidu de la régression multiple de la MS ingérée (CMQ) sur le poids moyen (PM) et le gain de poids (GMQ), c'est-à-dire la capacité à avoir eu besoin de plus ou moins d'aliment par rapport à la quantité attendue compte tenu du poids (PM) et du gain de poids (GMQ) observés.

Pour chaque génisse un grand nombre de mesures ponctuelles d'émission de méthane réparties sur toute la durée des contrôles et sur différentes heures de la journée et de la nuit ont été enregistrées. Les émissions n'étant pas constantes entre jours et surtout entre heures de la journée, le flux moyen de méthane entérique quotidien (MEQ) des génisses a été estimé à partir des moyennes des moindres carrés obtenues dans un modèle linéaire incluant le jour et l'heure de mesure de toutes les mesures ponctuelles analysées conjointement. Les émissions de méthane entérique dépendant de la quantité d'aliment ingéré, deux critères ont été calculés pour prendre en compte cette relation : l'indice d'émission de méthane entérique qui est le rapport de l'émission moyenne quotidienne (MEQ) à la quantité de MS ingérée (IEME = MEQ/CMQ) et l'émission résiduelle de méthane (RMEQ) qui est égale au résidu de la régression de MEQ sur CMQ, c'est-à-dire la disposition à émettre plus ou moins de méthane par rapport à la quantité attendue compte tenue de la MS ingérée.

1.3. ANALYSES STATISTIQUES

Chacune des six variables d'efficacité alimentaire et des trois variables relatives aux émissions de méthane entérique ont été ajustées pour l'effet du groupe de contemporaines, c'est-à-dire le lot de génisses de la même cohorte contrôlées dans la même case. Les corrélations de Pearson ont été calculées entre ces variables ajustées.

Pour illustrer l'impact sur les autres variables d'un classement des génisses sur leur consommation résiduelle (CR), elles ont été classées en trois groupes dont deux groupes extrêmes : les génisses les plus efficaces avec une CR < -0,5 écart-type (CR-B) et les génisses les moins efficaces avec une CR > 0,5 écart-type (CR-H). Le contraste entre ces deux groupes extrêmes a été estimé dans un modèle incluant le groupe de contemporaine et les effets des trois groupes.

2. RESULTATS

2.1. PERFORMANCES DES GENISSES

Sur les 166 génisses contrôlées sur leur efficacité alimentaire, seules 153 ont été prises en compte pour analyser les relations entre efficacité et émission de méthane

car huit génisses ne sont jamais venues aux GreenFeed et cinq autres n'y sont venues qu'après plusieurs semaines. L'âge moyen des génisses au début des contrôles était de 675 ± 17 jours. Les performances moyennes sont rapportées dans le tableau 1. Les 7,83 kg/j de MS ingérés par jour sont constitués par $7,35 \pm 1,38$ kg/j d'ensilage d'herbe et $0,52 \pm 0,13$ kg/j d'aliment condensé. Cette ration a permis une croissance de 970 g/j, soit un indice d'efficacité alimentaire de 127 g de croissance par kg de MS ingérée. La variabilité de la consommation et de la vitesse de croissance sont du même ordre de grandeur : CV=15,3% et CV=18,8% respectivement. La régression de CMQ sur PM et GMQ montre qu'environ un quart ($R^2=0,24$) de la variabilité de l'ingéré est expliquée par ces deux variables. La variabilité de la consommation résiduelle, à même PM et même GMQ, est légèrement plus faible (CV=13,3%) que celle de la consommation moyenne quotidienne (CV=15,3%). La variabilité des émissions de méthane est deux fois plus faible (CV=9,1%) que celle des performances de croissance.

Tableau 1 Performances moyennes des 153 génisses

		moyenne	écart-type	CV*
CR	kg/j	0	1,04	13,3 %
PM	kg	521	49	8,4 %
GMQ	g/j	970	253	18,8 %
RGMQ	g/j	0	170	17,5 %
CMQ	kg/j	7,83	1,35	15,3 %
IEA	g/kg	127	36	21,7 %
MEQ	g/j	198	31	9,1 %
RMEQ	g/j	0	17	8,7 %
IEME	g/kg	26	7	18,7 %

CV* = écart-type intra groupe de contemporain/moyenne

2.2. RELATIONS ENTRE PERFORMANCES

Les corrélations entre les six variables relatives à l'efficacité alimentaire et les trois variables relatives aux émissions de méthane entérique sont rapportées dans le tableau 2. Compte tenu de la puissance du dispositif expérimental mis en œuvre, les coefficients de corrélation de valeur absolue $|r| > 0,25$ sont très hautement significatifs.

Les trois variables de base de l'efficacité (PM, GMQ et CMQ) présentent des corrélations positives comprises entre 0,36 et 0,49 et chacune d'elle est positivement corrélée avec l'émission moyenne quotidienne de méthane (MEQ) : +0,69 pour PM, +0,47 pour GMQ et +0,29 pour CMQ. Prises conjointement ces trois variables expliquent la moitié ($R^2=0,50$) de la variabilité des émissions de méthane.

L'indice d'efficacité alimentaire (IEA), classiquement utilisé pour caractériser l'aptitude à utiliser les rations, présente une faible relation positive (+0,25) avec l'émission moyenne quotidienne (MEQ) mais nettement plus élevée (+0,62) avec l'indice d'émission de méthane (IEME).

Après correction par régression sur la quantité d'aliment ingéré, le gain moyen résiduel (RGMQ) présente une corrélation avec l'émission moyenne quotidienne (MEQ) à peine inférieure (+0,40) que celle du GMQ (+0,47). La corrélation entre RGMQ et l'émission résiduelle de méthane (RMEQ) est du même niveau (+0,41).

Tableau 2 Corrélations entre performances

	PM	GMQ	RGMQ	CMQ	CR	IEA	MEQ	RMEQ	IEME
PM	1,00								
GMQ	0,49	1,00							
RGMQ	0,34	0,93	1,00						
CMQ	0,47	0,36	0,00	1,00					
CR	0,00	0,00	-0,33	0,87	1,00				
IEA	0,11	0,63	0,85	-0,46	-0,70	1,00			
MEQ	0,69	0,47	0,40	0,29	-0,07	0,25	1,00		
RMEQ	0,58	0,39	0,41	0,00	-0,33	0,39	0,96	1,00	
IEME	-0,02	-0,05	0,25	-0,78	-0,88	0,62	0,31	0,56	1,00

$|r| > 0,17$ * [$P < 0,05$] ; $|r| > 0,21$ ** [$P < 0,01$] ; $|r| > 0,25$ *** [$P < 0,001$]

Les corrélations entre la consommation résiduelle et les trois variables relatives aux émissions de méthane diffèrent nettement selon le critère pris en compte. La CR est indépendante (-0,07) de l'émission moyenne quotidienne (MEQ). Elle est négativement corrélée avec l'émission résiduelle de méthane (RMEQ : -0,33) et surtout avec l'indice d'émission de méthane (IEME : -0,88).

2.3. DIFFERENCES ENTRE GROUPES D'EFFICIENCE EXTREME

Le classement des 153 génisses sur leur consommation résiduelle (CR) permet de distinguer le quart des génisses les plus efficaces ($n=38$) avec une consommation résiduelle $CR < -0,53$ kg/j qui se différencie du quart des génisses les moins efficaces ($n=42$) avec une $CR > 0,51$ kg/j. Les différences pour toutes les variables pour ces deux groupes de génisses sont rapportées dans le tableau 3.

Tableau 3 Différences entre les groupes de génisses efficaces (CR-B) et inefficaces (CR-H)

		CR-B n=38	CR-H n=42	L-H*	Prob > t
CR	kg/j	-1,31	1,18	-32 %	$P < 0,0001$
PM	kg	532	534	0 %	$P = 0,82$
GMQ	g/j	947	981	-3 %	$P = 0,44$
RGMQ	g/j	50	-55	+11 %	$P = 0,009$
CMQ	kg/j	6,62	9,17	-32 %	$P < 0,0001$
IEA	g/kg	145	107	+31 %	$P < 0,0001$
MEQ	g/j	200	200	0 %	$P = 0,94$
RMEQ	g/j	7	-3	+5 %	$P = 0,009$
IEME	g/kg	31	22	+37 %	$P < 0,0001$

L-H* = écart (CR-H – CR-B) rapporté à la moyenne de ces deux groupes

Comme attendu, ces génisses ont les mêmes performances de croissance (PM et GMQ) alors que groupe des génisses les plus efficaces présente une supériorité de +30% pour les trois critères d'efficacité calculés. Il n'y a pas de différence d'émission entre ces deux groupes quand on considère les émissions moyennes quotidiennes (MEQ). Par contre les différences deviennent très significatives dès que les quantités de MS ingérées sont prises en compte : +5% pour l'émission résiduelle (RMEQ) et +37% pour l'indice d'émission (IEME). Le signe positif de ces corrélations indique que les génisses nécessitant moins d'aliment pour réaliser leur croissance, sont aussi celles qui émettent le plus de méthane entérique à même ingestion.

3. DISCUSSION

Le premier facteur explicatif des émissions de méthane est sans conteste le type de ration utilisé. Ici, une seule et même ration a été utilisée pour les 5 cohortes. L'indice d'émission de méthane (26 g/kg de CMQ) se situe dans la fourchette (22-28 g/kg) des valeurs obtenues sur des jeunes bovins alimentés avec des rations à base de fourrages, qu'ils aient été mesurés en chambres respiratoires et/ou à l'aide de systèmes GreenFeed (Hammond *et al.*, 2015 ; Donoghue *et al.*, 2016 ; Troy *et al.*, 2016 ; Velazco *et al.*, 2015).

Il faut noter que si les études réalisées en chambres respiratoires permettent d'obtenir des mesures très précises des émissions de méthane, celles-ci ne sont possibles que sur de très courtes durées avec le risque que la mesure de l'ingéré ne soit pas représentative de la capacité d'ingestion de l'animal (Herd *et al.*, 2016 ; Llonch *et al.*, 2016). Avec les systèmes GreenFeed il est par contre possible d'obtenir des mesures précises des émissions de méthane parallèlement à celles de l'ingestion sur plusieurs semaines (Renand *et al.*, 2016). Or pour discriminer à même niveau d'ingestion les animaux fortement émetteurs des animaux faiblement émetteurs au sein d'une population, il importe d'avoir une mesure précise de ces deux caractères, sachant que celle de l'ingestion nécessite des mesures pendant cinq semaines au minimum (Archer *et al.*, 1997 ; Wang *et al.*, 2006). De ce fait, la relation entre MEQ et CMQ (+0,29) de la présente étude ne peut être comparée qu'à celle (+0,28) obtenue par Herd *et al.* (2016) avec 41 jeunes bovins contrôlés pendant dix semaines. Ces deux relations, certes positives, sont toutefois assez modestes, laissant place à une variabilité élevée du potentiel d'émission de méthane entre animaux à même ingestion.

Les travaux menés jusqu'à présent pour étudier les relations entre émission de méthane entérique et efficacité alimentaire de jeunes bovins ont été réalisés en mesurant les émissions sur des animaux préalablement classés sur la consommation résiduelle (CR) lors d'un contrôle alimentaire de plusieurs semaines. Nkrumah *et al.* (2006) ont ainsi mis en évidence sur 29 jeunes bovins qu'une différence de +23% de CR s'accompagnait d'une différence significative de +29% de l'émission résiduelle de méthane lorsque les émissions de méthane étaient mesurées pendant deux périodes de 16 heures à l'aide d'enceintes portables. Ces résultats, les premiers, ont été largement repris pour justifier du bénéfice à tirer d'une réduction de la consommation résiduelle. En effet ils montraient que cet effet n'était pas uniquement lié à une réduction de l'ingestion mais que la mesure de la CR permettait de mettre en évidence le potentiel propre de l'animal en sus de l'ingestion. Depuis lors, ont été publiées des études sur jeunes bovins (de 22 à 73 selon l'étude) dont les émissions ont été mesurées à l'aide de la méthode SF6. Leurs résultats ne confirment pas les premiers résultats de Nkrumah *et al.* (2006). Ceux de Fitzsimmons *et al.* (2013) montrent que les animaux avec les CR les plus élevées émettaient significativement plus de méthane par jour (+13% MEQ) mais n'en émettaient pas plus quand les émissions étaient rapportées à la MS ingérée (-5% IEME). Les résultats de Mercadante *et al.* (2015), Mc Donnell *et al.* (2016) et Oliveira *et al.* (2016) mettent en évidence que les animaux avec les consommations résiduelles les plus élevées n'émettaient pas plus de méthane par jour (-7% à +6% MEQ) mais en émettaient significativement moins quand le méthane émis était rapporté à la MS ingérée (-10% à -25% IEME). Enfin, Velazco *et al.* (2016) ont étudié, avec 39 jeunes bovins issus d'un programme de sélection divergente sur la consommation résiduelle, la relation entre cette efficacité héritée et l'émission de méthane mesurée au pâturage avec des systèmes GreenFeed. Ils ont obtenu une relation significativement négative (-0,43) entre le potentiel génétique de CR et le potentiel d'émission de méthane à même niveau de croissance. Nos propres résultats obtenus sur un nombre nettement plus conséquent d'animaux montrent que la consommation résiduelle n'est pas associée aux émissions de méthane.

Tous les résultats les plus récents mettent ainsi en évidence une relation plutôt défavorable entre efficacité alimentaire et émissions de méthane sur des jeunes bovins en croissance alimentés avec des rations à forte teneur cellulosique. Il faut donc étudier plus précisément les relations entre efficacité alimentaire et les déterminants des émissions de méthane entérique comme le volume du rumen, la vitesse de transit (Goopy *et al.*, 2014, Huhtanen *et al.*, 2016) et leur impact sur

la capacité digestive pour comprendre pourquoi les animaux qui sont les plus efficaces émettent plus de méthane.

CONCLUSION

La relation défavorable mise en évidence entre efficacité alimentaire pour la croissance et les émissions de méthane est un élément important à prendre en compte pour l'amélioration génétique de la durabilité des troupeaux allaitants. On ne peut espérer réduire les émissions de méthane entérique comme réponse à une sélection sur l'efficacité alimentaire et une sélection directe sur ces émissions ou leurs déterminants sera indispensable pour concilier ces deux volets de la durabilité.

Cette étude a bénéficié du soutien financier de la Région Centre et d'APIS-GENE

Archer J.A., Arthur P.F., Herd R.M., Parnell P.F., Pitchford W.S., 1997. J. Anim. Sci., 75, 2024-2032

Arthur P.F., Renand G., Krauss D., 2001. Livest. Prod.. Sci., 68, 131-139

C-Lock Inc, 2016. <http://www.c-lockinc.com/product-category/automated-emissions-measurement/>

Donoghue K.A., Bird-Gardiner T., Arthur P.F., Herd R.M., Hegarty R.F., 2016. J. Anim. Sci., 94, 1438-1445

Fitzsimmons C., Kenny D.A., Deighton M.H., Fahey A.G., McGee M., 2013. J. Anim. Sci., 91, 5789-5800

Goopy J.P., Donaldson A., Hegarty R., Vercoe P.E., Haynes F., Barnett M., Oddy V.H., 2014. Brit. J. Nutr., 111, 578-585

Hammond K.J., Humphries D.J., Crompton L.A., Green C., Reynolds C.K., 2015. Anim. Feed. Sci. Technol., 203, 41-52

Herd R.M., Arthur P.F., Hegarty R.S., Archer J.A., 2002. 7th WCGALP, Montpellier, France, Comm. N° 10-22

Herd R.M., Velazco J.L., Arthur P.F., Hegarty R.S., 2016. Anim. Prod. Sci., 56, 231-237

Huhtanen P., Ramin M., Cabezas-Garcia E.H., 2016. Anim. Prod. Sci., 56, 501-506

Llonch P., Troy S.M., Duthie C.A., Sommariba M., Rooke J.A., Haskell M.J., Roehe R., Turner S.P., 2016. Anim. Prod. Sci., *accepté*

McDonnell R.P., Hart K.J., Boland T.M., Kelly A.K., McGee M., Kenny D.A., 2016. J. Anim. Sci., 94, 1179-1193

Mercadante M.E.Z., Caliman A.P.M., Canesin R.C., Bonilha S.F.M., Berndt A., Frighetto R.T.S., Magnani E., Branco R.H., 2015. Rev. Bras. Zoot., 44, 255-262

Nguyen T.T.H., van der Werf H.M.G., Eugène M., Veysset P., Devun J., 2012. Livest. Sci., 145, 239-251

Nkrumah J.D., Okine E.K., Mathison G.W., Schmid K., Li C., Basarab J.A., Price M.A., Wang Z., Moore S.S., 2006. J. Anim. Sci., 84, 145-153

Oliveira L.F., Ruggieri A.C., Branco R.H., Cota O.L., Canesin R.C., Costa H.J.U., Mercadante M.E.Z., 2015. Anim. Prod. Sci., *accepté*

Renand G., Maupetit D., 2016. Anim. Prod. Sci., 56, 218-223

Rooke J.A., Wallace R.J., Duthie C.A., McKain N., Motta de Souza S., Hyslop J.J., Ross D.W., Waterhouse T., Roehe R., 2014. Brit. J. Nutr., 112, 938-407

Troy S.M., Duthie C.A., Ross D.W., Hyslop J.J., Roehe R., Waterhouse A., Rooke J.A., 2016. Anim. Feed. Sci. Technol., 211, 227-240

Velazco J.L., Mayer D.G., Zimmerman S., Hegarty R.S., 2015. Animal, 10, 25-33

Velazco J.L., Herd R.M., Cottle D.J., Hegarty R.S., 2016. Velazco J.L., Mayer D.G., Zimmerman S., Hegarty R.S., 2015. Animal, 10, 25-33

Wang Z., Nkrumah J.D., Li C., Basarab J.A., Goonewardene L.A., Okine E.K., Crews D.H., Moore S.S., 2006. J. Anim. Sci., 84, 2289-229