



HAL
open science

Evaluation quantitative des émissions de méthane entérique par les animaux d'élevage en 2007 en France

Michel Vermorel, J Pierre Jouany, Maguy Eugène, Daniel Sauvant, Jean Noblet, Jean-Yves Dourmad

► **To cite this version:**

Michel Vermorel, J Pierre Jouany, Maguy Eugène, Daniel Sauvant, Jean Noblet, et al.. Evaluation quantitative des émissions de méthane entérique par les animaux d'élevage en 2007 en France. *Productions Animales*, 2008, 21 (5), pp.403-418. hal-01173493

HAL Id: hal-01173493

<https://hal.science/hal-01173493v1>

Submitted on 31 May 2020

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.

Evaluation quantitative des émissions de méthane entérique par les animaux d'élevage en 2007 en France

M. VERMOREL¹, J.-P. JOUANY¹, M. EUGÈNE¹, D. SAUVANT², J. NOBLET³, J.-Y. DOURMAD^{3*}

¹ INRA, UR1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès Champanelle, France

² INRA, AgroParis Tech, UMR791 Physiologie de la Nutrition et de l'Alimentation, 16 rue Claude Bernard, F-75231 Paris, France

³ INRA, Agrocampus, UMR1079 Systèmes d'Elevage, Nutrition Animale et Humaine, F-35590 Saint-Gilles, France

Courriel : michel.vermorel@wanadoo.fr

L'UE s'est engagée en 2007 à réduire de 20% ses émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2020 par rapport aux niveaux de 1990. L'impact du méthane sur l'effet de serre est devenu une préoccupation du monde politique et des responsables scientifiques. Le méthane entérique qui représenterait environ 45% des émissions totales de méthane en France, serait responsable d'environ 5% du réchauffement global pour notre pays. Or, le méthane a une durée de vie dans l'atmosphère relativement courte, ce qui signifie qu'une réduction de ses émissions peut avoir rapidement des répercussions appréciables sur l'effet de serre.

En France, les rejets de méthane provenant de l'agriculture représentent environ 73% des émissions totales hors puits (CITEPA 2007). La quasi-totalité (97%) est issue de l'élevage si l'on cumule le méthane entérique et celui émis à partir des déjections animales. Le méthane entérique représente une part importante des émissions quantifiables de méthane dans les pays où l'élevage des ruminants au pâturage a un rôle économique majeur (88% en Nouvelle-Zélande ; 45% en France ; 20% aux USA et 17% au niveau mondial). Si l'on considère que la contribution de l'ensemble des émissions de méthane à l'effet de serre sur notre planète serait de l'ordre de 12%, on peut calculer que le méthane entérique serait responsable d'environ 5% du réchauffement global pour notre pays, alors qu'il ne serait que de 2 à 4% à l'échelle de la planète (Moss *et al* 2000).

La production de méthane entérique a fait l'objet de nombreuses études depuis des décennies dans le but d'évaluer l'importance des pertes énergé-

tiques qu'elle représente, en particulier pour les ruminants (un litre de méthane pèse 0,174 g et représente une perte de 9,45 kcal). L'impact du méthane entérique sur l'effet de serre n'a été pris en considération qu'au cours des 15 dernières années, mais il est devenu aujourd'hui une préoccupation du monde politique et des responsables scientifiques. L'importance d'un gaz pour son effet de serre dépend à la fois de son pouvoir (ou forçage) radiatif intrinsèque (puissance radiative que le Gaz à Effet de Serre (GES) renvoie vers le sol) et de sa durée de vie dans l'atmosphère. Le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) d'un gaz se définit comme le forçage radiatif cumulé sur une durée de 100 ans et s'exprime relativement au CO₂. Le méthane est une cible particulièrement intéressante dans le cadre de la lutte contre l'effet de serre puisque son PRG est 21 à 23 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone (CO₂) et que sa durée de vie dans l'atmosphère est courte (12 - 20 ans). Le méthane est donc un gaz très réactif et une réduction

de ses émissions peut avoir des répercussions intéressantes sur l'effet de serre en quelques décennies.

Les fermentations anaérobies qui se déroulent naturellement dans le tube digestif des animaux et de l'homme produisent du méthane. En anaérobiose, les réactions d'oxydation qui génèrent l'ATP (adénosine triphosphate) nécessaire à la croissance des microorganismes conduisent à la production d'hydrogène métabolique (H[•]). Bien que les conditions thermodynamiques locales ne soient pas favorables à la formation d'hydrogène gazeux à partir de deux atomes d'H[•], sa présence dans les gaz de fermentation inhibe l'action des déshydrogénases et conduit à un arrêt des fermentations lorsque sa pression partielle devient supérieure à 1 kPa (Miller 1995). L'élimination nécessaire de l'hydrogène est assurée principalement par les *archaea* méthanogènes dans le rumen, alors que d'autres microorganismes comme les bactéries acétogènes sont davantage impliquées dans le métabolisme de l'hydrogène au

* **Remerciements** : Les auteurs remercient les autres membres du groupe de travail qui ont participé à cette étude : M. Doreau, C. Martin, D. Micol, D. Morgavi (INRA, URH Theix) et S. Giger-Reverdin (UMR Physiologie de la nutrition et alimentation INRA/AgroParisTech). Ils adressent également leurs vifs remerciements aux personnes qui ont collaboré à ce travail en fournissant ou en validant des données : W. Jentsch (Institut Oskar Kellner, Rostock, DE), Y. van der Honing (IVVO, Lelystad, NL), P. Paccard (Institut de l'Elevage), J. Agabriel, R. Baumont, M. Benoit, F. Bocquier, L. Delaby, P. Faverdin, J.-P. Garel, G. Laignel, M. Lherm, W. Martin-Rosset, S. Prache (INRA), H. Boissier (INZO) et D. Vermorel (Coopadou).

sein du gros intestin. Des voies secondaires d'utilisation de l'hydrogène existent dans le rumen (synthèse de propionate ; réduction des ions $\text{SO}_4^{=}$ ou NO_3^- ; saturation d'acides gras insaturés...) mais elles ont une efficacité moindre. La méthanogénèse doit donc être considérée comme une voie métabolique essentielle dans la digestion et les fermentations microbiennes au sein du tractus digestif.

Compte tenu de son volume, de sa localisation dans le tube digestif et de sa contribution dans la digestion totale des aliments ingérés par les animaux, le rumen est de loin le compartiment digestif le plus impliqué dans la production de méthane. En effet, les fermentations dans le gros intestin ne concernent que les résidus qui ont échappé à la digestion stomacale et intestinale. Toutefois, celles-ci peuvent être significatives dans le cas des herbivores monogastriques de grande taille comme les équidés puisque le gros intestin est alors le lieu exclusif de la digestion des constituants pariétaux des fourrages.

Il est donc important de quantifier le plus précisément possible les émissions de méthane entérique par les diverses catégories d'animaux d'élevage en tenant compte des effets des facteurs liés à l'animal et à l'alimentation. Cette étude propose des méthodes d'évaluation des émissions de méthane prenant en compte toutes les informations disponibles, sans envisager les conséquences plus globales sur les émissions de gaz à effet de serre dues aux modifications de méthodes d'élevage.

1 / Méthodes existantes d'évaluation des émissions de méthane entérique

Dans son rapport publié en 2006 (*Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*) l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climatic Change*) a proposé trois méthodes (Tier 1, Tier 2, Tier 3), de précision mais de complexité croissantes, pour évaluer les émissions annuelles de méthane entérique par les animaux d'élevage au niveau mondial ou au niveau national, selon les informations disponibles dans chaque pays. La première méthode (Tier 1) nécessite seulement la connaissance des effectifs des principales catégories d'animaux d'élevage. Elle repose sur l'utilisation de facteurs d'émission (kg de méthane émis par animal et par

an) moyens par défaut, tirés de la littérature, par espèce animale, pour les pays industrialisés ou les pays en développement. Cependant, dans le cas des bovins des facteurs d'émission différents sont proposés pour les vaches laitières et pour les «autres bovins» et selon les régions du monde (Amérique du Nord, Europe de l'Ouest, Asie...) pour tenir compte des différences de niveau de production des animaux.

La deuxième méthode (Tier 2) est plus élaborée ; elle convient pour les pays où l'on dispose d'informations sur les effectifs d'animaux des diverses catégories au sein d'une espèce donnée : poids adulte, activité physique, vitesse de croissance, production laitière, alimentation etc. Schématiquement elle repose *i*) sur l'évaluation des besoins en énergie nette (système américain du NRC (*National Research Council*) des animaux pour l'entretien et les différentes fonctions (croissance, lactation...), le type et le niveau de production et *ii*) sur l'utilisation de facteurs de conversion ($Y_m = \text{énergie du méthane émis} \% \text{ de l'énergie brute ingérée}$) moyens correspondant aux principales catégories d'animaux. Cependant les valeurs sont peu nombreuses ; ainsi la valeur est la même pour les diverses catégories de bovins, de buffles et d'ovins adultes, alimentés au pâturage ou à l'auge, sauf pour les jeunes bovins qui consomment des rations comportant plus de 90% d'aliments concentrés et pour les agneaux de moins d'un an. De plus, la méthode Tier 2 ne tient pas compte de l'influence du niveau d'alimentation et seulement grossièrement de la composition de la ration sur la valeur du facteur de conversion.

Pour ces raisons le rapport 2006 de l'IPCC recommande l'utilisation d'une troisième méthode (Tier 3) plus perfectionnée, lorsque c'est possible. Tier 3 prend en compte *i*) tous les facteurs connus qui influencent l'émission de méthane entérique, comme la race ou le type génétique, le type et le niveau de production des animaux, leur activité physique et les conditions environnementales (stabilisation libre ou entravée, plein-air intégral...), la composition et la digestibilité des rations et *ii*) les valeurs des facteurs de conversion disponibles pour chaque catégorie d'animaux dans un pays donné.

Un inventaire des émissions de méthane entérique par les animaux d'élevage en France a été effectué par l'INRA à la demande du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. Le présent

article rapporte les méthodes d'estimation utilisées et les modes de calcul des émissions de méthane par les principales espèces et les diverses catégories d'animaux d'élevage de chaque espèce en France en 2007.

2 / Méthodes d'évaluation des émissions de méthane utilisées dans cette étude

Conformément aux recommandations de l'IPCC 2006, nous avons souhaité adopter une méthode permettant de prendre en compte les principaux facteurs de variation des émissions de méthane liés à l'animal (espèce, type de production, niveau de production...) et à la ration (quantités d'aliments ingérés, composition chimique des aliments, interactions entre les aliments au sein d'une ration...). Cette méthode (Tier 3) devait permettre de prendre en compte ultérieurement les effets sur les émissions de méthane, des variations de la productivité des animaux ou des effectifs de certains types d'animaux au profit d'autres, et les variations de la composition des rations en fonction de la disponibilité et des prix des ressources alimentaires. Cependant, cette méthode impliquait *i*) de calculer pour chaque espèce, chaque type de production et chaque niveau de production les quantités des divers aliments nécessaires pour réaliser des rations équilibrées satisfaisant les besoins des animaux, c'est-à-dire effectuer de nombreux calculs en raison de la diversité des animaux, des types et des niveaux de production et des aliments disponibles selon les régions, les saisons, les prix... et *ii*) de trouver une (ou des) équation(s) de prédiction des émissions de méthane prenant en compte la composition des rations et le niveau des apports alimentaires. Une étude bibliographique et des tests de validation ont montré qu'il n'existe pas actuellement d'équation de prédiction adaptée aux types de rations utilisées en France.

Face à ces difficultés nous avons choisi une autre démarche, plus simple mais capable d'aboutir à une précision satisfaisante. Pour les bovins et les ovins, celle-ci (figure 1) part des besoins énergétiques calculés ou des apports énergétiques recommandés (en UFL ou en UFV) selon le système proposé par l'INRA. Le principal avantage pratique de cette méthode est que les besoins des animaux ne varient pas avec la composition de la ration. Les

apports en UF ont ensuite été convertis en kcal d'Energie Nette (EN), puis en Energie Métabolisable (EM) en utilisant les rendements moyens correspondant à chaque type de production puisqu'il n'était pas envisageable d'utiliser toutes les valeurs de rendements correspondant aux nombreux types de rations et à tous les niveaux d'alimentation rencontrés en pratique d'élevage. La quantité d'EM ingérée a permis d'évaluer l'énergie du méthane à l'aide d'un facteur de conversion (Y'_m exprimé en kcal de méthane pour 100 kcal d'EM ingérée) qui varie selon le type de production, la nature de la ration et les performances des animaux.

Pour obtenir le maximum de précision sur le facteur Y'_m , tout en simplifiant les calculs, nous avons cherché à «segmenter» les estimations selon les différentes catégories d'animaux et, lorsque c'était souhaitable, selon le régime alimentaire (alimentation à l'auge/alimentation au pâturage). Cette méthode tient en partie compte des effets du niveau des apports alimentaires sur l'émission de méthane, mais elle ne permet pas de prendre en compte directement tous les facteurs de variation des émissions de méthane liés à la composition des rations.

Dans le cas des équins, les besoins énergétiques nets ont été convertis en Energie Digestible (ED) puisque nous disposions à l'INRA d'équations de prédiction des émissions de méthane (E_{CH_4} % ED) en fonction de la composition chimique des rations. Dans le cas des caprins et des porcins nous avons utilisé des équations spécifiques établies à l'INRA pour l'évaluation des émissions de méthane.

3 / Evaluation des émissions de méthane par les bovins

3.1 / Evaluation des émissions de méthane par les vaches laitières

a) Evaluation des besoins énergétiques des vaches laitières

Les besoins énergétiques journaliers (UFL) des vaches laitières ont été calculés en additionnant les besoins d'entretien, de lactation et de gestation des vaches multipares, ainsi que les besoins de croissance des vaches primipares et les besoins liés aux déplacements au pâturage. Il a été tenu compte des corrections énergétiques résultant des interactions entre les fourrages et les concentrés en fonction de la production laitière (INRA 2007).

Compte tenu des données bibliographiques et des informations fournies par les collègues de l'INRA et des organismes professionnels qui ont collaboré à cette étude, et en accord avec eux, les éléments suivants ont également été utilisés pour les calculs des émissions de méthane :

- le poids vif moyen des vaches (après vêlage) augmente avec le niveau de production laitière (de 5000 à 10 000 kg, productions «standardisées» calculées sur 305 j) : de 620 à 720 kg pour les vaches multipares et de 565 à 640 kg pour les vaches primipares,

- le nombre de lactations par vache diminue de 3,15 à 2,35 pour des productions laitières de 5000 à 10 000 kg par an, ce qui correspond à un taux de renouvellement des vaches de 31,7 à 42,3% par an,

- l'âge moyen au premier vêlage est de 30 mois,

- l'intervalle moyen entre deux vêlages est de 392 j,

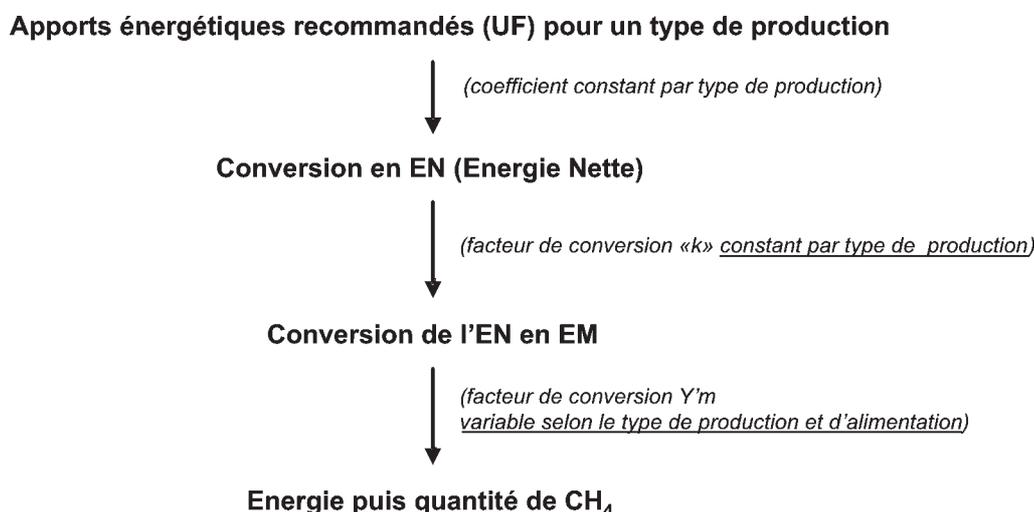
- la durée moyenne de la période de tarissement est de 61 j, ce qui correspond à une période de lactation de 331 j (ou 47 semaines).

Les besoins énergétiques journaliers totaux (en UFL) des vaches laitières primipares et multipares ont donc été calculés séparément, semaine par semaine, sur une période de lactation de 47 semaines et pour des productions laitières allant de 5000 à 10 000 kg en tenant compte des courbes de lactation correspondantes (INRA 2007).

Remarque : L'évaluation des émissions de méthane à partir des besoins énergétiques des animaux en lactation entraîne une surestimation des émissions au début de la période de lactation (car les apports énergétiques réels sont inférieurs aux besoins) et une sous-estimation des émissions à partir du milieu de la lactation. Le poids corporel des vaches multipares variant peu entre deux lactations, il a été admis que les deux phénomènes se compensaient. En effet, pour une production laitière moyenne de 6300 kg/an, l'erreur est inférieure à - 0,2%.

Pour chaque type d'animal les besoins totaux (en UFL) ont été convertis en Energie Nette de Lactation (ENL) en utilisant la valeur de 1,7 Mcal d'ENL par UFL. L'apport d'énergie métabolisable correspondant a été obtenu en divisant l'apport d'ENL par 0,60, valeur moyenne du rendement «kl» d'utilisation de l'EM des rations pour la lactation, obtenue à partir des études effectuées dans le monde jusqu'en 1974 (1150 bilans, d'après Van Es 1975). La validité de cette valeur a été testée avec

Figure 1. Schéma représentant la démarche choisie pour évaluer les émissions de méthane par les bovins et les ovins.



les résultats d'études réalisées ultérieurement en chambres respiratoires en Allemagne, aux Pays-Bas, au Royaume-Uni et en France avec des vaches recevant des rations à base de foin long, d'ensilage d'herbe ou d'ensilage de maïs et de 6 à 60% (44,6 ± 13,4%) d'aliments concentrés à base de céréales, issues de meunerie et pulpes de betteraves (31 lots de vaches). La valeur moyenne de kl est 0,60 ± 0,0080. Dans le cas de 9 rations à base d'ensilage de maïs comportant de 35 à 40% d'aliment concentré, la valeur moyenne de kl est 0,601 ± 0,0054 et la production laitière de 26,8 ± 5,3 kg/j.

b) Evaluation des facteurs de conversion Y'_m

Les émissions de méthane ont été évaluées à partir de l'apport d'EM et des facteurs de conversion Y'_m (énergie du méthane (E_{CH_4})/100 kcal d'EMI) qui correspondaient le mieux aux modes d'alimentation des vaches laitières en France au pâturage ou à l'auge, c'est-à-dire des rations distribuées à l'auge composées de foin, d'ensilage d'herbe ou d'ensilage de maïs et au maximum de 50% d'aliments concentrés variés. Nous avons exclu les rations comportant des fourrages agglomérés ou plus de 50% d'aliments concentrés.

Alimentation à l'auge : une étude bibliographique portant sur 22 études en chambres respiratoires réalisées en Allemagne, en France, en Grande-Bretagne, aux Pays-Bas et aux USA, avec 58 lots de 6 à 12 vaches en lactation, nous a permis de sélectionner 2 équations de prédiction de Y'_m (une équation de Sauvant et Giger-Reverdin (2007) et une équation de Mills *et al* (2003)) et de tester leur applicabilité et leur précision. L'équation de prédiction de Sauvant et Giger-Reverdin (2007) a été calculée à partir d'une base de données sur vaches laitières (174 lots d'animaux) correspondant à une grande diversité de rations européennes et nord-américaines. Elle prend en compte le pourcentage de concentré de la ration et le niveau d'alimentation. L'équation de prédiction de Mills *et al* (2003) a été établie à partir des résultats d'études réalisées en chambres respiratoires à Reading (GB) avec des vaches laitières recevant 20 rations composées de foin, d'ensilage de maïs, d'ensilage d'herbe, d'ensilage de blé immature et d'aliments concentrés (37,8 ± 4%). La production laitière moyenne par groupe de vaches était de 27,5 ± 3,78 kg/jour. Cette équation permet de prédire l'émission de méthane des vaches lai-

tières (ou Y'_m) uniquement à partir de la quantité d'EM ingérée (EMI) :

$$E_{CH_4} \text{ (MJ/j)} = 8,25 + 0,07 \text{ EMI (MJ/j)}$$

$$n = 20, \quad R^2 = 0,55, \quad (\text{etr} = 1,95 \text{ MJ/j, soit } \pm 10,8\%); \quad Y'_m = 100 E_{CH_4} \text{ (MJ/j)} / \text{EMI (MJ/j)}$$

(équation 1)

Cette équation ne nécessite pas d'informations sur la composition des rations, tient compte indirectement du niveau d'alimentation des vaches laitières (EMI) et permet de prédire Y'_m avec une précision compatible avec l'objectif de notre étude.

La validité de cette équation de prédiction a été testée par ses auteurs à l'aide de 63 bilans obtenus en Irlande du Nord et 45 bilans obtenus à Hurley (GB) avec des vaches en lactation recevant des rations à base d'herbe, d'ensilage d'herbe ou d'ensilage de maïs qui correspondent à des rations utilisées en France. Le pourcentage de concentré dans ces régimes (35,4 ± 17,5) variait de 0 à 52%. Les vaches produisaient en moyenne 24,6 ± 8,5 kg de lait par jour (de 8,9 ± 0,5 kg à 30,8 ± 4,2 kg). Les différences entre les quantités de méthane prédites et les quantités mesurées étaient en moyenne de -2,9% et + 4,6% respectivement pour les études réalisées en Irlande du Nord et à Hurley.

Nous avons testé la validité des relations de Sauvant et Giger-Reverdin (2007) et de Mills *et al* (2003) sur un sous-ensemble de résultats d'études réalisées en chambres respiratoires en Allemagne, aux Pays-Bas, au Royaume-Uni et en France avec des vaches recevant des rations à base de foin long, d'ensilage d'herbe ou d'ensilage de maïs et de 6 à 60% d'aliment concentré (44,6 ± 13,4%) à base de céréales, issues de meunerie et pulpes de betteraves (31 lots de vaches). La production laitière était en moyenne de 21,5 ± 6,2 kg/j (de 8,3 à 34,2 en moyenne par lot). La comparaison des émissions de méthane prédites et des émissions mesurées montre qu'avec le type de rations utilisées en France contenant un maximum de 50% d'aliment concentré riche en céréales, c'est l'équation de Mills *et al* (2003) qui est la plus précise pour des productions laitières supérieures ou égales à 15 kg par jour. La différence entre les émissions de méthane prédites et les émissions mesurées en chambres respiratoires est en moyenne de + 2,5 ± 9% avec l'équation de Mills et -8 ± 14,5% avec l'équation de prédiction de Sauvant et Giger-Reverdin (2007).

Pour les productions laitières inférieures à 15 kg/jour (fin de lactation), nous avons calculé de nouvelles valeurs de Y'_m à l'aide de l'équation suivante :

$$Y'_m = 12,5 + 0,17 (15 - \text{PL moyenne})$$

(équation 2)

Cette relation d'intrapolation a été établie en prenant la valeur $Y'_m = 12,5$ (calculée à l'aide de l'équation de Mills *et al* (2003) pour une production laitière de 15 kg/j) et la valeur 14,2 ± 0,84 pour une production laitière de 5 kg/j (valeur établie à partir de 27 données obtenues avec des vaches en fin de lactation et en gestation (Van Es 1961). Enfin, l'équation de Mills *et al* (2003) surestime les émissions de méthane dans le cas des vaches au pâturage. Nous avons donc établi une équation spécifique (équation 3) de prédiction des émissions de méthane au pâturage (cf. ci-dessous).

En conséquence, il a été décidé d'utiliser l'équation 1 (Mills *et al* 2003) pour prédire les émissions de méthane des vaches laitières recevant les types de rations hivernales utilisées en France et produisant plus de 14 kg de lait par jour, l'équation 2 pour les vaches alimentées à l'auge produisant moins de 15 kg de lait par jour, et l'équation 3 pour les vaches au pâturage.

Alimentation au pâturage : Au cours des 15 dernières années des mesures d'émission de méthane par des bovins au pâturage ont été réalisées à l'aide de la méthode au SF₆ (Johnson *et al* 1994) sur des vaches en lactation ou tarées, des génisses ou des bouvillons. Cependant beaucoup de données sont incomplètes (mesure peu fiable des quantités d'herbe ingérée ; pas de mesure de la digestibilité de l'herbe...), ce qui n'a pas permis de calculer les valeurs du facteur de conversion Y'_m . Nous avons ajouté aux données exploitables obtenues par la méthode au SF₆ (3 études, 23 animaux, 10 traitements) les données obtenues en chambres respiratoires aux Pays-Bas (83 bilans), en Irlande du Nord (20 bilans) et en Nouvelle-Zélande (13 bilans) (résultats cités par Bruinenberg *et al* 2002) et par Grainger *et al* (1985) avec des vaches en lactation recevant de l'herbe fauchée à divers stades végétatifs (au total 18 traitements alimentaires). La relation globale est la suivante :

$$Y'_m = -0,238 \text{ dE} + 27,67 ;$$

$$N = 18 \text{ traitements} ; \quad R^2 = 0,84 \quad \text{ETR} = 0,80$$

(équation 3)

La relation montre que le facteur de conversion Y'_m diminue linéairement

lorsque la digestibilité de l'énergie (dE) de l'herbe augmente.

Cette relation a été utilisée pour prédire le facteur de conversion à partir de la digestibilité de l'herbe lorsque les animaux sont alimentés au pâturage. Compte tenu, d'une part des données obtenues à l'INRA sur les variations de la digestibilité de la matière organique de l'herbe pâturée par les vaches laitières ou par les vaches allaitantes au cours des saisons et selon le type de pâturage (Jouven *et al* 2008), et d'autre part, de la relation entre la digestibilité de la matière organique et de la digestibilité de l'énergie de l'herbe (Andrieu et Demarquilly 1987), nous avons retenu les valeurs moyennes suivantes pour les facteurs de conversion :

$Y'_m = 9,3 \pm 1,04$ pour les vaches laitières au pâturage d'avril à juillet,

$Y'_m = 10,3 \pm 1,04$ pour les vaches laitières au pâturage d'août à octobre.

c) Evaluation des émissions individuelles de méthane aux niveaux journalier et annuel par les vaches laitières

Les émissions journalières de méthane ont été calculées à l'aide des équations précitées, semaine par semaine sur une période de 392 j (intervalle moyen entre deux vêlages), dont 47 semaines de lactation, pour des productions laitières de 5000 à 10 000 kg (en 305 j, soit 44 semaines), séparément pour les vaches primipares et multipares, en tenant compte des courbes de lactation (INRA 2007) et de la production laitière au cours des semaines 45 - 46 - 47 selon la production laitière annuelle.

Les calculs ont été faits pour des vêlages ayant lieu le 1^{er} novembre (2/3 des vêlages) ou le 1^{er} mai pour tenir compte des différences d'alimentation au cours de la lactation (parts respectives de l'alimentation à l'auge et au pâturage). La durée de la saison de pâturage a été évaluée en moyenne à 7 mois (du 01/04 au 31/10). Les émissions annuelles de méthane (appelées facteur d'émission, exprimé en kg) ont ensuite été calculées par addition des émissions hebdomadaires pendant 392 j (intervalle moyen entre deux vêlages) pour des vaches laitières primipares ou multipares produisant de 4000 à 10 000 kg de lait. Les résultats de ces calculs ont montré que le facteur d'émission de méthane augmente linéairement avec la production laitière (PL) annuelle selon la relation suivante :

$$CH_4 \text{ (kg/an)} = 55,7 + 0,0098 \text{ PL} ; N = 7 ; \text{ (etr} = 0,66 \text{ kg/an)} \quad (\text{équation 4})$$

Ainsi l'émission de méthane augmente de 9,8 g par kg de lait supplémentaire produit.

Le facteur d'émission varie de 90 à 163 kg de méthane entérique par vache et par an lorsque la production laitière passe de 3500 à 11 000 kg par an. Il est en moyenne de 117,7 kg pour une production laitière moyenne en France évaluée à 6300 kg par an. Ces estimations sont assez proches de celles fournies par le rapport FAO (2006) pour des productions situées entre 3000 et 7000 kg de lait (109 kg de méthane par an pour une production annuelle de 6000 kg de lait). Ainsi, la quantité de méthane émise par kg de lait produit est en moyenne de 18,7 g pour une production laitière de 6300 kg et elle passe de 25,7 à 14,9 g lorsque la production laitière augmente de 3500 à 11 000 kg par an.

d) Bilan des émissions de méthane par les vaches laitières

L'effectif total des vaches laitières en France en 2007 était de 3 799 000 têtes (Agreste Conjoncture 2007) et la production nationale de lait était évaluée à 24,4 millions de tonnes, soit une production moyenne de 6300 kg par vache et par lactation : 7100 kg/vache/an pour les 2,6 millions de vaches laitières soumises au contrôle laitier et 4679 kg/vache/an pour 1,2 million de vaches laitières non soumises au contrôle laitier.

Les émissions annuelles de méthane entérique par les vaches laitières en France ont donc été calculées séparément dans le cas des vaches soumises au contrôle laitier, pour les productions moyennes par classe, de 3500 à 11 100 kg/an et en tenant compte du pourcentage de vaches primipares dans l'effectif de chaque classe, et dans le cas des vaches non soumises au contrôle laitier, en calculant par extrapolation l'émission annuelle de méthane correspondant à une production laitière moyenne de 4679 kg/an et en considérant qu'il y a 30% de primipares parmi ce 1,2 million de vaches laitières.

L'émission totale annuelle de méthane entérique des 3,8 millions vaches laitières élevées en France atteint la valeur de **447 200 tonnes**. Elle représente **près de 32% du méthane entérique produit par l'ensemble des animaux d'élevage** (tableaux 1 et 6).

3.2 / Evaluation des émissions de méthane par les vaches allaitantes

a) Evaluation des besoins énergétiques des vaches allaitantes

Les besoins énergétiques des vaches allaitantes ont été déterminés à partir des caractéristiques suivantes :

- le poids vif moyen (après vêlage) pondéré des vaches allaitantes a été calculé en tenant compte des poids moyens des vaches des principales races et des effectifs correspondants (Normand 2006). Le poids moyen retenu est de 675 kg pour les vaches multipares et de 580 kg pour les vaches primipares ;

- l'âge moyen des vaches au 1^{er} vêlage est de 3 ans ;

- la date moyenne de vêlage a été fixée au 1^{er} février ;

- la productivité numérique étant comprise entre 0,80 et 0,90, la valeur de 0,85 a été retenue ;

- le poids moyen de naissance des veaux a été évalué à 42,3 kg ;

- la durée d'allaitement a été fixée à 10 mois (du 1^{er} février au 31 octobre) ;

- la production laitière moyenne, pondérée pour les différentes races, est de 1700 kg.

Les besoins énergétiques journaliers (en UFL) des vaches allaitantes ont été calculés à partir des données ci-dessus en additionnant les valeurs des besoins d'entretien, de lactation, de gestation ainsi que les besoins liés aux déplacements des animaux au pâturage et les besoins correspondant au gain de poids des vaches multipares au cours de leur carrière (20 kg par an en moyenne). Les besoins énergétiques annuels des vaches allaitantes multipares suivies s'élèvent en moyenne à 3300 UFL, dont 1144 UFL pendant la période d'alimentation à l'auge et 2156 UFL correspondant à l'alimentation au pâturage (Agabriel communication personnelle). Dans le cas des vaches primipares, les besoins énergétiques annuels s'élèvent en moyenne à 2900 UFL, dont 1015 UFL pendant la période d'alimentation à l'auge et 1885 UFL pendant la période de pâturage. Pour les vaches non gestantes les besoins sont en moyenne de 1980 UFL (dont 660 à l'auge et 1320 au pâturage) et pour les vaches qui ont perdu leur veau à la naissance ou peu après les besoins sont en moyenne de 2200 UFL (dont 730 à l'auge et 1470 au pâturage).

Les besoins en énergie nette de lactation ont été calculés en multipliant le besoin total en UFL par 1,7 Mcal. L'apport d'énergie métabolisable correspondant a été obtenu en divisant l'apport d'ENL par 0,60 pour l'alimentation au pâturage et $0,58 \pm 0,0066$ pour l'alimentation à l'auge (valeur moyenne de «kl» obtenue pour 22 rations distribuées à l'auge) (ITEB 1989, INRA 2007).

b) *Evaluation des facteurs de conversion Y'_m*

Alimentation à l'auge : le rationnement hivernal des vaches allaitantes étant très diversifié selon les régions et variable selon la rigueur de l'hiver, la portance du sol...), nous avons calculé les valeurs de Y'_m ($E_{CH_4}/100$ kcal d'EMI) pour 22 rations hivernales à base de foin ou d'ensilage d'herbe + foin ou d'ensilage de maïs et de foin ou de paille, contenant moins de 10% de concentré (ITEB 1989, INRA 2007). Les valeurs de Y'_m se situent entre 13,5 et 14,5 pour les rations à base d'ensilage d'herbe de bonne qualité + foin, et d'ensilage de maïs + paille ou foin. Elles vont de 14,6 à 16,5 avec les rations à base de foin selon la qualité du foin. La valeur moyenne de Y'_m est de $14,9 \pm 0,88$ pour l'ensemble des rations étudiées. Il a donc été décidé d'utiliser la valeur de $Y'_m = 15$ pour les rations hivernales des vaches allaitantes.

Alimentation au pâturage : compte-tenu des informations fournies par Baumont *et al* (2006) sur la digestibilité de la matière organique de l'herbe chez des vaches allaitantes en pâturage extensif de mai à novembre et des valeurs de Y'_m prédites à l'aide de l'équation 3, il a été convenu de prendre une valeur moyenne de Y'_m égale à $12 \pm 1,04$.

c) *Bilan des émissions de méthane entérique par les vaches allaitantes*

Les émissions de méthane des vaches allaitantes multipares ou primipares ont été calculées à partir des apports d'EM et des facteurs de conversion (Y'_m) correspondants, par jour, puis par période d'élevage et par an.

Les facteurs d'émission de méthane s'élèvent en moyenne à 93,4 kg par vache allaitante multipare suitée, 82,1 kg par vache primipare suitée, 56 kg par vache non fécondée et 62,3 kg par vache ayant perdu son veau au vêlage ou peu après. Le taux de renouvellement des vaches allaitantes a été pris égal à 22% et la productivité numérique à 85% de l'effectif.

Au niveau national, **l'émission totale annuelle de méthane entérique par les vaches allaitantes** s'élèverait pour 2007 à **351 120 tonnes pour un effectif moyen de 4 077 000 animaux** (Agreste Conjoncture 2007), ce qui correspond à **un facteur d'émission moyen de 86,1 kg de méthane par animal et par an**, à mettre en parallèle avec celui des vaches laitières évalué à 117,7 kg. L'émission totale annuelle de méthane par les vaches allaitantes représente donc 78,5% de celle des vaches laitières, 44% des émissions totales des vaches et 24,9% du méthane entérique produit par l'ensemble des animaux d'élevage.

3.3 / Evaluation des émissions de méthane par les bovins en croissance et à l'engrais

a) *Définition des différentes catégories et évaluation des effectifs des bovins en croissance ou à l'engrais*

Pour pouvoir apporter le maximum de précision dans l'évaluation des émissions de méthane par les bovins en croissance et à l'engrais, nous avons repris les catégories définies par Vermorel (1995). Nous avons complété la base par une catégorie supplémentaire correspondant à une production nouvelle : des taurillons de races laitières ou allaitantes recevant des rations comportant plus de 80% d'aliment concentré à base de céréales et du foin ou de la paille (rations dites «sèches») et abattus en moyenne à l'âge de 17 mois.

L'évaluation des effectifs est un point critique pour l'estimation des émissions de méthane entérique. En effet, les effectifs indiqués dans les statistiques d'Agreste correspondent aux nombres d'animaux recensés dans les principales catégories à un moment donné de l'année. Ils ne correspondent pas toujours au nombre d'animaux produits au cours de l'année (cas des veaux de boucherie abattus à l'âge de 4 à 6 mois) et ne tiennent pas nécessairement compte des nombres d'animaux exportés ou importés (cas des broutards et broutardes). De plus les effectifs sont parfois détaillés par tranche d'âge (par exemple : génisses de 1 à 2 ans) mais pas pour d'autres catégories dont les périodes d'élevage sont regroupées (par exemple : «autres femelles de moins d'un an»).

Un bilan complet des effectifs d'animaux pour l'ensemble des catégories définies a été établi en collaboration avec le laboratoire d'Economie de l'Elevage (INRA, Theix). A l'aide des

diverses informations disponibles sur la productivité numérique et le taux de renouvellement des mères, les importations, les exportations, les statistiques d'abattage etc., nous avons pu évaluer les effectifs d'animaux des diverses catégories et contrôler la validité de ces estimations par recoupement des données (tableau 1).

b) *Démarche utilisée pour évaluer les émissions de méthane des bovins en croissance et à l'engrais*

Les caractéristiques zootechniques des jeunes bovins au sein de chaque catégorie (courbe de croissance, vitesse de croissance, âge et poids à l'abattage, âge et poids au vêlage...) et les informations complémentaires fournies par les collègues zootechniciens de l'INRA et des Organismes Professionnels ont permis de calculer les apports énergétiques recommandés (INRA 2007).

La démarche utilisée pour les bovins en croissance ou à l'engrais est la même que celles utilisées pour les vaches laitières et les vaches allaitantes. Les apports énergétiques recommandés en UFL ou UFV ont été transformés en énergie nette lait ($ENL = UFL \times 1,7$ Mcal) ou en énergie nette d'entretien et de production de viande ($ENEV = UFV \times 1,82$ Mcal), puis en énergie métabolisable en divisant l'apport en ENL par 0,59 et l'apport en ENEV par 0,62. En effet, les calculs effectués sur 6 rations destinées à des génisses montrent que le rendement «kl» est en moyenne égal à $0,591 \pm 0,008$. Pour 12 rations destinées à des taurillons Pie-Rouge ($GMQ = 1,2$ kg/j) et Charolais ($GMQ = 1,6$ kg/j) le rendement «kmf» est en moyenne égal à $0,618 \pm 0,013$ (exemples de rations pris dans les ouvrages : INRAP 1984, INRA 1988, ITEB 1989).

Les émissions de méthane pouvaient être calculées à partir des quantités d'EM ingérées à l'aide de deux équations de prédiction :

1) l'équation quadratique de Sauvant et Giger-Reverdin (2007) issue de 392 «traitements», qui permet de prédire Y'_m à partir du pourcentage de concentré dans la ration et du niveau d'ingestion ;

2) l'équation 1b de Ellis *et al* (2007) issue de 83 «traitements» qui permet de prédire l'énergie perdue sous forme de méthane (MJ/j) à partir de la quantité d'EM ingérée.

Tableau 1. Facteurs d'émission et émissions totales de méthane par les bovins en France.

	Effectif total/an (x 1000) année 2007	Facteur d'émission (kg/tête/an) année 2007	CH ₄ total (t/an) année 2007	% bovins
<u>Vaches et mâles reproducteurs</u>				
Vaches laitières	3799	117,7	447197	35,0
Vaches allaitantes	4077	86,1	351120	27,5
Total "Vaches"	7876	101,4	798317	62,5
Taureaux adultes	192	92,0	17672	1,4
Jeunes mâles reproducteurs	50	64,3	3216	0,2
Total "reproducteurs"	242	86,3	20888	1,6
<u>Bovins en Croissance</u>				
Génisses races allaitantes reproduction (0-36 mois)	3005	49,5	148770	11,6
Génisses races laitières reproduction (0-30 mois)	3301	41,9	138344	10,8
Génisses races allaitantes production viande (0-26 mois)	630	47,9	30158	2,4
Génisses races laitières production viande (0-27 mois)	437	49,9	21786	1,7
Taurillons races allaitantes (0-17 mois)	637	52,4	33397	2,6
Taurillons races laitières (0-17 mois)	305	51,0	15540	1,2
Taurillons «rations sèches» races laitières (0-17 mois)	50	22,6	1131	0,1
Taurillons «rations sèches» races allaitantes (0-17 mois)	92	29,3	2695	0,2
Total «Génisses + taurillons» production de viande	2151	48,7	104707	8,2
Taureaux de 2 ans (0-2 ans)	270	53,3	14378	1,1
Bœufs de 40 mois (0-40 mois)	833	52,3	43542	3,4
Total «Taureaux de 2 ans + bœufs»	1103	52,6	57920	4,5
Broutards exportés à l'âge de 10 mois	925	8,3	7704	0,6
Broutardes exportées à l'âge de 10 mois	163	5,1	834	0,1
Total pondéré «Broutards + broutardes»	1088	7,8	8538	0,7
Veaux de boucherie	1748	0,0	0,00	0,00
Total «bovins ruminants en croissance»	10648	43,0	458279	35,9
Total «bovins ruminants»	18766	68,1	1277484	100

* Effectif total des bovins : 20 514 000.

Cependant, en raison des limites de ces deux équations [base de données incluant plusieurs espèces animales, des rations très riches en aliments concentrés et des rations contenant des fourrages condensés dans le cas de l'équation de Sauvant et Giger Reverdin (2007) ; rations nord-américaines seulement dans le cas de l'équation 1b de Ellis *et al* (2007)], nous avons décidé d'établir une nouvelle équation de prédiction correspondant mieux aux rations utilisées en France par les bovins en croissance et à l'en-grais.

Etablissement d'une nouvelle équation de prédiction des émissions de méthane

Nous avons constitué une base de données comportant 63 régimes : 52 représentatifs des rations à base de foin, d'ensilage d'herbe ou d'ensilage de maïs, majoritairement utilisées en France, et 11 rations de type «*feedlot*» pouvant correspondre à certaines rations «sèches» utilisées parfois en France. La relation établie entre Y_m^1 et le CUD de l'énergie montre que les données correspondant aux rations «sèches» doivent être traitées séparément.

Rations «classiques» distribuées à l'auge

Plusieurs équations de prédiction, linéaires ou quadratiques ont été calculées à partir des données (moyennes de lots) obtenues avec les 52 rations classiques citées ci-dessus. Le pourcentage de concentré et le niveau d'ingestion ou le niveau d'alimentation n'étaient pas des facteurs significatifs. L'équation globale de prédiction la plus précise pour les rations «classiques» est la suivante :

$$E_{CH_4} \text{ (MJ)} = 0,38 + 0,123 \text{ EMI (MJ)}$$

$$R^2 = 0,64 \quad (\text{etr} = 1,20 \text{ MJ, soit } 30 \text{ L/j})$$

(équation 5)

Les droites de régression de E_{CH_4} prédit avec la nouvelle équation ou celle de Sauvant et Giger-Reverdin (2007), en fonction de E_{CH_4} mesuré, se superposent. Toutes deux surestiment légèrement les émissions de méthane pour des valeurs de E_{CH_4} inférieures à 8 MJ par jour (environ 200 L CH_4 /j) et les sous-estiment au-delà de 200 L CH_4 /j. Les résidus sont en moyenne plus importants avec l'équation de Sauvant et Giger-Reverdin (2007) qu'avec la nouvelle équation. L'équation de prédiction de Ellis *et al* (2007) est beaucoup moins précise que les deux précédentes : la sous-estimation est plus importante et les résidus ont des valeurs plus importantes.

Compte-tenu de ces résultats, il a été décidé d'utiliser la nouvelle équation de prédiction qui ne prend en compte que la quantité d'EM ingérée par les animaux et ne nécessite donc pas d'informations sur la composition des rations (pourcentage de concentré dans la ration et niveau d'ingestion).

Rations «sèches» : ces rations comportent généralement 80 à 90% d'aliments concentrés à base de céréales et sont distribuées à des niveaux d'alimentation élevés à des bovins à l'engrais ayant un potentiel de croissance important. Les processus fermentaires sont alors fortement affectés, les interactions digestives sont importantes et les émissions de méthane sont réduites de manière significative. Les pertes d'énergie sous forme de méthane représentent de 2 à 3,5% de l'énergie brute ingérée et elles diminuent fortement lorsque le niveau d'alimentation augmente (Branine et Johnson

1990). Parmi les travaux publiés, beaucoup ne précisent pas la digestibilité des rations qu'il est absolument nécessaire de connaître pour calculer Y'_m . Nous avons donc utilisé la valeur moyenne des données disponibles ($Y'_m = 5 \pm 0,84$) qui correspond également au résultat obtenu par Martin *et al* (2007) avec une ration «sèche».

Alimentation au pâturage : la valeur moyenne $Y'_m = 12 \pm 1,04$ a été utilisée pour calculer les émissions de méthane par les jeunes bovins qui utilisent le même type de pâturages que les vaches allaitantes.

c) Evaluation et bilan des émissions annuelles de méthane par les bovins en croissance et à l'engraissement (tableau 1)

Les émissions de méthane par animal pendant la période d'élevage (de la naissance au premier vêlage ou de la naissance à l'abattage...) ont été calculées par période (alimentation à l'auge ou alimentation au pâturage) pour chaque catégorie d'animaux, en tenant compte de l'évolution des besoins énergétiques en fonction du poids et du gain de poids et du facteur de conversion Y'_m correspondant. Les facteurs d'émission moyens (kg de méthane émis par animal et par an) ont été ensuite calculés pour la totalité de la période d'élevage. Les effectifs d'animaux de chaque catégorie pris en compte pour le calcul des émissions annuelles de méthane sont ceux correspondant au nombre d'animaux de chaque catégorie présents au cours de l'année. Par exemple, dans le cas des taureaux abattus à l'âge de 2 ans l'effectif correspond au nombre d'ani-

maux de cette catégorie âgés de 0 à 2 ans.

Les émissions de méthane entérique par 12,40 millions de bovins en croissance et à l'engraissement (dont 1 748 000 veaux de boucherie) ont été évaluées à 458 300 tonnes pour l'année 2007, ce qui correspond à un facteur d'émission moyen de 43 kg/an si l'on exclut des effectifs les veaux de boucherie qui n'émettent pas de méthane compte tenu de leur âge à l'abattage.

Les émissions de CH_4 augmentent principalement avec l'âge et le niveau de production des animaux en croissance, en raison de l'accroissement des quantités d'aliments ingérés et digérés dans le rumen. Les rations «sèches» sont à l'origine de productions réduites de méthane. Ainsi, les taurillons abattus à 17 mois recevant ce type de rations ont un facteur d'émission qui varie de 22,6 à 29,3 kg de méthane par an, tandis que les taurillons recevant les rations traditionnelles rejettent plus de 50 kg de méthane par an en moyenne.

4 / Evaluation des émissions de méthane par les ovins

En collaboration avec nos collègues du Laboratoire d'Economie de l'Elevage (INRA, Theix) et à l'aide des informations relatives à la productivité numérique, aux taux de renouvellement des brebis, aux importations, aux exportations, aux abattages etc., nous avons pu évaluer les effectifs d'animaux des diverses catégories d'ovins (tableau 2).

Tableau 2. Facteurs d'émission et émissions totales de méthane par les ovins en France.

	Effectif annuel (x1000) année 2007	Facteur d'émission (kg/tête/an) année 2007	CH ₄ total (t/an) année 2007	% ovins
Brebis laitières	1335	14,4	19169	22,0
Brebis allaitantes	4590	11,0	50556	58,1
Béliers	174	14,7	2556	2,9
Agnelles laitières, agnelage à 13 mois	360	7,6	2895	3,3
Agnelles allaitantes, agnelage à 15 mois	782	9,3	7268	8,3
Agneaux race Herbe, herbe seule, groupe 1	235	1,0	224	0,2
Agneaux race Herbe, herbe +conc 40 kg, groupe 2	940	1,5	1387	1,6
Agneaux race Herbe, bergerie + conc 65 kg, groupe 3	1175	0,8	907	1,0
Agneaux race rustique, bergerie + conc 65 kg, groupe 4	2350	0,9	2141	2,4
Total ovins	11941	7,3	87103	100

4.1 / Evaluation des émissions de méthane par les brebis laitières

Leurs besoins énergétiques ont été évalués à partir des Tables INRA (INRA 2007) et des informations recueillies sur le poids, la prolificité, la production laitière et l'alimentation des brebis de races Lacaune, Pyrénées Atlantiques et Corses. La brebis représentative de la population française des brebis laitières a un poids de 70 kg, une prolificité de 1,3 agneau et une production laitière de 220 kg. Elle agnelle le 01/12 et est traitée du 01/01 au 15/06. Elle reçoit une alimentation à l'auge du 01/12 au 15/04 et sa ration est constituée de 70% de foin et de 30% de concentré.

Les besoins énergétiques totaux en UFL par jour ont été calculés semaine par semaine en ajoutant les besoins d'entretien, de gestation, de lactation et de déplacements au pâturage. Les besoins de lactation tiennent compte de l'évolution de la production laitière et de la composition du lait. Les besoins en EM ont été calculés en multipliant les besoins en UFL par 1,7 puis en divisant par le facteur «kl» égal à 0,60, comme pour les vaches laitières.

Détermination des facteurs de conversion Y'_m

Alimentation à l'auge : faute de données bibliographiques complètes sur les émissions de méthane par les brebis laitières au cours de la lactation, il a été convenu d'utiliser les valeurs de Y'_m obtenues en chambres respiratoires avec des brebis laitières en 2^{ème} et 5^{ème} semaines de lactation, puis tariées et reconstituant leurs réserves corporelles. Elles recevaient une ration classique, composée de 70% de foin et 30% de concentré. La valeur de Y'_m était en moyenne égale à $12,3 \pm 0,59$ (Vermorel *et al* 1987).

Alimentation au pâturage : il existe très peu de données complètes et fiables sur les émissions de méthane par les ovins au pâturage mesurées par la méthode au SF₆ ou sous tunnel ventilé (manque d'informations sur les quantités d'herbe ingérée et la digestibilité de l'herbe). Les résultats obtenus dans 8 études réalisées en chambres respiratoires avec des moutons recevant de l'herbe fauchée (18 rations) montrent que (comme chez les bovins) Y'_m diminue quand la digestibilité de l'énergie (dE) de l'herbe augmente :

$$Y'_m = -0,150 \text{ dE} + 21,89$$

$$N = 18 \text{ R}^2 = 0,58 \text{ (etr} = 1,03)$$

(équation 6)

Pour des valeurs de dE de l'herbe comprises entre 60 et 76%, les valeurs de Y'_m sont proches de celles observées chez les bovins. C'est pourquoi nous avons retenu pour les brebis laitières et les brebis allaitantes au pâturage la valeur $Y'_m = 12 \pm 1,04$ déjà utilisée pour les vaches allaitantes et les jeunes bovins en pâturage extensif.

Le facteur d'émission des brebis laitières a été évalué en moyenne à **14,4 kg** par brebis et par an. **Le bilan des émissions de méthane entérique par les 1 335 000 brebis laitières est de 19 169 tonnes par an (tableau 2).**

4.2 / Evaluation du facteur d'émission de méthane par les brebis allaitantes

La brebis représentative des brebis allaitantes, de races herbagères ou rustiques, a un poids vif de 65 kg, une prolificité de 1,3 agneau, une productivité numérique de 1,1 agneau élevé ou vendu par an, et une production laitière permettant un gain de poids de la portée de 360 g/j au cours du premier mois (250 à 300 g/agneau). Les brebis sont tariées après 10 à 12 semaines de lactation, sauf exception (cas des agneaux d'herbe élevés sous la mère).

Environ 65% des brebis allaitantes agnellent en fin d'hiver (date retenue dans cette étude : 01/03). Elles allaitent en moyenne pendant 6 semaines en bergerie, puis pendant 4 à 6 semaines au pâturage. Les autres brebis allaitantes (35%) agnellent en automne (date choisie : 01/11). En bergerie les brebis en lactation reçoivent une ration composée de 80% de foin de bonne qualité et de 20% d'aliment concentré.

Les besoins énergétiques totaux (UFL/j) et les apports en EM des brebis allaitantes ont été calculés semaine par semaine, comme ceux des brebis laitières.

Evaluation de Y'_m : les valeurs utilisées pour l'alimentation au pâturage, d'une part, et l'alimentation à l'auge en période de lactation, d'autre part, sont les mêmes que celles utilisées pour les brebis laitières puisque les rations sont voisines. Après la période de tarissement les brebis en bergerie reçoivent généralement un foin de qualité moyenne à médiocre correspondant à une valeur de Y'_m voisine de 15 déjà retenue pour les vaches tariées. En fin de gestation les brebis présentes en

bergerie reçoivent un foin de bonne qualité et du concentré en quantité croissante. La valeur de Y'_m alors utilisée pour cette période a varié de 14 à 12,3.

Le facteur d'émission des brebis allaitantes est en moyenne de **11 kg** par brebis et par an. **Le bilan des émissions de méthane entérique** par les 4,50 millions de brebis allaitantes est de **50 550 tonnes** par an (tableau 2).

4.3 / Evaluation des émissions de méthane par les agnelles, futures reproductrices

Agnelles de races laitières : la mise bas des brebis a lieu à la fin de l'automne (01/12) en bergerie. L'allaitement dure un mois. Ensuite les agnelles reçoivent *ad libitum*, pendant un mois, un régime composé de 15% de foin de bonne qualité et 85% de concentré ($Y'_m = 3,6$). Le pourcentage de concentré est alors réduit à 50% ($Y'_m = 10,4$, Vermorel *et al* 2008). Les agnelles vont au pâturage vers la mi-avril et les facteurs de conversion retenus sont les suivants : $Y'_m = 9,3$ jusqu'à fin mai, 11,3 en juin et juillet, 12,1 en septembre, 12,7 en octobre.

Les agnelles sont mises à la lutte à l'âge de 8 mois, début août, rentrent en bergerie à la mi-novembre et mettent bas fin décembre ou début janvier. En fin de gestation, elles reçoivent un foin de bonne qualité et de l'aliment concentré (Y'_m évalué à 12).

Agnelles de races allaitantes : les mises bas ont lieu en majorité à la fin de l'hiver (de janvier à mars) en bergerie. L'allaitement dure de 10 à 12 semaines. A la mi-mai, les agnelles sevrées vont au pâturage où elles reçoivent du concentré jusqu'à fin juillet ($Y'_m = 9,5$ à 10,5 puis 11,3 pour chaque mois). Les valeurs de Y'_m pendant le pâturage en août et septembre ont été de 12,1, et de 12,7 en octobre. Les agnelles sont rentrées en bergerie au début de novembre et sont mises à la lutte au début de janvier à l'âge moyen de 10 mois. Elles reçoivent un foin de bonne qualité ($Y'_m = 14$) jusqu'à la mi-avril. A cette période elles vont au pâturage ($Y'_m = 9,3$) jusqu'à la mise bas, début juin.

Besoins énergétiques : les valeurs des besoins partiels (entretien, croissance, gestation) ont été tirées des Tables INRA (INRA 2007). Les besoins totaux (en UFL) ont été calculés semaine par semaine puis convertis en EM en mul-

tipliant par 1,7 puis en divisant par «kl» égal à 0,60. Les valeurs de Y'_m utilisées pour chaque période d'élevage ont été indiquées ci-dessus.

L'émission de méthane de la naissance au premier agnelage est en moyenne de **7,5 kg** pour les agnelles de race laitière (agnelage à l'âge de 13 mois) et de **9,3 kg** pour les agnelles de race allaitante (agnelage à l'âge de 15 mois). Ces valeurs ont été retenues comme facteurs d'émission puisque les durées d'élevage sont proches d'un an et qu'à peu près les mêmes effectifs d'agnelles sont élevés chaque année.

Le bilan des émissions de méthane entérique par les 1 142 000 agnelles (futures reproductrices) **s'élève à 10 163 tonnes pour l'année 2007**, soit 14,3% de l'émission annuelle des brebis laitières et allaitantes.

4.4 / Evaluation des émissions de méthane par les agneaux de boucherie

Le nombre total d'agneaux de boucherie produits en France en 2007 est de 4,7 millions. Leurs besoins énergétiques journaliers totaux (en UFV) ont été évalués en fonction du potentiel de croissance, du sexe, du poids et du gain de poids (INRA 2007). Les apports d'UFV par le lait ont été calculés à partir de la quantité de lait ingéré et de la valeur énergétique du lait de brebis (0,50 UFV/kg de lait). Les valeurs de Y'_m correspondant à l'utilisation des aliments solides ont été tirées des données obtenues en chambres respiratoires avec des agneaux de 25 à 35 kg recevant des rations à base de foin comportant de 0 à 85% d'aliment concentré (Vermorel *et al* 2008).

Les émissions de méthane par les agneaux de boucherie ont été calculées pour la période allant de la naissance à l'abattage à l'âge de 4 à 5,5 mois. Quatre types de production d'agneaux de boucherie ont été distingués selon le mode d'élevage et d'engraissement :

- **Type 1** (5% de l'effectif total) : agneaux de races allaitantes herbagères, mâles, simples, à potentiel de croissance élevé, nés à la fin de l'hiver, élevés sous la mère à l'herbe jusqu'à l'abattage (à 120 j) sans recevoir de concentré. Leur consommation d'herbe étant faible, on a utilisé les mêmes valeurs de Y'_m que pour les agnelles. L'émission de méthane est en moyenne de 0,96 kg par animal pour la période d'élevage ;

- **Type 2** (20% de l'effectif total) : agneaux de races allaitantes herbagères,

mâles ou femelles, simples ou doubles, nés à la fin de l'hiver, à potentiel de croissance élevé ou modéré, élevés à l'herbe, sevrés à l'âge de 12 semaines, engraisés à l'herbe avec du concentré en nourrisseur (40 kg par agneau). Ils sont abattus à l'âge de 5,5 mois et au poids de 40 kg en moyenne. La part de l'herbe passe de 15 à 50% de la MS ingérée. Les valeurs de Y'_m utilisées ont été augmentées progressivement de 4 à 10. L'émission de méthane est en moyenne de 1,50 kg par agneau pendant la période d'élevage ;

- **Type 3** (25% de l'effectif total) : agneaux de races allaitantes herbagères, mâles ou femelles, simples ou doubles, nés à la fin de l'hiver, à potentiel de croissance élevé ou modéré, élevés à l'herbe, sevrés à l'âge de 10 semaines, engraisés en bergerie avec 65 kg de concentré par agneau. Ils sont abattus à l'âge de 140 j et au poids de 42 kg en moyenne. La valeur de Y'_m utilisée (3,6) est celle obtenue avec une ration comportant 85% de concentré (Vermorel *et al* 2008). L'émission de méthane est en moyenne de 0,77 kg par agneau pendant la période d'élevage ;

- **Type 4** (50% de l'effectif total) : agneaux de races allaitantes rustiques, mâles ou femelles, simples ou doubles, nés à la fin de l'hiver ou en automne, à potentiel de croissance modéré, élevés à l'herbe (ou en bergerie), sevrés à l'âge de 10 semaines, engraisés en bergerie avec 65 kg de concentré par agneau. Ils sont abattus à l'âge de 5,0 - 5,5 mois et au poids de 40 kg en moyenne. C'est également le cas de la plupart des agneaux de races laitières. La valeur de Y'_m utilisée est également de 3,6 (Vermorel *et al* 2008). L'émission de méthane est en moyenne de 0,91 kg par agneau pendant la période d'élevage.

Le bilan des émissions de méthane entérique par les 4,70 millions d'agneaux de boucherie est proche de **4660 tonnes pour l'année 2007** (tableau 2).

4.5 / Bilan des émissions de méthane par les ovins (tableau 2)

Les émissions de méthane entérique par les **11,94 millions d'ovins élevés en France** sont proches de **87 100 tonnes pour l'année 2007**, ce qui représente **6,4% des émissions totales des animaux d'élevage**. Le facteur d'émission varie largement en fonction de la catégorie animale : il est de 11 à 14,7 kg pour les moutons adultes (brebis laitières, brebis allaitantes et

béliers), de 7,6 à 9,3 pour les agnelles reproductrices, et de 0,8 à 1,5 pour les agneaux de boucherie selon le mode d'élevage et d'engraissement.

5 / Evaluation des émissions de méthane par les caprins

Les effectifs des caprins ont été très stables depuis 2001. L'estimation de 2007 correspond à la moyenne des effectifs rapportés de 2001 à 2006 (Agreste 2007). Les chèvres en lactation ont un poids vif moyen de 65 kg, produisent en moyenne 650 kg de lait à 35 g de taux butyreux par an. Ce calcul est effectué à partir de l'estimation de la collecte nationale et non à partir des résultats du contrôle laitier, ce dernier ne portant que sur 300 000 chèvres dont la production est très supérieure (800 kg/chèvre) à la moyenne nationale.

Les chevrettes ont été regroupées en une population de 0 à 1 an. Leur rumen n'est fonctionnel que pendant 10 mois ce qui a conduit à évaluer la production de méthane pendant cette seule période. Elles pèsent en moyenne 40 kg à l'âge d'un an. Le poids vif moyen des boucs a été évalué à 90 kg et celui des caprins divers à 60 kg.

L'équation de prédiction de Mills *et al* (2003) (équation 1) n'est pas adaptée aux caprins, ne serait-ce que parce que le terme constant est environ le triple de l'émission de méthane d'une chèvre en lactation. Les émissions de méthane ont été calculées à l'aide de l'équation de prédiction spécifique suivante établie par Sauvart et Giger-Reverdin (2008) à partir de 37 mesures publiées d'émission de méthane par différents lots et types de caprins, en lactation ou non :

$$E_{CH_4} \text{ (Mcal/J)} = 0,091 \text{ PL}_{35} + 0,0055 \text{ PV} \quad (\text{équation 7})$$

(etr = 0,09 Mcal/j) avec PL_{35} = production de lait à 35 g de TB (kg) ; PV = poids vif des animaux (kg)

Le bilan des émissions de méthane entérique par les 1 224 000 caprins est estimé à **14 579 tonnes pour l'année 2007**. Le **facteur d'émission moyen est de 11,9 kg** de méthane par animal et par an. Il varie de 5 chez les chevrettes à 14,3 chez les chèvres laitières (tableau 3). **La contribution des caprins aux émissions totales de CH_4 entérique est faible puisqu'elle représente 1,1% des émissions de l'ensemble des animaux d'élevage.**

Tableau 3. Facteurs d'émission et émissions totales de CH₄ par les caprins en France.

	Effectif annuel (x1000) année 2007	Facteur d'émission (kg/tête/an) année 2007	CH ₄ total (t/an) année 2007	% caprins
Chèvres laitières	841	14,3	12032	82,5
Chevrettes	266	5,0	1330	9,1
Boucs	35	13,5	473	3,2
Caprins divers	82	9,1	744	5,1
Total caprins	1224	11,9	14579	100

6 / Evaluation des émissions de méthane par les équins

6.1 / Les effectifs d'équins

Les évaluations des effectifs des diverses catégories d'équins faites en novembre 2007 à partir des statistiques officielles des Haras Nationaux (Annuaire ECUS 2006) sont très supérieures aux effectifs indiqués par la base d'Agreste (2007). Cela s'explique par le régime fiscal actuel plus favorable qu'auparavant et l'identification généralisée des équins qui ont pris en

compte des animaux qui n'avaient pas été recensés précédemment.

6.2 / Démarche utilisée pour évaluer les émissions de méthane

Il existe très peu de données sur les émissions de méthane par les équins en-dehors de celles obtenues avec 12 rations distribuées à des chevaux de selle (Vermorel *et al* 1997), et avec quelques rations seulement chez les chevaux lourds en Allemagne et en Roumanie et les poneys en France (Vermorel et Vernet 1991).

La démarche utilisée pour évaluer les émissions de méthane par les équins est voisine de celle adoptée pour les ruminants, avec la différence suivante : les besoins (ou les apports énergétiques recommandés) exprimés en UFC sont convertis en énergie digestible en utilisant les équations de prédiction du système UFC (Vermorel et Martin-Rosset 1997). L'émission de méthane est ensuite calculée à partir de la quantité d'énergie digestible ingérée à l'aide d'une équation de prédiction de l'énergie du méthane en pourcent de l'énergie digestible ingérée (E_{CH_4} % ED) (Vermorel *et al* 1997) :

$$E_{CH_4} (\% ED) = 7,57 - (0,12 \times 28,4 \text{ CB } \%) - (0,01 \times \text{MAT } \%) - (0,05 \text{ GC } \%)$$

(équation 7)

avec CB : cellulose brute ; MAT : matières azotées totales ; GC : glucides cytoplasmiques

6.3 / Evaluation des émissions de méthane par les équins

Pour chaque catégorie d'équins présentée dans le tableau 4 et pour chaque stade physiologique (entretien seul, gestation, lactation, stade de croissance...), et chaque type d'alimentation (à

Tableau 4. Facteurs d'émission et émissions de méthane par les équins en France.

	Effectif annuel (x1000) année 2007	Facteur d'émission (kg/tête/an) année 2007	CH ₄ total (t/an) année 2007	% équins
Juments races lourdes nourrices	51	29,4	1489	7,4
Juments races lourdes non fécondées	38	19,4	734	3,6
Poulains races lourdes abattus à 8 mois	27	3,7	101	0,5
Poulains races lourdes abattus à 12 mois	7	13,5	92	0,5
Poulains + pouliches races lourdes, renouvellement (0-36 mois)	27	21,6	594	2,9
Etalons races lourdes	3	22,3	60	0,3
Juments de sport et loisir, nourrices	90	25,1	2273	11,2
Juments de sport et loisir, non fécondées	23	17,5	402	2,0
Chevaux de sport et loisir	381	20,4	7784	38,5
Poulains de race sport et loisir (0-36 mois)	110	19,9	2187	10,8
Etalons de sport et loisir	9	23,5	211	1,0
Chevaux de course	16	30,2	488	2,4
Poulains de course (0-24 mois)	60	17,9	1071	5,3
Poulains de course (24-48 mois)	60	30,2	1812	9,0
Total chevaux	900	21,4	19298	95,5
Ponettes et ânesses, nourrices	13	14,6	188	0,9
Femelles non fécondées, poneys et ânes	25	10,0	252	1,2
Etalons ânes et poneys	2	11,5	22	0,1
Poneys et ânon (0-3 ans)	35	12,7	442	2,2
Total ânes et poneys	75	12,1	904	4,5
Total équins	975	20,7	20202	100

l'écurie ou au pâturage), nous avons calculé l'émission journalière de méthane à partir de l'apport recommandé en UFC (INRA 1990) et de la composition moyenne des rations utilisées en France.

Les besoins énergétiques des différentes catégories d'équins ont été déterminés de la manière suivante :

- les besoins de tous les chevaux au pâturage, ont été considérés égaux à 110% des besoins d'entretien. Les besoins énergétiques des étalons ont été considérés égaux à 115% de ceux des juments non fécondées ou des hongres ;

- pour les juments suitées, il a été tenu compte de l'évolution des besoins au cours des 4 derniers mois de gestation et des 6 mois de lactation ;

- les chevaux de courses (adultes et poulains de 3 et 4 ans) entraînés pour la compétition ont été traités séparément en raison de leurs besoins énergétiques élevés et de leur rationnement particulier. En revanche les juments et les poulains de 1 et 2 ans ont été traités comme les juments et les poulains de sport et de loisirs ;

- dans le cas des poulains il a été tenu compte de la consommation moyenne de lait au cours des 6 mois d'allaitement et de l'apport énergétique du lait (0,20 UFC par kg) et du gain de poids ;

- dans le cas des poneys et des ânes, faute d'informations précises sur leurs besoins énergétiques, les émissions de méthane ont été évaluées à partir des valeurs calculées pour les chevaux de races lourdes en fonction du poids métabolique.

6.4 / Bilan des émissions de méthane entérique par les équins

Les rejets annuels de méthane entérique par les équins ont été évalués à **20 202 tonnes pour un effectif global de 975 000 animaux en 2007 (tableau 4). Le facteur d'émission est en moyenne de 20,7 kg /animal/an.** La valeur la plus élevée (29,4 kg) a été obtenue pour les juments nourrices de races lourdes. Cette valeur est égale à 34% de celle obtenue pour une vache de race allaitante nourrice.

7 / Evaluation des émissions de méthane par les porcs

Chez le porc (comme chez le cheval) c'est au niveau du gros intestin,

Tableau 5. Evaluation des facteurs d'émissions et des bilans des émissions de méthane entérique par les différentes catégories de porcs.

	Effectif total/an ⁽¹⁾ (x1000) année 2007	Facteur d'émission ⁽²⁾ (kg/tête/an) année 2007	CH ₄ total (t/an) année 2007	% porcins
Jeunes truies	263	0,78	206	1,7
Verrats	24	0,78	19	0,2
Truies reproductrices	993	3,01	2994	25,0
Porcelets sevrés < 20 kg	5298	0,31	1665	13,9
Porcs à l'engrais >20 kg	8261	0,86	7089	59,1
Total porcs	14840	0,81	11985	100

(1) Les effectifs de porcins indiqués dans ce tableau sont ceux présents à un moment donné ; compte tenu de la durée de présence inférieure à une année pour les porcelets, les porcs à l'engrais et les jeunes truies, ces effectifs sont inférieurs aux nombres d'animaux produits par an.

(2) Quantité de méthane émise au cours d'une année par un porc ou plusieurs porcs si la durée de la période d'élevage est inférieure à un an.

constitué d'un cæcum volumineux et du côlon, que se déroulent les processus fermentaires décrits précédemment pour le rumen. La population microbienne qu'il héberge a la capacité de produire du méthane mais en quantité moindre qu'un ruminant puisque une partie importante de la matière organique a été préalablement digérée dans l'intestin grêle. En outre, une voie originale d'utilisation de l'hydrogène métabolique comme l'acétogénèse concurrence la méthanogénèse alors que cette voie est pratiquement négligeable dans le rumen.

7.1 / Méthode utilisée pour évaluer les émissions de méthane par les porcs

Les émissions de méthane par les porcins dépendent de la quantité de matière organique fermentée dans le gros intestin et donc du flux de matière organique digestible non digérée dans l'intestin grêle (ou Résidu digestible). Celui-ci correspond, pour l'essentiel, à la fraction de fibres alimentaires digestibles et est estimé de la façon suivante :

Résidu digestible = Matière organique digestible - Matières azotées digestibles - Matières grasses digestibles - Amidon - Sucres (et lactose).

Les teneurs en «Résidu digestible» des matières premières utilisées dans les aliments du porc sont indiquées dans les Tables INRA et AFZ (Noblet *et al* 2002) avec des valeurs différentes pour les porcs en croissance et les porcs adultes (truies et verrats) puisque l'intensité des fermentations digestives est fonction du poids vif des porcs. La quantité de méthane liée à la fermenta-

tion dans le gros intestin a été évaluée à partir des résultats de Le Goff (2001) et Noblet *et al* (2003). Des équations différentes sont utilisées pour les porcs en croissance et pour les truies reproductrices :

CH_4 (kg) = 0,024 x Résidu digestible (kg)
pour les porcs adultes $R^2 = 0,70$

(équation 8)

CH_4 (kg) = 0,012 x Résidu digestible, kg pour
les porcs en croissance $R^2 = 0,70$

(équation 9)

Les calculs réalisés sont basés sur des aliments conventionnels pour chacun des stades de production et qui se différencient en particulier par leurs teneurs en «Résidu digestible» (tableau 5). Ils prennent également en compte des performances moyennes issues des données de suivi du cheptel de porcs en France pour ce qui concerne la croissance (460 et 760 g/j en post-sevrage et en croissance-finition ; 600 g/j chez la cochette), la consommation (1250 kg/an par truie reproductrice) et l'efficacité alimentaire (1,70 et 2,90 en post-sevrage et en croissance-finition) Les résultats de cette approche ont été multipliés par les effectifs de porcs à chaque stade de production pour calculer les émissions de méthane entérique par les porcs en France. Les résultats sont présentés au tableau 5.

Les émissions de méthane entérique par les porcs représentent près de **12 000 tonnes pour l'année 2007, soit 0,9% des émissions totales par les animaux d'élevage.** Les truies reproductrices ont le facteur d'émission le plus important (3 kg de méthane/an) mais, en raison de leur nombre, ce sont les porcs à l'engrais qui émettent les quantités de méthane les plus importantes (tableau 5).

Tableau 6. Bilans des émissions de CH₄ par les différentes espèces d'animaux d'élevage en France.

	Effectif annuel (x1000) année 2007	Facteur d'émission (kg/tête/an) année 2007	CH ₄ total (t/an) année 2007	% Emissions totales
Vaches et mâles reproducteurs				
Vaches laitières	3799	117,7	447197	31,7
Vaches allaitantes	4077	86,1	351120	24,9
Total Vaches	7876	101,4	798317	56,6
Taureaux adultes + jeunes reproducteurs	242	86,3	20888	1,5
Bovins en Croissance				
Total génisses "Reproduction"	6306	45,5	287114	19,2
Total génisses abattues à 26-27 mois	1067	48,7	51952	3,7
Taurillons abattus à 17 mois + taureaux de 2 ans	1354	49,4	66847	4,7
Total broutards et broutardes de 10 mois	1088	7,8	8538	0,6
Bœufs de 40 mois	833	52,3	43541	3,1
Veaux de boucherie	1748	0,0	0,0	0,0
Total bovins en croissance	12396	37,0	458279	32,5
Total bovins	20514	62,3	1277484	90,6
Ovins	11941	7,3	87103	6,2
Caprins	1224	11,9	14579	1,0
Equins				
Chevaux	902	21,4	19298	1,4
Ânes et poneys	75	12,1	904	0,1
Total équins	977	20,7	20202	1,5
Total des animaux herbivores	34657	40,4	1399368	99,2
Porcins	14840	0,81	11985	0,8
Total des animaux (herbivores + porcs)	49497	27,3	1411353	100

Discussion - Conclusion

Les émissions de méthane par les animaux d'élevage en France en 2007 ont été évaluées dans l'esprit des recommandations du rapport 2006 de l'IPCC, c'est-à-dire selon la méthode Tier 3, en prenant en compte les différentes catégories d'animaux et types de production pour chaque espèce, ainsi que les modes d'élevage et d'alimentation utilisés en France, et toutes les données expérimentales obtenues en France sur les émissions de méthane par plusieurs catégories d'animaux (brebis, agneaux, chevaux, porcs...). En revanche, nous n'avons pas retenu la démarche proposée dans Tier 2 et Tier 3 pour calculer les besoins des animaux dans les systèmes énergétiques nord-américains. Il était plus simple et plus pratique de partir des besoins énergétiques ou apports recommandés totaux présentés dans les Tables de l'INRA (INRA 2007) selon le poids et le niveau de production des animaux, en ajoutant des corrections

pour tenir compte des dépenses supplémentaires dues aux déplacements.

Des facteurs de conversion Y'_m (rapportés à l'EM) ont été utilisés plutôt que les facteurs Y_m (rapportés à l'énergie brute) proposés dans Tier 2 qui auraient entraîné une masse irréalisable de calculs. L'équation de prédiction de Y'_m proposée par Mills *et al* (2003) a été validée dans le cas des rations utilisées en France pour les vaches laitières. Des équations de prédiction ont été calculées à partir des données de la littérature, en particulier pour les animaux au pâturage et les bovins en croissance-engraissement. Enfin, des équations de prédiction spécifiques ont été calculées à partir des données obtenues en France ou tirées de la littérature et utilisées dans le cas des ovins, des caprins, des équins et des porcins. L'évaluation détaillée des émissions de méthane par les animaux des nombreuses catégories considérées, permet également de prendre en compte les effets des variations des modes d'élevage et des effectifs

d'animaux sur les émissions de méthane.

Des approximations ont dû être faites en particulier pour les rendements d'utilisation de l'EM par les animaux en lactation ou en croissance-engraissement et en prenant en compte la composition moyenne des rations ingérées à l'âge par les animaux de chaque catégorie. Des améliorations pourront être apportées ultérieurement à chacune des étapes de calcul, en particulier dans l'établissement des effectifs d'animaux des diverses catégories, des besoins énergétiques et des facteurs de conversion, pour augmenter la précision de l'évaluation des émissions de méthane.

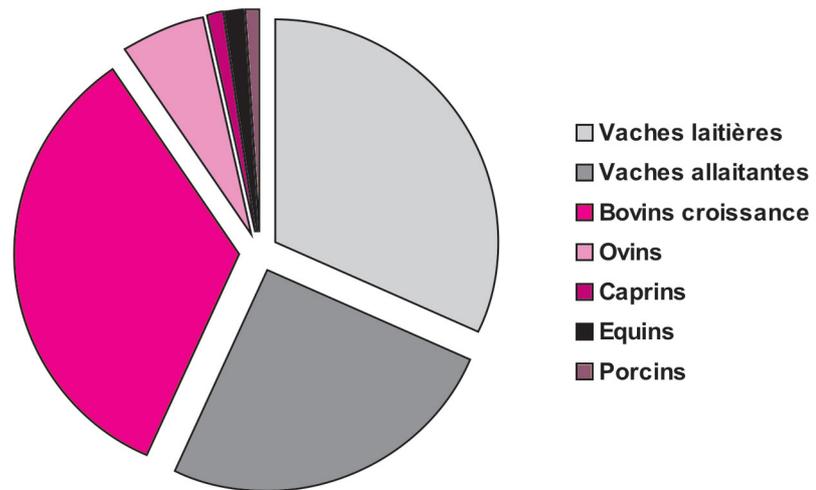
L'émission annuelle totale de méthane entérique par les animaux d'élevage en France en 2007 s'élève à **1,41 million de tonnes** (tableau 6). Cette valeur est supérieure de 3,4% à celle calculée par la méthode Tier 1 qui utilise des facteurs d'émission moyens pour les principales catégories d'animaux. Le facteur d'émission moyen obtenu

Tableau 7. Comparaison des facteurs d'émission (kg CH₄/animal/an) calculés dans la présente étude ou par la méthode Tier 1 (IPCC 2006).

	Présente étude	Tier 1
Vaches laitières	117,7	109
Autres bovins	55,5*	57
Ovins	7,3	5
Caprins	11,9	5
Chevaux	21,4	18
Ânes et poneys	12,1	10
Porcins	0,8	1

pour les vaches laitières est supérieur à celui proposé dans la méthode Tier 1 pour les pays d'Europe occidentale (117,7 contre 109 kg/animal/an). Cette différence peut s'expliquer en partie par la production laitière un peu supérieure (6300 contre 6000 kg par an), par la légère surestimation (+ 2,5%) des évaluations des émissions de méthane des vaches laitières alimentées à l'auge, calculées à l'aide l'équation de Mills *et al* (2003), et surtout par la prise en compte des dépenses énergétiques dues au pâturage. Pour les «autres bovins», c'est-à-dire les vaches allaitantes et les bovins en croissance/engraissement les facteurs d'émission moyens des deux méthodes sont très voisins si on ne compte que les animaux ruminants (55,5 et 57 kg/animal/an, tableau 7). En revanche, la différence est plus importante (49,7 contre 57 kg/animal/an) si

Figure 2. Contribution relative (%) des principales catégories d'animaux d'élevage aux émissions de méthane entérique en France.



on inclut les veaux de boucherie qui ne produisent pas de méthane. Les différences relatives de facteurs d'émission entre les deux méthodes d'évaluation sont plus importantes dans le cas des ovins et des caprins, probablement en raison du poids et de la production laitière supérieurs de ces animaux en France.

Les vaches et les mâles reproducteurs constituent la principale source d'émission du méthane entérique puisqu'ils représentent à eux seuls 58% des rejets totaux (32% pour les vaches laitières et 26% pour les vaches allaitantes). Les

bovins en croissance et à l'engraissement arrivent en seconde position, avec une contribution de 32,5% des émissions totales. Au total, les bovins contribuent donc pour plus de 90% aux émissions totales de méthane entérique (figure 2). En conséquence la part des autres espèces animales est mineure : ovins : 6,2%, caprins : 1%, équins : 1,5% et porcins 0,8%. C'est donc principalement sur les bovins que doit porter l'effort de réduction des émissions de méthane à l'avenir si l'on veut minimiser l'impact des gaz entériques sur le phénomène du réchauffement global.

Références

- Agreste Conjoncture, 2007. Productions animales. Bovins, enquête de novembre 2006, 3, 1-2.
- Andrieu J., Demarquilly C., 1987. Valeur nutritive des fourrages : tables et prévision. Bull. Tech. CRZV Theix, 70, 61-73.
- Annuaire ECUS, 2006. Tableau économique statistique et graphique du cheval en France. Les Haras Nationaux (Ed), Arnac-Pompadour, France, 64p.
- Baumont R., Traclet M., Le Morvan A., Egal D., Jouven M., D'Hour P., 2006. Diet quality and intake during the grazing season in beef cows on permanent pastures. Grassland Soc. Eur., 11, 489-491.
- Branine M.E., Johnson D.E., 1990. Level of intake effects on ruminant methane loss across a wide range of diets. J. Anim. Sci., 68 (Suppl. 1), 509-510.
- Bruinenberg M.H., Zom R.L.G., Valk H., 2002. Energy evaluation of fresh grass in the diets of lactating dairy cows. Neth. J. Agric. Sci., 50, 67-81.
- CITEPA 2007. Emissions dans l'air ; données nationales sur le méthane [www.citepa.org/emissions/nationale/Ges/ges_ch4.htm].
- Ellis J.L., Kebreab E., Odongo N.E., McBride B.W., Okine E.K., France J., 2007. Prediction of methane production from dairy and beef cattle. J. Dairy Sci., 90, 3456-3467.
- FAO, 2006. Livestock's long shadow; environmental issues and options. Rapport, 408p.
- Grainger C., Holmes C.W., Moore Y.F., 1985. Performance of friesian cows with high and low breeding indexes. 2. Energy and nitrogen balance experiments with lactating and pregnant, non-lactating cows. Anim. Prod., 40, 389-400.
- INRA, 1988. Alimentation des Bovins, ovins et caprins. Jarrige R. (Ed), INRA Editions, Paris, 471p.
- INRA, 1990. Alimentation des Chevaux. Martin-Rosset W. (Ed), INRA Publication, Paris, France, 232p.
- INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins ; besoins des animaux. Valeurs des aliments. Tables INRA 2007. Editions Quæ, Paris, France, 307p.
- INRAP, 1984. Alimentation des bovins. ITEB (Ed), Paris France, 447p.
- IPCC, 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Agriculture, forestry and other land use ; Emissions for livestock and manure management, 4, Chap. 10, 87p.
- ITEB, 1989. Pratique de l'alimentation des bovins. Tables INRA 1988, ITEB (Ed), Paris, France, 168p.
- Johnson K., Huylar M., Westburg H., Lamb B., Zimmerman P., 1994. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF₆ tracer technique. Env. Sci. Technol., 28, 359-362.
- Jouven M., Agabriel J., Baumont R., 2008. A model predicting the seasonal dynamics of intake and production for suckler cows and their calves fed indoors or at pasture. Anim. Feed Sci. Technol., sous presse.
- Le Goff G., 2001. Etudes des mécanismes impliqués dans l'évolution de la digestion et de l'utilisation métabolique des fibres alimentaires au cours de la vie du porc ; conséquences sur l'estimation de la valeur énergétique des aliments. Thèse, Doctorat Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Rennes, France, 221p.
- Martin C., Dubroeuq H., Micol D., Agabriel J., Doreau M., 2007. Methane output from beef cattle fed different high-concentrate diets. Ann.

Conf. Brit. Soc. Anim. Sci., 2-4 April., Dublin, Irlande, 46.

Miller T.L., 1995. Ecology of methane production and hydrogen sinks in the rumen. In : Ruminant physiology: digestion, metabolism, growth and reproduction. Engelhardt W.V., Leonhard-Marek S., Breves G., Giesecke D. (Eds) Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, Germany, 317-331.

Mills J.A.N., Kebreab E., Yates C.M., Crompton L.A., Cammell S.B., Dhanoa M.S., Agnew R.E., France J., 2003. Alternative approaches to predicting methane emissions from dairy cows. *J. Anim. Sci.*, 81, 3141-3150.

Moss A., Jouany J.P., Newbold C.J., 2000. Methane production by ruminants: its contribution to global warming. *Ann. Zootech.*, 49, 231-253.

Noblet J., Sève B., Jondreville C., 2002. Valeurs nutritives pour les porcs. In : Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage: porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. Sauviant D., Perez J.M., Tran G. (Eds), INRA Editions, Versailles, France, 25-35.

Noblet J., Bontems V., Tran G., 2003. Estimation de la valeur énergétique des aliments pour le porc. *INRA Prod. Anim.*, 16, 197-210.

Normand J., 2006. Caractérisation technique du troupeau allaitant: opération No T0345. Institut de l'Élevage et Interbev, juin, 61p.

Sauviant D., Giger-Reverdin S., 2007. Empirical modelling by meta-analysis of digestive interactions and CH₄ production in ruminants. In: Energy and protein metabolism and nutrition. Ortigues-Marty I., Miraux N., Brand-Williams W. (Eds), Wageningen Academic Publishers, Wageningen, Holland, 561-562.

Sauviant D., Giger-Reverdin S., 2008. Utilisation de l'énergie et production de méthane par la chèvre laitière. *Renc. Rech. Rum.*, à paraître.

Van Es, A.J.H., 1961. Between-animal variation in the amount of energy required for the maintenance of energy required for the maintenance of cows. Thèse, Doctorat Centrum voor Landbouwpublikatiesen Landbouwdocumentatie, Wageningen, Netherlands, 116p.

Van Es A.J.H., 1975. Feed evaluation for dairy cows. *Livest. Prod. Sci.*, 2, 95-107.

Vermorel M., 1995. Émissions annuelles de méthane d'origine digestive par les bovins en France. Variations selon le type d'animal et le niveau de production. *INRA Prod. Anim.*, 8, 265-272.

Vermorel M., Vernet J., 1991. Energy utilization of digestion end-products for maintenance in ponies. In: Energy metabolism of farm animals. Wenk C., Boessinger M. (Eds), EAAP Publ. Institut für Nutztierwissenschaften, ETH Zentrum, Zürich, Switzerland, 58, 433-436.

Vermorel M., Martin-Rosset W., 1997. Concepts, scientific bases, structure and validation of the French horse net energy system (UFC). *Livest. Prod. Sci.*, 47, 261-275.

Vermorel M., Bocquier F., Vernet J., Brelurut A., 1987. Mobilization and reconstitution of body reserves in dairy ewes studied by indirect calorimetry and D₂O dilution technique. *Proc. 10th Int. Symp. Energy Metabolism Farm Animals*, EAAP Publ., Moe P.W., Tyrrell H.F., Reynolds P.J. (Eds), 32, 314-317.

Vermorel M., Martin-Rosset W., Vernet J., 1997. Energy utilization of twelve forages or mixed diets for maintenance by sport horses. *Livest. Prod. Sci.*, 47, 157-167.

Vermorel M., Degez P., Bouvier J.C., Anglaret Y., Ortigues-Marty I., 2008. Effects of pelleting hay, percentage of concentrate feed, and level of intake on digestibility, metabolisability and net energy value of diets in lambs (en préparation).

Résumé

Le méthane entérique représente respectivement 45 et 65% des émissions totales de méthane et des émissions d'origine agricole en France, et serait responsable d'environ 5% du réchauffement global dans notre pays. L'objectif de ce document est d'actualiser l'estimation des émissions annuelles de méthane entérique des diverses catégories des principales espèces d'animaux d'élevage dans l'esprit des recommandations du rapport 2006 de l'IPCC (Tier 3), en prenant en compte toutes les informations disponibles sur les types d'animaux et les méthodes d'élevage. Les émissions ont été estimées à partir des besoins énergétiques des animaux, convertis en Energie Métabolisable Ingérée (EMI), et de facteurs de conversion (Y'_m) exprimés en kcal de méthane pour 100 kcal d'EMI. Des équations de prédiction des facteurs de conversion ont été calculées pour les diverses espèces ou catégories d'animaux. Les émissions de méthane par animal et par an (facteurs d'émission exprimés en kg) ont été calculées pour chaque catégorie d'animaux. Pour les vaches laitières le facteur d'émission est en moyenne égal à 117,7 pour une production laitière annuelle moyenne de 6300 kg. Il varie de 90 à 163 lorsque la production laitière passe de 3500 à 11 000 kg. Il est en moyenne de 86,7 pour les vaches allaitantes et 43 pour les bovins ruminants en croissance, 14,4 et 11 respectivement pour les brebis laitières et les brebis allaitantes, 14,3 pour les chèvres, 20,7 pour les équins et 0,8 pour les porcins. Les effectifs d'animaux des diverses catégories ont également été ré-estimés. Sur ces bases les émissions totales de méthane entérique en France s'élèvent à 1,41 million de tonnes en 2007. Les vaches laitières, les vaches allaitantes et les bovins en croissance contribuent respectivement à hauteur de 32 - 25 et 34% des émissions totales de méthane ; au total les bovins sont responsables de plus de 90% des émissions de méthane entérique. Les ovins contribuent pour 6,2% et les caprins, les équins et les porcins respectivement pour 1, 1,5 et 0,8% des émissions totales de méthane entérique.

Abstract

Assessment of enteric methane emissions by farm animals in France in 2007

Enteric methane accounts for 45 and 65% of total methane emissions, and is responsible for about 5% of global warming in France. The objective of the present paper was to update the annual enteric methane emissions by farm animals of the various categories in each involved species in France according to the recommendations of IPCC 2006 (Tier 3). Methane emissions have been assessed using the net energy requirements of animals converted to Metabolisable Energy Intake (MEI), and conversion factors ($Y'_m = \text{kcal methane per 100 kcal MEI}$). Conversion factors and emission factors (kg methane/animal/y) were computed for the various species and categories of animals. The emission factor averaged 117.7 for dairy cows yielding 6300 kg milk/y, and ranged from 90 to 163 when milk yield increased from 3500 to 11 000 kg/y. It averaged 86.7 for beef cows, and 43.0 for ruminant growing cattle. The corresponding values were 14.4 and 11 for dairy and suckling ewes, 14.3 for goats, 20.7 for equines and 0.8 for pigs. Total enteric methane emissions in France amounted to 1.41 million tons. Dairy cows, beef cows and growing cattle contributed for 32 - 25 and 34%, respectively, to total methane enteric emission. Contributions of sheep, goats, equines and pigs were 6.2, 1, 1.5 and 0.8%, respectively, of total enteric methane emissions.

VERMOREL M., JOUANY J.-P., EUGÈNE M., SAUVANT D., NOBLET J., DOURMAD J.-Y., 2008. Evaluation quantitative des émissions de méthane entérique par les animaux d'élevage en 2007 en France. *INRA Prod. Anim.*, 21, 403-418.

