

Evaluation des émissions de gaz à effet de serre en élevage bovin et perspectives d'atténuation

S. Hacala¹, Réseaux d'Élevage², A. Le Gall³

Les méthodologies de calcul d'émissions de gaz à effet de serre proposées au niveau des Etats ne sont pas appropriées pour une application à l'échelle des exploitations. Il est donc nécessaire d'élaborer une méthode d'évaluation plus fine permettant d'évaluer les pratiques réelles des éleveurs, pour voir comment ils peuvent limiter et atténuer les émissions.

RÉSUMÉ

La méthode Ruminair, de calcul d'émissions de gaz à effet de serre en élevages de ruminants, décrite ici, a été testée et validée en station expérimentale puis appliquée aux données technico-économiques de 50 cas types des Réseaux d'Élevage. Les résultats permettent de comparer les émissions totales pour produire 1 l de lait ou 1 kg de viande vive selon le système de production et de constater qu'elles varient peu avec le système de production et le niveau d'intensification de l'animal. Des mesures d'atténuation sont possibles : ajustement de l'alimentation azotée des animaux, développement des légumineuses prairiales. Ces mesures et le stockage de carbone dans les sols prairiaux sont des atouts majeurs pour les élevages bovins, mais il est indispensable de quantifier leurs conséquences à l'échelle du système de production.

MOTS CLÉS

Bovin, exploitation agricole, gaz à effet de serre, méthane, méthode d'estimation, production de viande, production laitière, protoxyde d'azote, système de production

KEY-WORDS

Cattle, dairying, estimation method, farm, greenhouse-effect gas, meat production, methane, nitrogen proto-oxyde, production system

AUTEURS

1 : Institut de l'Élevage, 9 rue André Brouard, BP 70510, F-49105 Angers cedex 02 ; sylvie.hacala@inst-elevage.asso.fr

2 : Réseaux d'Élevage, Institut de l'Élevage - Chambres d'Agricultures, 149 rue de Bercy, F-75595 Paris cedex 12

3 : Institut de l'Élevage, Monvoisin, BP 85 225, F-35652 Le Rheu cedex

1. Présentation

Si l'on applique les engagements français vis-à-vis des accords de Kyoto, les émissions nationales de gaz à effet de serre (GES) devraient être en 2012 au même niveau qu'en 1990. Les prévisions montrent que les émissions de l'industrie seront inférieures en 2012 à celles de 1990, suite à la disparition de la sidérurgie et aux progrès des procédés de fabrication. Transports et émissions résidentielles vont s'accroître de façon très importante (climatisation, chauffage). Les émissions directes du secteur agricole auront augmenté, en 2012, de façon très légère : grâce à une baisse régulière des effectifs animaux de 1% par an depuis 1990, l'élevage de ruminants émettra moins de GES, en raison du plafonnement des productions (quotas) et de l'amélioration génétique qui se poursuit.

Les élevages de ruminants sont émetteurs de gaz à effet de serre comme l'ensemble des activités humaines. Le méthane émis par l'éructation des bovins est souvent mis en cause. Pourtant, la fermentation entérique des bovins représente seulement 5% de l'ensemble des gaz à effet de serre nationaux selon les inventaires CITEPA (2005). Ceci conduit à relativiser leur responsabilité. Cependant, si on se focalise sur les émissions de méthane du secteur agricole, les bovins, par leur digestion ainsi que par la gestion de leurs déjections, sont responsables de 92% des émissions de CH₄.

Par ailleurs, il est important de ne pas se limiter aux émissions directes du système de production (ce qui est émis par les animaux, les sols, les déjections, l'énergie) mais aussi de prendre en compte ce qui est émis en amont de l'exploitation, c'est-à-dire tous les facteurs de production (fabrication des engrais, agro-fourniture en général et transport des intrants), même s'ils ne sont pas comptabilisés dans le secteur agricole des inventaires nationaux (CITEPA, 2005 et GIEC 2001a). Ces émissions indirectes peuvent atteindre 30% du total de l'élevage et sont les plus aisément compressibles.

2. Evaluer le système de production dans son ensemble

Les calculs d'émissions au niveau des Etats sont aujourd'hui effectués de façon forfaitaire avec des méthodologies officielles émanant de l'ONU, validées par le GIEC qui propose plusieurs niveaux de calcul. Le niveau 1 est mis en œuvre par le CITEPA moyennant quelques adaptations pour le calcul des inventaires français (cf. le texte de VINCENT, dans cet ouvrage). Le GIEC propose aussi d'autres méthodes plus complexes pour des approches plus fines au niveau d'un phénomène d'émission (GIEC, 2001b). Cependant, **ces modes de calculs ne permettent pas d'évaluer les pratiques réelles des éleveurs (cas du niveau 1) ou bien sont difficile à mettre en œuvre sur le terrain.**

L'Institut de l'Élevage, comme d'autres équipes françaises ou européennes, a testé différentes méthodologies de calcul prenant en compte les flux internes et externes de systèmes d'élevages. Dans

une première phase, elles ont été mises en œuvre en stations expérimentales, avec l'objectif de **mettre au point une méthode simple de calculs d'émissions de GES et de stockage de carbone au niveau d'une exploitation d'élevage**. Cette méthode devra prendre en compte les pratiques des éleveurs dans le but d'évaluer les effets des structures d'exploitation, des flux internes et externes, de l'intensification animale ou des surfaces ou, au contraire, leur extensification à tous les niveaux des systèmes de production.

3. La méthode Ruminair

■ Les postes d'émission évalués

Pour les émissions directes, effectuées sur l'exploitation, trois secteurs majeurs d'émissions directes ont été retenus :

- le bâtiment et les animaux qu'il contient ;
- les déjections et leur gestion au stockage ;
- les sols en tant que tels ainsi que les cultures, les prairies et les restitutions directes à la pâture.

Sur ces trois compartiments, émetteurs directs, il a été retenu de comptabiliser le méthane et le protoxyde d'azote, et de **ne pas prendre en compte le dioxyde de carbone** en "rotation" courte, lié aux plantes ou aux animaux (respiration) et fixé de façon transitoire dans la biomasse.

Pour les émissions indirectes : les intrants ont été convertis par convention (internationale) en équivalent CO₂. Le poste "énergie indirecte" correspond aux émissions de CO₂ énergie + CH₄ + N₂O liées à la production d'un concentré ou d'un fertilisant avant l'arrivée sur l'élevage. Le poste "énergie directe" représente les émissions d'extraction et de traitement des produits pétroliers (fuel, lubrifiant, etc.) mais comprend également les émissions sur l'élevage. La méthodologie d'approche concernant l'énergie est commune à CHARROIN *et al.* (2006, dans cet ouvrage).

■ Les équations mises en œuvre

Nous avons effectué en 2003 et 2004 un inventaire des facteurs d'émissions et choisi les références qui ont paru les plus adaptées (HACALA, 2004) pour une mise en œuvre sur le terrain (tableau 1).

En ce qui concerne les émissions de méthane, le méthane entérique est une part importante des émissions du système de production et nous avons cherché à évaluer l'effet du type d'alimentation. Des travaux déjà anciens sur les émissions de méthane réalisés avec des bilans énergétiques ont montré l'importance de la qualité des rations des bovins, et notamment la part des différentes fractions celluloseuses les plus solubles, pour diminuer le méthane émis. Nous avons évalué la faisabilité de mise en œuvre des équations de MOE et TYRELL (1979), HOLTER et YOUNG (1992), YATES *et al.* (2000), mais l'absence de références concernant les formes celluloseuses dans les

Source d'émission et unité d'évaluation	Equation retenue dans Ruminair	Référence bibliographique
CH ₄ entérique (litres CH ₄ /kg MS Ingérée)	C = % de concentré dans la ration en MS Lactation : CH _{4ent} = 24 + 0,233C – 0,0037C ² Croissance ou entretien : CH _{4ent} = 30,1 + 0,280C – 0,00354C ²	GIGER-REVERDIN <i>et al.</i> (2000)
CH ₄ pâture (kg C-CH ₄ /UGB/j)	CH _{4pat} = ((0,75 x 0,8 x Tpât) / 1000)	JARVIS <i>et al.</i> (1995)
CH ₄ en bâtiment et stockage fumier (kg C-CH ₄)	CH ₄ = 1,7 x t fumier brute où MO t fumier = MO excrétée fèces + MO paille litière MO excrétée fèces (kg MO/animal) = PV x 0,058 x 0,16	AMON <i>et al.</i> (2001) ; MARTINEZ <i>et al.</i> (1999)
N ₂ O rumen (g N-N ₂ O/an)	N ₂ O _{rumen} = 0,0785 g N ₂ O/kg N ingéré ou 0,05 g N /kg N ingéré	VELTHOF <i>et al.</i> (1998)
N ₂ O en bâtiment et stockage (kg N-N ₂ O/an)	N ₂ O = 0,57% de N excrété sur la période	AMON <i>et al.</i> (2001) ; MARTINEZ <i>et al.</i> (1999)
N ₂ O au pâturage (kg N-N ₂ O/ha/an)	N ₂ O _{pat} = [(1,5/100) x Nurine + (0,4/100) x Nfèces] x 1,5)	OENEMA <i>et al.</i> (1997)
N ₂ O direct engrais (kg N-N ₂ O/ha/an)	N ₂ O _{cultures} = 0,6 + 0,002 x Fert + 1,27 x Csol – 0,024 x Sable N ₂ O _{prairies} = 2,4 + 0,015 x Fert Fert : fertilisation (kg N/ha/an) Csol : Corg, en % du poids du sol Sable : sable, en % du poids du sol	FREIBAUER <i>et al.</i> (2002)
N ₂ O fixation légumineuse pure (kg N-N ₂ O/ha/an)	N ₂ O _{cultures} = 0,6 + 0,002 x Fert + 1,27 x Csol – 0,024 x Sable où Fert = N fixé/ha/an	FREIBAUER <i>et al.</i> (2002)
N ₂ O par fixation symb. prairies (kg N-N ₂ O/ha/an)	N ₂ O _{prairies} = 2,4 + 0,015 x Fert où Fert = N fixé par la légumineuse si trèfle blanc : Fert = %TB x 30 kg N/t MS si trèfle violet : Fert = %TV x 31 kg N/t MS	FREIBAUER <i>et al.</i> (2002) (non pris en compte sur cas types)
N ₂ O indirect issu du lessivage (kg N-N ₂ O/ha/an)	N ₂ O = 0,025 x kg N lessivé (Méthode GIEC) N lessivé station = BURNS Lixim sur reliquats N sols N lessivé cas type = GIEC= 30% apport	VELTHOF <i>et al.</i> (1998)
N ₂ O indirect atmosphérique (kg N-N ₂ O/an)	N ₂ O _{dépôt} = 5 g N-N ₂ O/kg N volatilisé sous forme de NH ₃	VELTHOF <i>et al.</i> (1998)
CO ₂ énergie directe	Références Institut de l'Elevage	CHARROIN <i>et al.</i> (2006)
CO ₂ énergie indirecte	Références Institut de l'Elevage Amortissement bâtiment non pris en compte	CHARROIN <i>et al.</i> (2006)

tables fourragères françaises nous a conduits à choisir l'équation de GIGER-REVERDIN *et al.* (2000) qui prend en compte seulement les proportions de concentrés et de fourrages dans les rations des ruminants (JOUANY et MARTIN, 2003 ; MARTIN *et al.*, 2006).

Les émissions de CH₄ des **restitutions au pâturage** ont été évaluées pour les urines avec les travaux de JARVIS *et al.* (1995), YAMULKI *et al.* (1999) et FLESSA *et al.* (1996). Extrêmement faibles, elles ont été considérées comme négligeables. Mais pour le méthane émis par les fèces au pâturage, nous avons retenu la référence d'émission par m² de bouses de JARVIS (1995) : 0,75 (0,3-1,5) g C-CH₄/m² fèces.

Concernant les émissions directes de N₂O, l'équation de OENEMA (1997) retenue pour les émissions **à la pâture** a fait l'objet d'une diminution de la constante prenant en compte le piétinement car les chargements rencontrés sur nos parcelles pâturées étaient

TABLEAU 1 : Description des méthodes de calcul retenues dans Ruminair par gaz et par poste d'émission.

TABLE 1 : Description of the calculations proposed in the Ruminair method, per gas and per production source.

environ 2 fois plus faibles que ceux des systèmes étudiés dans la publication.

Les émissions liées à la **fertilisation** et à la **fixation** ont été évaluées avec les travaux de FREIBAUER qui nous ont paru plus appropriés grâce à la prise en compte de la nature des sols (sable et matière organique) que ceux de BOUWMAN (1990 et 1996). Cependant, nous avons adapté aux **fumiers** l'équation des pertes à l'épandage de FREIBAUER en appliquant le coefficient d'équivalence engrais. Toutes les références retenues l'ont été pour leur facilité d'application en station expérimentale mais elles ont aussi été choisies dans la perspective d'une application possible sur le terrain à des périodes plus longues, sur des quantités d'aliments ou de fertilisants moins bien connues. Point par point, elles ont fait l'objet d'une évaluation de faisabilité.

Les émissions de N₂O sont la somme de plusieurs points d'émission. Elles totalisent non seulement les émissions des déjections au bâtiment - stockage, à la pâture, à l'épandage, lors de la fixation par les légumineuses mais aussi celles de 2 postes indirects que sont les dépôts atmosphériques d'ammoniac et le lessivage des nitrates.

Les intrants ont été intégralement convertis en équivalent CO₂, à chaque point d'émission, conformément aux inventaires (1 kg de CH₄ équivaut à 21 kg équivalent CO₂ ; 1 kg de N₂O équivaut à 310 kg équivalent CO₂). Le pouvoir de réchauffement global est exprimé en tonnes d'équivalent CO₂ total sur l'exploitation puis par hectare de surface ou par kg de produit (kg de lait ou kg de viande vive).

Pour affecter les émissions à telle ou telle production de l'exploitation, nous avons pris en compte les consommations des ateliers ou les surfaces qui leur sont attribuées et leurs intrants réels.

■ Validation en stations expérimentales

La méthode Ruminair a été mise en œuvre sur des données journalières parallèlement à la méthode GIEC à la même échelle. Puis les deux mêmes méthodes ont été appliquées à des données annuelles, notamment en remplaçant nos calculs d'alimentation et de rejets à l'animal et à la journée par les références d'alimentation et de rejets, en fonction du système d'alimentation annuel des documents Corpen 1999 pour les animaux laitiers et Corpen 2001 pour les animaux allaitants et en croissance.

- Sur données journalières

La comparaison des références obtenues à partir de données journalières (colonnes de gauche du tableau 2) montre que les résultats des méthodes diffèrent pour 3 points d'émission : le méthane entérique, la gestion des déjections et la fertilisation - fixation.

Le méthane entérique est calculé avec les équation de GIGER-REVERDIN *et al.* dans Ruminair (voir tableau 1). La méthode GIEC, délicate à utiliser, prend en compte l'énergie brute ingérée et un facteur d'émission du méthane ingéré. La connaissance de l'alimentation sur

Résultats obtenus sur...		Données journalières		Données globales annuelles			
		Ruminair Institut	GIEC	Ruminair Institut	GIEC	GIEC niveau 1	CITEPA
CH₄	Fermentation entérique	49*	34	52	46	40	41
	Au pâturage	0		0	0,4		
	Gestion des déjections	10	30	1**	12	10	11
	Total % CH₄	59	64	53	58	50	52
N₂O	Rumen	0		0			
	Au pâturage	11,5	8,5	10	10	11	8
	Gestion des déjections	3	8,5	2	5	6,5	7
	Fertilisation et fixation	11,5	6	13	10	12,5	13
	Dépôt atmosphérique	1	1	1	0,7	1	0
	Lessivage de l'azote	4	5	13	9	10	11
	Total % N₂O	31	31	39	35	41	39
CO₂	Consommations énergie directe et indirecte	10	7	9	7	9	9
TOTAL		100	100	100	100	100	100
TOTAL émis par exploitation (teqCO₂)		1 146 000	1 624 000	1 048 000	1 271 000	1 024 000	1 033 000
Total émis / ha SAU sans énergie (teqCO₂)		7 920	1 1599	7 169	9 070	7 164	7 294
Total émis / ha SAU avec énergies (teqCO₂)		8 820	12 500	8 066	9 782	7 881	7 951

* effet de la prise en compte des ingestions réelles et des % de concentrés et fourrages
** écart important lié à la prise en compte des fumiers et des données météo réels

les systèmes testés augmente l'émission de méthane par animal, en comparaison au forfait appliqué dans la méthode GIEC.

En ce qui concerne **la gestion des déjections**, la méthode GIEC pénalise les fumiers puisque les facteurs d'émission sont plus forts et que le phénomène est accentué par la référence à une température moyenne nationale française qui a une incidence forte sur le facteur d'émission. Nous avons ici pris en compte la température réelle des exploitations (données Météo France).

Pour le poste fertilisation - fixation, nous appliquons dans Ruminair l'équation après abatement avec le coefficient d'équivalence engrais azoté et comptabilisons l'action totale du fumier une fois seulement à travers son effet sur le sol : les pertes en protoxyde d'azote augmentent avec le taux de carbone organique du sol.

- Passage des données journalières aux grands flux annuels

Nous avons pris en compte les grands flux de concentrés, de quantités ingérées et appliqué les données Corpen sur les rejets présentées dans des publications relatives aux systèmes d'alimentation des animaux laitiers et allaitants (Corpen, 1999 et 2001). L'ingestion à la pâture a été déduite des ingestions distribuées en bâtiments. Pour l'ingestion totale, le gabarit et la production ont été pris en compte (tableau 2 : les 4 colonnes de droite).

A l'exception des émissions de méthane pour la gestion des déjections (qui diffèrent considérablement pour les raisons évoquées précédemment), **les écarts liés au changement d'échelle et à une approche tout à fait différente des flux sont très faibles** : les émissions exprimées au niveau global de l'exploitation sont quasiment identiques. Nous avons donc retenu la méthode Ruminair de

TABLEAU 2 : Part relative des postes d'émissions : résultats obtenus en station expérimentale avec les différentes méthodes (exemple en production de viande).

TABLE 2 : Relative share of the various production sources : results obtained experimentally in stations (e.g. for meat production) by different methods.

l'Institut de l'Élevage appliquée aux stations expérimentales pour les cas types des Réseaux d'élevage. Cependant, les postes de gestion des bâtiments et de stockage feront l'objet d'une amélioration immédiate avec les résultats des études en cours présentées par DOLLÉ et ROBIN dans ce même document.

4. Application de la méthode aux cas types lait et viande des Réseaux d'Élevage

■ Résultats en systèmes laitiers

La méthode a donc été appliquée à des exploitations types représentatives suivies en réseaux technico-économiques (24 cas types lait et 26 cas types viande ; HACALA, 2004). Les résultats ici présentés concernent les animaux et les surfaces qui leurs sont liées. Nous avons introduit la notion de SAUA, surface agricole utile liée aux animaux, qui comprend la surface en herbe et la surface en cultures contribuant à leur alimentation (blé, orge, protéagineux...).

- 50% des émissions sont dues au méthane

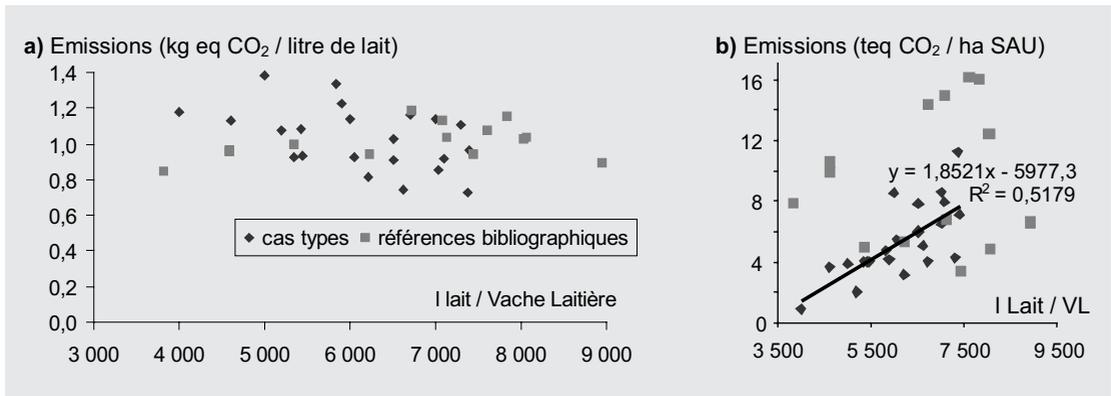
Les résultats moyens par grand type de système (tableau 3) montrent de faibles écarts d'émissions totales en équivalent CO₂ par litre de lait. Cependant, la diversité dans ces grands types est considérable : les émissions vont du simple au double, sans lien apparent avec les grandes données structurelles du système de production. Le méthane (entérique plus stockage) représente environ 50% lorsque l'on prend en compte les animaux et l'ensemble des surfaces qui leur sont attachées.

Dans les élevages laitiers, le concentré représente de 15 à 20% de la matière sèche ingérée pendant la lactation. Cependant, cette donnée moyenne couvre une grande disparité. Bien que la consommation de concentré soit déterminante dans le calcul des émissions de méthane entérique (% de concentré dans la matière sèche totale ingérée), il n'y a aucune relation significative avec les émissions globales de GES en raison du cumul des effets de nombreux facteurs.

TABLEAU 3 : Emissions de GES dans les systèmes types des Réseaux d'Élevage (en équivalent CO₂ rapporté à l'unité produite, l de lait ou kg de viande).

TABLE 3 : *Production of greenhouse-effect gases in the typical systems of the Animal Farm Networks* (CO₂ equivalent per l milk or per kg

	Emissions (kg CO ₂)		Caractéristiques des systèmes						
	/ l lait	/kg viande vive	Lait (l / VL)	SAUA (ha)	SFP (ha)	nb VL	nb VA	Lait/ha SAUA	
Systèmes spécialisés lait de plaine									
> 30% de maïs	0,98		6 749	40	28	36		8 385	
10 à 30% maïs	1,17		6 444	63	49	41		5 319	
Herbagers	1,08		5 673	50	42	32		4 271	
Systèmes de plaine lait + viande									
Lait + viande intensive	0,91	9,32	5 912	60	48	32	15		
Lait + viande à l'herbe	0,97	9,15	5 659	65	55	34	7		
Systèmes de plaine lait + cultures									
			0,98	7 234	133	50	51	8	7 296
Systèmes laitiers de montagne									
	1,06	1,66	5 232	42	39	24	7	3 174	



- L'augmentation de la production laitière par animal ne diminue pas les émissions par litre de lait

Les cas types utilisés dans cette étude sont une première approche de systèmes réels mais choisis. Pour étayer notre approche, nous avons comparé les résultats obtenus à des résultats bibliographiques récents. Plusieurs auteurs ont mis au point leurs propres modes de calcul, le plus souvent assez proches de la méthode des inventaires. En France, DUPRÉ (2005), aux Pays-Bas, SCHILS *et al.* (2005), en Suède, CEDERBERG (2004), en Irlande, LOVETT *et al.* (2005) ont appliqué leurs modes de calculs, le plus souvent forfaitaires, à différents niveaux d'intensification. Nous avons retenu les émissions par litre de lait et quelques paramètres des systèmes de production pour les comparer aux données des cas types.

La valorisation de l'ensemble des données des cas types laitiers et des références bibliographiques montre qu'il n'y a pas de corrélation significative entre la production laitière par vache et le niveau d'émission d'équivalent CO₂ par litre de lait (figure 1a). Le système de production et l'approche relativement exhaustive des émissions nivellent donc probablement les écarts auxquels on peut s'attendre en considérant seulement les ateliers animaux. L'intensification animale ne diminue pas les émissions par kg de lait produit ; et une désintensification au-dessous de 5 000 l de lait par vache laitière et par an n'est pas une source d'émission supplémentaire. Il n'en est pas de même pour la production de lait à l'hectare. Mais l'ensemble des émissions exprimées par hectare a toujours une corrélation forte avec l'intensification de l'hectare (figure 1b).

FIGURE 1 : Emissions globales de GES pour les cas types des Réseaux d'Elevage étudiés et dans la bibliographie a) par litre de lait, b) par ha SAU (en kg équivalent CO₂ par litre de lait), selon le niveau de production laitière par animal.

FIGURE 1 : Total productions of greenhouse-effect gases of the typical examples in the Animal Farm Networks and found in literature a) per l milk, b) per ha Useable Farm Area (kg CO₂ equivalent per l milk), according to the level of milk production.

	Emissions Quelques éléments de structure				
	(kg CO ₂ /kg viande vive)	SAU ani-male (ha)	SFP (ha)	nb VA	Total UGB
Systèmes naisseurs broutards	11,54	83	78	62	93
Systèmes naisseurs-engraisseurs					
- de veaux	14,69	45	41	49	56
- de jeunes bovins	11,33	87	78	59	112
Systèmes céréales - bovins viande	14,79	102	50	39	71
Systèmes bovins viande + hors-sol	12,35	40	33	31	63

TABEAU 4 : Emissions de GES de quelques cas types en production de viande des Réseaux d'Elevage (valeurs moyennes).

TABLE 4 : Production of greenhouse-effect gases in a few typical cases of meat producers of the Animal Farm Networks (mean values).

■ Résultats en systèmes viande

Dans les cas types viande (tableau 4), il n'y a pas de corrélation entre le concentré ingéré et les émissions exprimées par kg de viande vive ; il en est de même pour le solde du bilan N par hectare. Cependant, ces résultats, non confortés par la bibliographie, reposent sur une faible taille d'échantillon (26 élevages).

5. Mesures d'atténuation des émissions et stockage de carbone dans les sols prairiaux

Nous avons recensé, par poste d'émission, les mesures qui ont une incidence sur les émissions de N₂O et CH₄. Nous y avons associé NH₃ qui contribue indirectement à la formation de N₂O.

Qu'il s'agisse de fertilisation ou d'alimentation, **quelques mesures simples** (tableau 5) **favorisent** une bonne gestion pour une optimisation des systèmes, **une diminution des flux internes et par conséquent des "fuites" vers l'air qui y sont directement liées**. De plus, les améliorations concernant la fertilisation permettront aussi aux exploitations d'effectuer des économies.

Pour évaluer l'impact de ces mesures, nous avons appliqué sur les cas types un **ajustement plus strict de l'alimentation azotée** aux recommandations récentes soit un apport d'azote de 90 g de PDI par kg de MSI au lieu de 110 g. Dans ce cas, le rejet en azote par vache passe de 92 à 76 kg/an. Les émissions de N₂O au stockage sont modifiées, de même que les restitutions à la pâture et donc les émissions liées ; elles passent de 3,75 kg à 2,75 kg N₂O/an. Les émissions de méthane sont modifiées légèrement sur le poste fermentation

TABLEAU 5 : Effets sur les évolutions d'émissions de N₂O et CH₄ des mesures d'atténuation proposées (tendances).

TABLE 5 : *Effect of the proposed measures of attenuation on the changes in N₂O and CH₄ production (tendencies).*

Mesure d'atténuation possible	Conséquences sur :			
	NH ₃ indirect	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
Au niveau de la fertilisation minérale et organique				
Ajuster la dose annuelle strictement aux besoins	↓	=	↓	
Fractionner les apports de lisiers 20 m ³ maxi par épandage	↓	↑	↓	↓
Augmenter les légumineuses prairiales	↓	↓		↓
Décompacter les sols (Mc TAGGART <i>et al.</i> , 1997 ; OENEMA <i>et al.</i> , 1997)	↓	↑	↓	
Au niveau de l'alimentation et des surfaces en herbe				
Augmenter l'aliment concentré	↑	↑	↑	↓
Ajuster les apports en azote strictement au niveau des recommandations alimentaires	↓	↓	↓	=
Augmenter les légumineuses prairiales (DANSO, 1995)	↓		↓	↓
Apporter les concentrés énergétiques pour compenser une pâture trop riche en azote	↓	=	↓	=
Protection des acides aminés pour une digestion intestinale	↓	↑	↓	↓
Au niveau du système de production				
Développer les cultures pièges à nitrates (Cipan)		↑	↓	
Augmenter les surfaces en cultures fixatrices d'azote		↓		
Allonger la saison de pâturage (Midair, 2004)	↓	↓	↓	↓

entérique qui passe de 112 à 110 kg/an. Au final, **pour un animal, c'est 110 kg d'équivalent CO₂ qui peuvent être évités annuellement soit environ 1,5%.**

Sur les mêmes cas types, nous avons testé la substitution de l'engrais par l'**introduction de légumineuses prairiales**. Les émissions peuvent, selon les cas, baisser de 3 à 7% aussi bien en système lait qu'en viande.

Nous avons évalué, avec des hypothèses simples et identiques pour tous les cas, le **stockage possible de carbone dans les prairies**. Pour ce faire, nous avons appliqué les résultats de ARROUAYS *et al.* (2002) et SOUSSANA *et al.* (2004). Les exploitations sont considérées "en croisière" et en polyculture élevage depuis longtemps. Nous avons testé deux hypothèses. Dans l'hypothèse 1, les prairies stockent chaque année 500 kg de carbone (soit 1 830 kg d'équivalent CO₂) ; les prairies temporaires sont retournées tous les 5 ans (1/5 des prairies retourné par an) ; les prairies retournées déstockent 1 000 kg de carbone. Dans l'hypothèse 2, les prairies retournées déstockent 500 kg de carbone et que les prairies temporaires stockent un peu plus de 200 kg de C. Dans les deux cas, les fumiers n'ont pas été pris en compte car ils sont considérés comme épandus sur les cultures ; ils maintiennent le taux de carbone des sols en culture et les niveaux de minéralisation.

La compensation par le stockage de CO₂ des émissions totales, c'est-à-dire directes et amont (intrants compris), s'échelonne **selon les hypothèses de 10-14%**, pour un système où la SFP inclut plus de 30% de maïs, **à 40-70% pour les systèmes lait et viande très herbagers.**

Il semble donc que la compensation par le stockage de carbone dans les sols et l'ensemble des petites améliorations dans la gestion interne des systèmes d'élevage pourraient compenser une grande part des émissions directes et indirectes des élevages.

Conclusion et perspectives

Ruminair a été comparée et validée en stations expérimentales sur données fines puis sur flux globaux internes et externes à l'exploitation.

Ces calculs d'émissions de gaz à effet de serre ont été appliqués de façon uniforme à des cas types représentatifs des systèmes bovins laitiers (24) et bovins viande français (26). Ils n'ont pas mis en évidence de différences d'efficacité des systèmes d'alimentation et de production par rapport aux émissions de gaz à effet de serre par litre de lait ou kg de viande produits. Pourtant, les 50 cas types utilisés sont très divers en ce qui concerne les parts d'herbe ou de maïs dans la surface totale consacrée aux animaux ou l'autonomie des systèmes. Cependant, les systèmes étudiés ont des intrants faibles puisque (sauf un cas) les bilans N à l'hectare SAU sont compris entre 20 et 80 kg N/ha. Ces résultats demandent donc à être confirmés par des calculs sur des exploitations tout aussi diverses, des cas réels, plus nombreux.

L'ensemble des données mobilisées pour les calculs sont des données comptables, celles du "grand livre" de l'exploitation, pour les intrants, les ventes, les cessions internes. Niveau d'émission, mesures d'atténuation ou mesures compensatoires de stockage de carbone sont par conséquent tout à fait certifiables en exploitation d'élevage ; les élevages pourraient donc faire l'objet de projets domestiques d'amélioration de leurs pratiques (Caisse des Dépôts, 2005) .

Quelques mesures simples de réduction d'émissions sont envisageables : l'ajustement de l'alimentation azotée des animaux (sans baisse de production) et la réduction de la fertilisation au profit de l'augmentation des légumineuses prairiales sont deux mesures d'atténuation intéressantes. Mais modifier un poste d'émission d'un gaz par une pratique favorable déclenche un ensemble de conséquences (sur d'autres gaz émis et sur d'autres points d'émission du système de production) qui peut être négatif ou positif au final. Il est donc indispensable de quantifier l'ensemble des conséquences.

Sur certains cas types ont été évalués les niveaux de stockage possibles de carbone dans les prairies. Selon les systèmes, la compensation des émissions varie de 10 à plus de 70%. Le stockage dans les sols prairiaux et les atténuations sont des atouts majeurs importants pour les élevages bovins.

Intervention présentée aux Journées de l'A.F.P.F.,
 "Prairies, élevage, consommation d'énergie et gaz à effet de serre",
 les 27 et 28 mars 2006.

Remerciements : Les travaux présentés ici ont été menés dans le cadre d'un contrat avec l'Ademe (n° 0375007) dont la responsable est Christine Schubetzer

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMON B., AMON T., BOXBERGER J., ALT C. (2001) : "Emissions of NH₃, N₂O and CH₄ from dairy cows housed in a farmyard manure tying stall (housing, manure storage, manure spreading)", *Nutr. Cycling in Agroecosystems*, 60 (1/3), 103-113.
- ARROUAYS D., BALESDENT J., GERMON J.C., JAYET P.A. SOUSSANA J.F., STENGEL P. (2002) : *Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? expertise scientifique collective*, rapport. INRA, 332 pp.
- BOUWMAN A.F. (1990) : "Analysis of a global nitrous oxide emissions from terrestrial natural and agro-ecosystems", *Quantification de la dénitrification et des émissions de protoxyde d'azote par les sols*, *Agronomie*, 15, 321-355.
- BOUWMAN A.F. (1996) : "Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils", *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 46, 53-70.
- Caisse des dépôts - Mission climat (2005) : *Elargir les instruments d'action contre le changement climatique grâce aux projets domestiques - Rapport d'évaluation*, 10 novembre 2005, 96 pp.
- CEDERBERG C. (2004) : *Life Cycle Inventory of 23 dairy farms in South-Western Sweden*, SIK-rapport, N° 728 2004, The Swedish Institute for Food and Biotechnology, 59 p.

- CITEPA (2005) : *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France - Series sectorielles et analyses étendues Rapport d'inventaire National*, 247 pages, réf. CITEPA 551, disponible sur : <http://www.citepa.org/emissions/nationale/index.htm>
- CORPEN (1999) : *Estimation des flux de d'azote, de phosphore et de potassium associés aux vaches laitières et à leur système fourrager*.
- CORPEN (2001) : *Estimation des flux d'azote, de phosphore et de potassium associés aux bovins allaitants et aux bovins en croissance ou à l'engrais, issus des troupeaux allaitants et laitiers, et à leur système fourrager*.
- DANSO S.K.A. (1995) : "Sustainable agriculture. The role of biological nitrogen fixing plants", *IAEA Nuclear Techniques in soil-plant Studies for sustainable Agriculture and environmental preservation*, IAEA (ed), Vienna, 205-224.
- DUPRÉ J.Y (2005) : "Usage of LCA in the French dairy industry. Guide on Life Cycle Assessment towards Sustainability in the Dairy Chain", *Bull. Int. Dairy Fed.*, 398/2005. 32-36.
- FLESSA H., DORSCH P., BEESE F., KONIG H., BOUWMAN A.F. (1996) : "Influence of cattle wastes on nitrous oxide and methane fluxes in pasture land", *J. Environ. Qual.*, 25, 6, 1366-1370.
- FREIBAUER A., KALTSCHMITT M. (2002) : "Controls and models for estimating direct nitrous oxide emissions from temperate and sub-boreal agricultural mineral soils in Europe", *Biogeochemistry*, January 2002.
- GIEC (2001a) : *Recommandations en matière de bonnes pratiques et de gestion des incertitudes pour les inventaires nationaux*.
- GIEC (2001b) : *Bilan 2001 des changements climatiques : les éléments scientifiques*, Rapport du groupe de travail I du GIEC, disponible sur : <http://www.ipcc.ch>
- GIEC : *Glossaire du GIEC sur le changement climatique*, disponible sur <http://www.greenfacts.org/fr/dossiers/changement-climatique/toolboxes/glossary.htm> (mise à jour permanente).
- GIGER-REVERDIN S., SAUVANT D, VERMOREL M., JOUANY J.P. (2000) : "Modélisation empirique des facteurs de variation des rejets de méthane par les ruminants", *Renc. Rech. Ruminants*, 7, 187-190.
- HACALA S. (2004) : *Evaluation des émissions de gaz à effet de serre et stockage de carbone dans les exploitations bovines. Rapport d'étape n°1*, Compte rendu 043314, Institut de l'Elevage - Ademe, 99 pp.
- HOLTER J.B., YOUNG A.J. (1992) : "Methane prediction in dry and lactating Holstein cows", *J. Dairy Sci.*, 75, 21615.
- JARVIS S. C., LOVELL R. D., PANAYIDES R. (1995) : "Patterns of methane emission from excreta of grazing animals", *Soil Biology and Biochemistry*, 27, 12, 1581-1588.
- JOUANY J. P., MARTIN C. (2003) : "Enteric methane and (CO₂) emissions by ruminants", *CarboEurope-GHG. Agricultural Greenhouse Gas Budget (SS2) and Grasslands Greenhouse Gas Budget (SS3)*, 4-5 Sept. 2003, Clermont-Ferrand, France.
- OENEMA O., VELTHOF G.L., YAMULKI S., JARVIS S.C. (1997) : "Nitrous oxide emissions from grazed grassland", *Soil use manage*, 13, 4 (suppl.), 288-295.
- LOVETT D.K., SHALLOO L., DILLON P., O'MARA F.P. (2005) : "A systems approach to quantify greenhouse gas fluxes from pastoral dairy production as affected by management regime", *Agricultural systems*, accepted, in press.
- MARTIN C., MORGAVI D., DOREAU M., JOUANY J.-P. (2006) : "Comment réduire la production de méthane chez les ruminants ?", *Fourrages*, 187 (à paraître).
- MARTINEZ J., BÉLINE F., PEU P., GUIZIOU F. (1999) : "Emissions de méthane (CH₄) et de protoxyde d'azote (N₂O) au cours du stockage, du traitement et de l'épandage de déjections animales", *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85, 6, 87-101.
- MC TAGGART I.P., DOUGLAS J.T., CLAYTON H., SMITH K.A. (1997) : "Nitrous oxide emission from slurry and mineral nitrogen fertilizer applied to grassland", Jarvis, S.C., Pain, B.F. eds., *Gaseous nitrogen emissions from grasslands*, 201-209.

- Midair (2004) : *Greenhouse Gas Emissions from Agriculture - Mitigation Options and Strategies, Proc.*, February 10-12, 2004, Leipzig, Germany.
- MOE P.W., TYRRELL H.F. (1979) : "Methane production in dairy cows", *J. Dairy Sci.* 62, 1583.
- SCHILS R.L.M., VERHAGEN A., AARTS H.F.M., SEBEK L.B.J. (2005) : "A farm level approach to define successful mitigation strategies for GHG emissions from ruminant livestock systems", *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 71, 163-175.
- SOUSSANA J.-F., LOISEAU P., VUICHARD N., CESCHIA E., BALESSENT J., CHEVALLIER T., ARROUAYS D. (2004) : "Carbon Cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands", *Soil Use and management*, 20, 219-230.
- VELTHOF G. L., VAN BEUSICHEM M. L., OENEMA O. (1998) : "Mitigation of nitrous oxide emission from dairy farming systems", *Environmental Pollution*, 102, 1, Supp. 1, 173-178.
- YAMULKI S., JARVIS S.C., OWEN P. (1999) : "Methane emission and uptake from soils as influenced by excreta deposition from grazing animals", *J. Environ. Qual.*, 28, 2, 676-682.
- YATES C.M., CAMMELL S.B., FRANCE J., BEEVER D.E. (2000) : "Prediction of methane emissions from dairy cows using multiple regression analysis", *Proc. Br. Soc. Anim. Sci.*, 94.

SUMMARY

Assessment of the production of greenhouse-effect gases on cattle-rearing farms and prospects of attenuation

The methods of measuring the production of greenhouse-effect gases devised at the level of whole countries are not appropriate at the level of individual farms. A more refined method has therefore to be worked out that makes it possible to appraise the actual practices of the farmers, so that they can find a way to attenuate this production.

The Ruminair method, which measures the production of greenhouse-effect gases on ruminant farms is described here; it was tested and validated in experimental stations and applied to the technical and economic data of 50 typical cases of the Animal farm Networks. The results make it possible to compare the total amounts of gases corresponding to the production of 1 l milk or 1 kg live meat according to the production system ; they are found to be little influenced by the production system or the intensity of rearing. Possible measures of attenuation are evaluated (adjustment of the nitrogen feeding of the animals, development of pasture legumes, storage in grassland soils), but it is necessary to quantify their consequences at the level of the production system.