

# Modélisation empirique des facteurs de variation des rejets de méthane par les ruminants

S. GIGER-REVERDIN (1), D. SAUVANT (1), M. VERMOREL (2), J.P. JOUANY (2)

(1) INRA-INAPG UMR Physiologie de la Nutrition et Alimentation, 16, rue Claude Bernard, 75005 Paris

(2) INRA Unité de Recherche sur les Herbivores, Theix, 63122 Saint-Genès Champanelle

**RESUME** – Du fait de l'importance des rejets de méthane par les ruminants qui contribueraient à près de 15 % de la production totale mondiale, une modélisation empirique de ces rejets a été effectuée à partir des données disponibles dans la littérature. Plus de 1000 régimes issus de 144 publications ont été compilés dans une base de données générale. Une sous-étude spécifique a été effectuée sur les données publiées par le Rowett Research Institute.

Il ressort de cette étude que ces rejets exprimés en l/kg MS d'aliment ingéré sont très variables (de 6,8 à 68,4) et qu'ils diminuent avec l'ingestion de matière sèche et avec le pourcentage de concentré dans la ration, au-delà d'un certain seuil d'incorporation. L'augmentation de la teneur en matières grasses inhibe la méthanogénèse, alors que les autres constituants, comme les pailles, ont des effets variables.

## Empirical modelling of methane losses from ruminants

S. GIGER-REVERDIN (1), D. SAUVANT (1), M. VERMOREL (2), J.P. JOUANY (2)

(1) INRA-INAPG UMR Physiologie de la Nutrition et Alimentation, 16, rue Claude Bernard, 75005 Paris

(2) INRA Unité de Recherche sur les Herbivores, Theix, 63122 Saint-Genès Champanelle

**SUMMARY** – Ruminants are responsible for about 15 % of total methane emissions in the atmosphere. Therefore, an empirical modelling of these losses was undergone from literature data. Results from more than 1000 diets stemmed from 144 papers were compiled in a general data bank. Also, we did a specific sub-study concerning data published by the Rowett Research Institute. Methane losses expressed as l/kg DM of feed ranged from 6.8 to 68.4. They decreased with dry matter intake and with the percentage level above a given level. An increase in dietary fat decreased methanogenesis, but other dietary components, like cell wall content had various effects.

## INTRODUCTION

Les ruminants produiraient, au niveau mondial, de l'ordre de 80 MT de  $\text{CH}_4$ , ce qui contribueraient à près de 15 % de la production totale. Il importe donc de quantifier cette émission qui dépend principalement de la quantité de matière organique fermentée dans le rumen et dans le gros intestin et d'en étudier les principaux facteurs de variation, afin de tenter de la réduire. Ce travail s'appuie sur trois bases de données de mesures effectuées *in vivo* depuis plusieurs décennies. En effet, si la problématique "méthane, facteur de pollution" est récente, les nutritionnistes ont mesuré depuis près d'un siècle les différentes pertes énergétiques, dont le méthane. C'est à partir de leurs données que nous allons pouvoir aborder la problématique de l'étude des facteurs alimentaires intervenant dans le déterminisme des rejets de méthane par les ruminants.

## MATERIEL ET METHODES

Les émissions de méthane sont exprimées en litre par kilogramme de matière sèche ingérée, car cette unité est plus concrète que le pourcentage d'énergie brute perdue sous forme de méthane, l'unité habituellement utilisée.

Nous avons utilisé une base de données "générale" qui regroupait 1034 régimes issus de 144 publications faites entre 1924 et nos jours. Toutes les données disponibles caractérisant les rations ou les animaux ont été incluses dans cette base.

Nous avons également exploité deux bases de données issues des publications du Rowett Research Institute (1975, 1978, 1981 et 1984). La première concerne des aliments simples (297 ingrédients), alors que la seconde rassemble 144 rations correspondant à 24 aliments composés distribués avec du foin ou de l'ensilage d'herbe à trois taux d'incorporation différents (25, 50 ou 75 %). Toutes les données du Rowett ont été obtenues sur des moutons castrés à l'entretien.

## RESULTATS

### 2.1. BASES DE DONNÉES DU ROWETT

Dans chacune des bases, nous avons fait la moyenne par régime, lorsque les mesures ont été répétées.

#### 2.1.1. Base de données sur les aliments simples

Les valeurs des rejets en  $\text{CH}_4$  ont été obtenues directement (fourrages) ou par extrapolation (aliments concentrés). Les 297 ingrédients sont répartis en 20 classes d'aliments, de taille très variable (2 à 69 mesures par aliment). Le pouvoir méthano-gène moyen de ces 20 aliments est de 43,5 l/kg MS ( $\pm 10,8$ ), et varie de 20,8 à 60,7. Quatre groupes peuvent être distingués :

- à fort pouvoir méthano-gène ( $\geq 55$  l/kg, pois, féverole)
- à pouvoir méthano-gène moyen (de 45 à 55 l/kg, maïs, tourteau de soja, orge, blé, sorgho, pulpe de betterave, pomme de terre)
- à faible pouvoir méthano-gène (de 30 à 45 l/kg, graminées en vert, sous-produits du blé, avoine, tourteau d'arachide, ensilage de maïs, ensilage d'herbe, foin de graminées, ensilage de luzerne)
- à très faible pouvoir méthano-gène ( $\leq 30$  l/kg MS, paille, foin de luzerne et sous-produits de l'orge).

Cependant, pour un aliment donné, le pouvoir méthano-gène est éminemment variable, et l'écart-type de sa valeur est directement proportionnel à sa moyenne :

$$\text{Ecart-type } \text{CH}_4 = 0,143 \text{ Moyenne } \text{CH}_4$$
$$(n = 20, r = 0,56, \text{ETR} = 3,08 \text{ l/kg MS})$$

Dans cette équation, les fourrages ne diffèrent pas des concentrés.

Sur l'ensemble des 297 aliments, la production de méthane est corrélée négativement aux teneurs en NDF ( $r = -0,62$ ), en ADF ( $r = -0,59$ ), en ADL ( $r = -0,66$ ) et en extrait étheré ( $r = -0,45$ ). Ceci signifie que l'augmentation de la teneur des aliments en ces constituants a pour effet de diminuer la méthano-génèse. Par contre, la corrélation est positive avec la teneur en amidon ( $r = 0,58$ ) ou avec la digestibilité de l'énergie ( $r = 0,68$ ). La combinaison des critères chimiques (en g/kg MS) permet d'expliquer plus de la moitié des variations des rejets en méthane :

$$\text{CH}_4 (\text{l/kg MS}) = 48,4 - 0,230 \text{ ADL} + 0,0116 \text{ amidon} - 0,155 \text{ EE} + 0,0224 \text{ MAT} \quad [1]$$

$$(n = 297, r = 0,75, \text{ETR} = 7,2 \text{ l/kg MS})$$

Un effet aliment existe au sein de la résiduelle.

Une approche similaire a été effectuée sur les moyennes par aliment (approche inter-aliments). Les coefficients concernant l'extrait étheré, les matières minérales et la digestibilité de l'énergie ne diffèrent pas statistiquement de ceux des équations globales.

### 2.1.2. Base de données sur les rations avec des aliments composés

Sur l'ensemble des 144 rations mixtes, la nature de la ration de base (foin vs ensilage d'herbe) n'influence pas la méthano-génèse. La ration avec 75 % de concentré est statistiquement moins méthano-gène (41,3 l/kg MS) que celles à 50 % (42,9) ou à 25 % (42,7). Le pouvoir méthano-gène moyen de ces rations est similaire à celui des aliments simples ( $42,3 \pm 3,9$  l/kg MS), de même que son amplitude de variation ( $29,3$  à  $56,1$ ).

L'extrait étheré et la lignine sont les seules variables explicatives des émissions de méthane :

$$\text{CH}_4 (\text{l/kg MS}) = 55,9 - 0,235 \text{ EE} - 0,141 \text{ ADL} \quad [2]$$
$$(n = 144, r = 0,52, \text{ETR} = 3,40 \text{ l/kg MS})$$

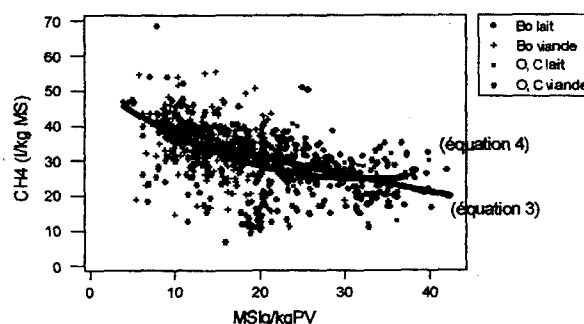
Il est à noter que la précision de cette équation [2] n'incluant que deux variables est deux fois meilleure que celle obtenue sur les 297 données de l'équation [1].

Les valeurs des rations mixtes prédites par les équations obtenues sur les aliments simples se situent dans l'intervalle de confiance de ces équations. Cependant, les aliments composés très riches en matières grasses ou en parois végétales "sortent de la régression". Ceci met en évidence les limites d'une équation générale quand elle est utilisée pour des échantillons atypiques.

## 2.2. BASES DE DONNÉES GÉNÉRALES

La base de données générale se caractérise par sa diversité, tant au niveau des animaux utilisés (bovins, ovins et caprins), des productions (lait ou viande), mais surtout des paramètres mesurés et des techniques analytiques de laboratoires situés dans les différentes parties du globe et à des époques parfois très différentes. Ces constats constituent à la fois un handicap (données manquantes), mais aussi une richesse du fait de la diversité des situations rencontrées. En moyenne, la production de méthane est de 31,5 ( $\pm 8,6$ ) l/kg MS, et a varié de 6,8 à 68,4 l/kg MS. Elle diminue avec l'augmentation de l'ingestion de matière sèche ramenée au poids vif de l'animal (Figure 1) :

Fig. 1  
Production de méthane en fonction de l'ingestion



Cette diminution est linéaire pour le sous-ensemble des animaux produisant du lait (bovins, ovins et caprins) :

$$\text{CH}_4 (\text{l/kg MS}) = 41,3 - 0,507 \text{ MSI (g/kg PV)} \quad [3]$$
$$(n = 224, r = 0,49, \text{ETR} = 6,5 \text{ l/kg MS})$$

Par contre, pour le sous-ensemble concernant les animaux à l'entretien ou en croissance, elle est curvilinéaire :

$$\text{CH}_4 (\text{l/kg MS}) = 52,1 - 1,71 \text{ MSI} + 0,0267 \text{ MSI}^2 \quad [4]$$
$$(n = 584, r = 0,52, \text{ETR} = 7,6 \text{ l/kg MS})$$

Comme à l'intérieur de ces deux sous-ensembles, les gros et les petits ruminants ne diffèrent pas statistiquement sur les critères

considérés, nous avons travaillé en parallèle sur chacun d'eux. Une approche similaire effectuée en intra-expériences fournit des équations avec des coefficients comparables, mais des ETR plus faibles (2,8 et 5,6 l/kg MS respectivement pour les équations [3] et [4]).

### 2.2.1. Base de données sur les ruminants en lactation

Les 224 régimes de cette base correspondent à 191 observations sur vaches en lactation et 33, sur chèvres.

Sur l'ensemble de ces données, une augmentation du pourcentage de concentré (C) entraîne une diminution curvilinéaire des émissions de méthane :

$$\text{CH}_4 \text{ (l/kg MS)} = 33,1 - 0,00192 \text{ C}^2 \quad [5]$$

(n = 209, r = 0,46, ETR = 6,6 l/kg MS)

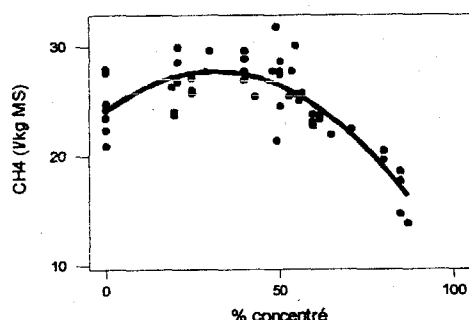
Une approche intra-essai a été faite sur les 18 expériences (61 observations), pour lesquelles le pourcentage de concentré varie d'au moins 20 %. La production de méthane varie aussi de façon curvilinéaire avec C.

$$\text{CH}_4 = 24,0 + 0,233 \text{ C} - 0,00370 \text{ C}^2 \quad [6]$$

(n = 61, n<sub>exp</sub> = 18, ETR = 2,4 l/kg MS)

La production de CH<sub>4</sub> est maximum pour un pourcentage d'environ 30 % de concentré dans la ration. Cette équation est nettement plus précise que la précédente.

Fig. 2  
Production de méthane en fonction de C



Une autre approche de l'étude des facteurs de variation de la production de méthane liée à la composition de la ration consiste à étudier les coefficients de corrélation partielle entre les constituants chimiques et la résiduelle de l'équation [3]. En raison de l'hétérogénéité des informations de la littérature, nous avons indiqué, dans le tableau 1, pour chaque critère l'effet de la variation d'un pour cent du constituant considéré, le nombre d'observations et l'écart-type résiduel correspondant :

Tableau 1  
Effet de la variation d'un pour cent de chaque constituant sur la production résiduelle de méthane (CH<sub>4</sub>/MSI fonction de MSI/PV)

| constituant | Effet<br>(± écart-type) | Nombre<br>d'observations | Ecart-Type<br>résiduel |
|-------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|
| CB          | + 0,294 (0,084)         | 157                      | 6,38                   |
| NDF         | + 0,507 (0,094)         | 66                       | 6,59                   |
| ADF         | + 0,392 (0,114)         | 89                       | 7,48                   |
| ADL         | + 1,704 (0,249)         | 66                       | 5,97                   |
| EE          | - 0,439 (0,244)         | 172                      | 6,53                   |
| % concentré | - 0,104 (0,018)         | 209                      | 6,17                   |

Il est à noter l'importance des parois, et en particulier de la lignine, sur le pouvoir méthanogène des rations. Cet effet est à rapprocher de l'effet négatif du pourcentage de C.

Les matières grasses ont un effet inhibiteur sur la méthanogénèse. Sur un sous-ensemble de 7 expériences, dont la teneur en matières grasses variait d'au moins 3 points et dont les ingrédients étaient bien décrits, nous avons mis en évidence que la fraction "acides gras" de la matière grasse avait un effet négatif spécifique sur la méthanogénèse (Giger-Reverdin et al., np). De plus, l'effet est proportionnel à la quantité d'acides gras insaturés (exprimées en % de la MS) et à leur degré d'in-

saturation, ce qui nous conduit à proposer un index d'insaturation :

Index = Somme des quantités AG \* degré d'insaturation  
Lorsque cet index augmente d'un point, la méthanogénèse diminue de 0,48 l/kg MS.

### 2.2.2. Base de données sur les ruminants en croissance ou à l'entretien

Comme précédemment, le pourcentage de concentré influence curvilinéairement la production de méthane :

$$\text{CH}_4 = 30,5 + 0,311 \text{ C} - 0,00366 \text{ C}^2 \quad [7]$$

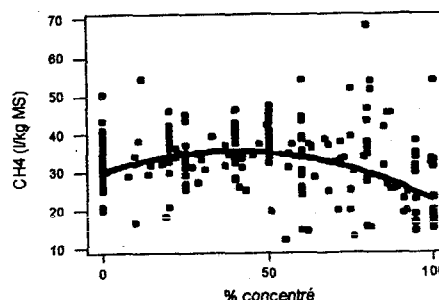
(n = 532, r = 0,37, ETR = 8,4 l/kg MS)

Les coefficients issus d'une étude intra-expériences concernant les 29 expériences où le pourcentage de concentré a fortement varié (244 observations), sont similaires à ceux de l'équation globale [7] :

$$\text{CH}_4 = 30,1 + 0,280 \text{ C} - 0,00354 \text{ C}^2 \quad [8]$$

(n = 244, n<sub>exp</sub> = 29, ETR = 7,3 l/kg MS)

Fig. 3  
Production de méthane en fonction de C



La production de méthane est maximale pour un pourcentage d'environ 40 % de concentré. La constante et la pente sont plus élevées dans l'équation [8] que dans l'équation [6], mais l'index de curvilinéarité est similaire.

L'influence des différents paramètres chimiques a été également testé sur la résiduelle de l'équation [4].

Tableau 2  
Effet de la variation d'un pour cent de chaque constituant sur la production résiduelle de méthane (CH<sub>4</sub>/MSI fonction de MSI/PV et MSI<sub>2</sub>/PV)

| constituant | Effet<br>(± écart-type) | Nombre<br>d'observations | Ecart-Type<br>résiduel |
|-------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|
| CB          | - 0,101 (0,050)         | 363                      | 8,478                  |
| ADL         | - 0,607 (0,217)         | 105                      | 6,43                   |

Comme pour les données du Rowett, les teneurs en cellulose brute et en lignine ont un effet négatif sur la méthanogénèse. L'absence d'effet des teneurs en paroi (NDF) et en lignocellulose (ADF) ou du pourcentage de concentré est probablement due au nombre très important de rations ne contenant que des fourrages (environ la moitié) et à leur hétérogénéité qui est mal prise en compte par les paramètres chimiques utilisés. La teneur moyenne en extrait éthéré et sa faible variation (2,85 ± 1,55 %/MS) expliqueraient l'absence d'effet de ce paramètre.

### DISCUSSION

Quelle que soit la base utilisée, la plupart des résultats observés traduisent la liaison forte entre la digestibilité ruminale des aliments et les émissions de méthane.

Les bases de données du Rowett présentent l'intérêt de constituer des ensembles de données homogènes et donc de tester l'influence spécifique de chaque aliment sur la méthanogénèse en s'affranchissant de certains facteurs difficiles à quantifier (effets "laboratoire", méthodes de mesure...). La base sur les aliments simples quantifie l'effet des paramètres chimiques. La régression obtenue est peu précise, car certains ingrédients (pois, drèches, pommes de terre) sortent de l'équation globale. La bonne adéquation entre les valeurs mesurées et calculées,

dans le cas de la base "aliments composés", implique qu'il devrait y avoir additivité de la méthanogénèse des différentes matières premières. Cette base met aussi en évidence l'effet dépressif du pourcentage de concentré, s'il est élevé.

La base de données générale qui présente une diversité de rations intéressante a permis de confirmer l'influence de la quantité de matière sèche ingérée sur la production de méthane (Blaxter, 1962), que ce soit pour les animaux en lactation ou ceux en croissance et à l'entretien. Ceci s'explique par une augmentation de la vitesse de transit avec l'ingestion, et donc une diminution du temps de fermentation ruminale des aliments. Les productions de méthane observées au Rowett sont comparables à celles de la base générale, si on se met à même niveau de MSI.

Le pourcentage de concentré a, sur la production de méthane, un effet quadratique qui est maximum aux alentours de 30 à 40 %. Comme la méthanogénèse augmente avec l'activité fermentaire du rumen, il est logique d'observer une augmentation de la production de méthane avec un accroissement du pourcentage de concentré, donc de la valeur énergétique de la ration.

Par ailleurs, la diminution des rejets de méthane lorsque la ration contient beaucoup de concentré peut s'expliquer par une diminution importante du pH ruminal, ce qui inhibe les bacté-

ries méthanogènes (Demeyer et Henderickx, 1967). En outre, il faut rappeler qu'il y a une concurrence entre la méthanogénèse et la synthèse d'acide propionique favorisée par les rations riches en concentré. Ceci explique que les constituants pariétaux aient des effets inverses sur la production de méthane selon la base de données utilisée.

L'effet inhibiteur des matières grasses observé dans les différentes bases de données confirme les données de Czerkowski et al. (1966) ou de Giger-Reverdin et al., (1992). L'aspect original souligné ici est l'influence de la seule fraction "acides gras" de la matière grasse et la mise en évidence quantitative des acides gras insaturés (cf "index de d'insaturation").

## CONCLUSION

Ce travail permet à la fois de prévoir les émissions de méthane par les ruminants et de mettre en évidence les facteurs alimentaires qu'il faut maîtriser pour réduire ces émissions, lesquelles s'ajoutent aux multiples gaz rejetés dans l'atmosphère par la combustion de l'énergie fossile et les activités de l'homme en général.

**Le nombre important de références bibliographiques (plus de 150) n'est pas compatible avec la longueur de ce texte. Elles sont disponibles auprès des auteurs.**