

Emissions de gaz à effet de serre en élevages bovins :
évaluation, perspectives d'atténuation et compensation
par le stockage du carbone dans les sols prairiaux

S. Hacala¹, Réseaux d'Elevage², A. Le Gall³

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

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

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

Résumé

L'Institut de l'Elevage mène depuis 2003 un travail sur l'évaluation de Gaz à Effet de Serre en exploitations bovines. En stations expérimentales, différentes méthodes de calculs prenant en compte les pratiques d'alimentation et de fertilisation ont été comparées aux modes de calculs officiels des inventaires nationaux, plus globaux, ou bien forfaitaires, à l'animal, à l'hectare de culture ou de prairie. Ces calculs aux différents postes d'émission du système de production ont été appliqués à l'animal et à la parcelle sur des données journalières d'ingestion, de rejets, de restitution et de fertilisation organique et minérale. Puis les mêmes méthodes ont été appliquées à des données globales saisonnières ou annuelles pour évaluer la perte de précision.

La méthode *Ruminair* ainsi validée en station a été appliquée aux données technico-économiques des exploitations dites "cas-type des Réseaux d'Elevage" représentant pour chacune d'elles plusieurs milliers d'exploitations au niveau national.

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. Ils ont été comparés à des valeurs de la bibliographie récente étrangère sur systèmes laitiers. Les émissions en équivalent CO₂ par litre de lait sont peu différentes quel que soit le système de production et le niveau d'intensification de l'animal. Par contre, lorsque l'on exprime les émissions totales (directes et indirectes / amont) par unité de surface prenant ainsi en compte l'intensification à l'hectare, les relations sont significativement positives.

Les mesures d'atténuation possibles sont évaluées sous forme de tendance grâce à la bibliographie. Les tableaux montrent que 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 peuvent être négatifs ou positifs au final. Il est donc indispensable de quantifier l'ensemble des conséquences.

Plusieurs voies d'atténuation ont été évaluées. Les conséquences sont quantifiées sur les différents postes d'émissions et montrent la baisse du total émis par le système de production.

Sur certains cas types ont été évalués les niveaux de stockage du carbone dans les prairies avec deux hypothèses de stockage et de minéralisation. Selon les systèmes, la compensation des émissions varie de 10 à plus de 70%. Le stockage dans les prairies est un atout important. L'approche ici caricaturale est à affiner.

Les exploitations pourraient se structurer dans des "projets domestiques" pour vendre leurs tonnes de CO₂ non émises. Les "projets domestiques", pour être valides, doivent être facilement quantifiables et certifiables. Deux documents officiels permettent de les objectiver : les photos aériennes PAC pour l'occupation des surfaces par la prairie et le "grand livre comptable" de l'exploitation pour l'ensemble des intrants : engrais, concentrés, carburants, matériels etc.

1. Eléments de contexte

Si l'on applique les engagements français vis-à-vis des accords de Kyoto, les émissions nationales devraient être en 2012 au même niveau qu'en 1990. Les prévisions d'évolution des secteurs économiques montrent que les émissions de l'industrie en 2012 seront au-dessous de celles de 1990. La disparition de la sidérurgie et les progrès des procédés de fabrication expliquent cette évolution favorable. Transports et émissions résidentielles vont augmenter drastiquement (climatisation, chauffage). Par contre, en 2012, les émissions directes du secteur agricole auront augmenté de façon très légère ; quant à l'élevage de ruminants, il sera moins émetteur grâce à une baisse des effectifs animaux de 1% par an depuis 1990. Cette évolution s'explique à la fois par le plafonnement des productions (quotas) et par 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'éruccation 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 regarde les émissions de méthane du seul secteur agricole, les bovins, par leur digestion ainsi que par la gestion de leurs déjections, sont responsables de 92% du CH₄ total agricole.

Il est important de prendre en compte les émissions directes du système de production (ce qui est émis par les animaux, les sols, les déjections, l'énergie) mais aussi d'ajouter ce qui est émis en amont de l'exploitation, c'est-à-dire tous les facteurs de production, même s'ils ne sont pas comptabilisés dans le secteur agricole des inventaires nationaux (CITEPA, 2005 et GIEC 2001a).

2. Evaluer le système de production dans son ensemble

Il est important d'évaluer les émissions des systèmes de production dans leur ensemble car un autre gaz, le protoxyde d'azote, est émis de façon forte par les sols, les déjections et les fertilisations organiques et minérales dans les semaines qui suivent l'épandage.

En termes d'émission, une approche d'ensemble du système de production impose de prendre en compte également les intrants sous deux grandes rubriques : d'une part, les énergies nécessaires à la production (fuel, gazole, électricité, gaz, etc.) et, d'autre part, les flux de matières fertilisantes, d'aliments et d'autres facteurs de production manufacturés qui ont nécessité de l'énergie fossile pour leur propre production et ont pu émettre directement des gaz à effet de serre au cours des processus de fabrication. C'est le cas des engrais azotés émetteurs de N₂O et de CO₂ lors de la fixation industrielle ou des tourteaux de soja qui ont émis, lors de la fixation symbiotique par le soja, du protoxyde d'azote puis ont été longuement transportés avant leur arrivée sur l'exploitation. Une exploitation d'élevage est donc émettrice de GES à la fois directement et indirectement.

Par ailleurs, les systèmes de production d'herbivores sont aussi des "stockeurs de carbone" officiellement appelé "puits" par les accords de Marrakech de novembre 2001 (UNFCCC) dans les prairies, les haies, les bois, etc. Ces puits sont des compensations qui, lorsque qu'ils sont intégrés aux inventaires nationaux, équilibrent intégralement les émissions du secteur économique agricole (*Inventaire national avec puits*, CITEPA, 2005) faisant ainsi disparaître la responsabilité du secteur agricole en tant qu'émetteur direct.

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. Le GIEC propose aussi d'autres méthodes plus complexes pour des approches plus fines au niveau d'un phénomène d'émission (GIEC, 2001 b).

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. Aucune préconisation de calcul ne permet aujourd'hui de tester de nouvelles pratiques qui pourraient être considérées comme des mesures d'atténuation (Caisse des dépôts, 2005) au sens de marché du CO₂.

L'Institut de l'Elevage, comme d'autres équipes françaises, ou européennes, ont 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 et en appliquant sur des données à la journée et à l'animal différentes équations ou facteurs d'émission.

L'objectif est, d'une part, de mettre au point la méthode puis d'évaluer les émissions des différentes structures d'exploitation et des pratiques mises en œuvre, d'autre part, d'effectuer des changements de pratiques pour en mesurer les impacts à tous les niveaux des systèmes de production.

Dès janvier 2008, les éleveurs devraient pouvoir se fédérer dans des "projets domestiques" de réduction des gaz à effet de serre et donc vendre des tonnes de CO₂ non émis qui seraient une source de revenu. Les projets domestiques doivent être faciles à évaluer et à certifier ; les modes de calcul doivent prendre en compte des données facilement vérifiables et certifiables. Cet élément récent de contexte est le cahier des charges de notre approche.

3. La méthode de calcul Ruminair

3.1. Les postes d'émission et les gaz évalués

Trois secteurs majeurs d'émissions directes ont été retenus au niveau du système de production :

- le bâtiment et les animaux qu'il contient ; et prise en compte des émissions de méthane et protoxyde d'azote ;
- 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.

Nous avons également évalué les pertes d'ammoniac qui ne sont pas détaillées ici. Elles ont été l'objet d'un calcul sur chaque poste puis totalisées pour une évaluation de retombées ou dépôt qui contribue indirectement à la production de protoxyde d'azote.

Les pertes par lessivage de nitrates, émettrices indirectes de protoxyde d'azote, elles aussi, ont été ajoutées conformément au GIEC (2001a).

Sur les 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 carbone en "rotation" courte lié aux plantes ou aux animaux (respiration) fixé de façon transitoire dans la biomasse et réémis sous forme de CO₂. Lors du transit digestif d'un aliment, seule l'émission de CH₄ par l'animal est prise en compte. En effet, sans digestion par l'animal, le C fixé par la plante aurait émis une quantité de CO₂ au maximum égale à la quantité fixée par la culture, et du méthane peu connu aujourd'hui. C'est donc seulement le supplément d'émission lié à la digestion qui est pris en compte. Il en est de même pour le CH₄ émis par un fumier lors de sa production, son stockage et sa gestion.

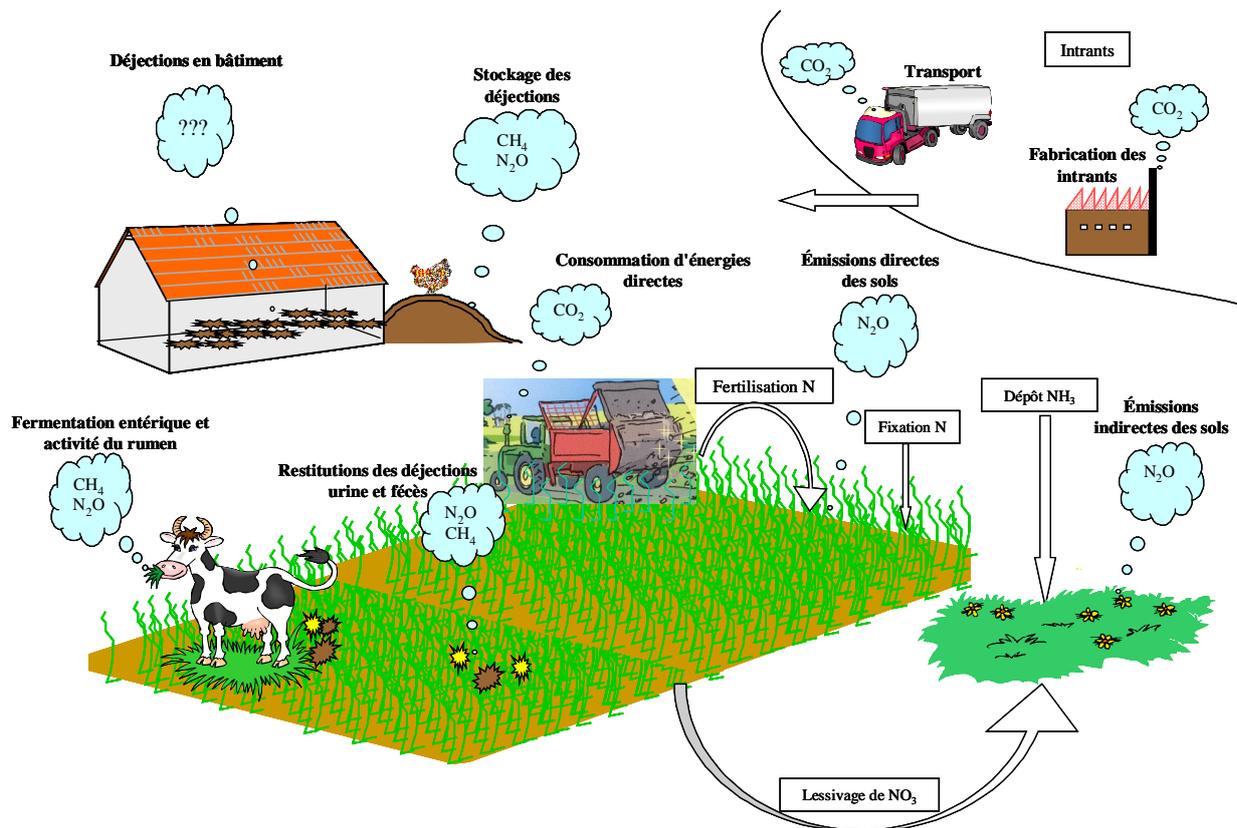
Les évaluations directes s'arrêtent par définition à ce qui se passe sur l'exploitation elle-même. Les intrants ont été convertis par convention en équivalent CO₂. Le poste **énergie indirecte** est la somme des émissions de CO₂ énergie + CH₄ + N₂O avant l'arrivée sur l'élevage liées à la production d'un concentré ou d'un fertilisant. Le poste **énergie directe** totalise pour fuel, lubrifiant, etc. les émissions d'extraction et de traitement des produits pétroliers ainsi que les émissions sur l'élevage.

Le bâtiment : Comme l'illustre la figure 1, le type de bâtiment, sa ventilation, sa gestion par l'éleveur n'ont pas été pris en compte. La connaissance des bâtiments bovins français est insuffisante pour poser des hypothèses de l'effet de la litière ou du niveau de paillage. Confortés notamment par AMON *et al.* (2001), nous avons fait l'hypothèse que les déjections émises en bâtiment sont transportées au jour le jour sur le stockage de fumier.

Les déjections et leur gestion : Les rejets des animaux en matière organique et azote ont été calculés. Nous pris en compte la nature des produits, lisiers ou fumiers et les durées de stockage avant épandage, les éventuelles manipulations de produits ainsi que les données climatiques réelles des élevages et non la convention climatique nationale pour les inventaires (CITEPA, 2005).

L'alimentation a été prise en compte de façon fine, aussi bien au bâtiment qu'à la pâture.

FIGURE 1 – Emissions directes et indirectes prises en compte dans notre approche du système de production.



Les intrants du système de production ont été convertis en équivalent CO_2 total qui comprennent la somme de l'énergie mise en œuvre en amont de l'exploitation et les émissions éventuelles de GES avant l'arrivée dans le système de production, y compris le transport (N_2O et CH_4). C'est le cas pour les engrais minéraux, les concentrés et les matériels utilisés sur l'exploitation pour les travaux correspondant aux cultures et aux animaux. La méthodologie d'approche concernant l'énergie est commune à CHARROIN et GALAN (2006, dans cet ouvrage).

3.2. La méthode de calcul Ruminair

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.

Le tableau 1 ci-dessous est issu des choix effectués dans la bibliographie à chaque point d'émission où nous pouvions disposer de références adaptées aux conditions ou aux systèmes d'élevage français.

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 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, ce même ouvrage).

Les émissions de CH_4 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 m^2 de bouses de JARVIS (1995) : 0,75 (0,3-1,5) g C- CH_4/m^2 fèces.

L'équation de OENEMA (1997) retenue pour les émissions de N₂O 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 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 adaptés 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 considérant que le taux de matière organique est déjà une comptabilisation de son entretien.

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.

TABLEAU 1 – Description de la méthode de calcul par gaz et par poste d'émission.

Source d'émission	Ruminair	Référence bibliographique	GIEC
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)	OUI
CH ₄ pâture (kg C-CH ₄ /UGB/j)	$((0,75 \times 0,8 \times Tpât) / 1000)$	JARVIS <i>et al.</i> (1995)	NON
CH ₄ en bâtiment et stockage fumier (kg C-CH ₄)	MO Fèces + MO paille 1,7 x t fumier brute MO fèces(kg MO/animal) = PV x 0,058 x 0,16 MO t fumier : MO fèces + MO paille litière	Hypothèse : ensemble (bâtiment+ stockage) AMON <i>et al.</i> (2001) ; MARTINEZ <i>et al.</i> (1999)	OUI
N ₂ O rumen (g N-N ₂ O/an)	0,0785 g N ₂ O/kg N ingéré ou 0,05 g N /kg N ingéré	VELTHOF <i>et al.</i> (1998)	NON
N ₂ O en bâtiment et stockage (kg N-N ₂ O/an)	0,57% de N excrété sur la période	Hypothèse : ensemble (bâtiment+ stockage) ; AMON <i>et al.</i> (2001) ; MARTINEZ <i>et al.</i> (1999)	OUI
N ₂ O au pâturage (kg N-N ₂ O/ha/an)	$N_2Opat = [(1,5/100) \times Nuri + (0,4/100) \times Nfèces] \times 1,5)$	OENEMA <i>et al.</i> (1997)	
N ₂ O direct engrais (kg N-N ₂ O/ha/an)	$N_2Ocultures = 0,6 + 0,002 \times Fert + 1,27 \times Csol - 0,024 \times Sable$ $N_2Oprairies = 2,4 + 0,015 \times Fert$ 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)	OUI
N ₂ O fixation Légumineuse pure (kg N-N ₂ O/ha/an)	$N_2Ocultures = 0,6 + 0,002 \times Fert + 1,27 \times Csol - 0,024 \times Sable$ Où fertilisation = N fixé/ha/an	FREIBAUER <i>et al.</i> (2002)	OUI
N ₂ O par fixation symb. Prairies (kg N-N ₂ O/ha/an)	$N_2Oprairies = 2,4 + 0,015 \times Fert$ Où Fertilisation = 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 je ne comprends pas où ça intervient...	FREIBAUER <i>et al.</i> (2002) NON mis en œuvre sur cas types	NON
N ₂ O Indirect issu du lessivage (kg N-N ₂ O/ha/an)	Méthode GIEC = 0,025 x kg N lessivé N lessivé station = BURNS Lixim sur reliquats N sols N lessivé cas type = Giec= 30% apport	VELTHOF <i>et al.</i> (1998)	OUI
N ₂ O Indirect atmosphérique (kg N-N ₂ O/an)	$N_2Odepôt = 5 \text{ g N-N}_2\text{O/kg N volatilisé sous forme de NH}_3$	VELTHOF <i>et al.</i> (1998)	OUI
CO ₂ Energie directe	Références Institut de l'Elevage	CHARROIN <i>et al.</i> (2006)	NON
CO ₂ Energie indirecte	Références Institut de l'Elevage Amortissement bâtiment non pris en compte	CHARROIN <i>et al.</i> (2006)	NON

Au final, le méthane émis au niveau de l'exploitation est la somme des émissions par la digestion des animaux, de l'effet des bouses à la pâture et du stockage des déjections.

Les émissions de N₂O sont la somme de plusieurs points d'émission. Elles totalisent les émissions des déjections au bâtiment-stockage, à la pâture, à l'épandage, lors de la fixation par les légumineuses ainsi que 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.

Chaque gaz émis à chaque point d'émission a été converti conformément aux inventaires :

- 1 kg de CH₄ équivaut à 21 équivalent CO₂ ;
- 1 kg de N₂O équivaut à 310 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.

3.3. Comparaison de modes de calcul en stations expérimentales

La mise en place d'un suivi dans plusieurs stations expérimentales a permis de compartimenter les systèmes de production, de mesurer les flux internes et externes (HACALA, 2005).

Les données journalières et les bilans alimentaires au niveau de l'animal ont permis de calculer avec précision les rejets en bâtiments et sur les parcelles pâturées.

Les bilans parcellaires effectués avec pesées, analyses des récoltes et restitutions calculées quotidiennement, ont été complétés par des mesures de reliquats d'azote en période de drainage pour appliquer le modèle de lessivage de BURNS *via* Lixim de l'INRA. Les nitrates lessivés sous les parcelles contribuent aussi à des émissions de protoxyde d'azote (voir figure 1).

Les légumineuses prairiales ont fait l'objet d'une évaluation fine à la parcelle pour quantifier l'intensité de la fixation. Celle-ci s'accompagne d'une émission de N₂O comparable à un épandage d'azote. Pour un même niveau de production, nous avons utilisé l'équation de FREIBAUER *et al.* (2002). Cette émission n'est pas évaluée par les méthodes GIEC (et pour les cas types nous nous en sommes affranchis).

C'est sur l'ensemble de ces flux, exprimés en azote et en matières organiques, que sont calculées les émissions de protoxyde d'azote et de méthane.

La méthode Ruminair a été mise en œuvre sur 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.

Le matériel (tracteur, matériel tracté, etc.) a été pris en compte mais les constructions de bâtiment ou fumière ne l'ont pas été. C'est cependant un point qui peut peser de 5% à 7% dans les exploitations bovines mises aux normes récemment. Ce point rend les comparaisons difficiles.

On peut retenir de la comparaison des références de données journalières (tableau 2, deux colonnes de gauche) 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 GIGGER-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 : FE entérique = (EB x Ym) x 55,65 où :

- FE entérique : facteur d'émissions du méthane en kg CH₄/animal/jour ;
- EB : énergie brute ingérée en méga joules/ animal/joules ;
- Ym : facteur de conversion du méthane, fraction de l'énergie brute dans la ration convertie en méthane.

TABEAU 2 – Résultats obtenus en station expérimentale (exemple en production de viande) avec les différentes méthodes et part relative des postes d'émissions.

Répartition en % des émissions par poste	Ruminair Institut	GIEC	Ruminair Institut	GIEC	GIEC, niveau 1	CITEPA
CH₄	Sur données journalières		Sur données globales annuelles			
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 teCO₂	1 146 000	1 624 000	1 048 000	1 271 000	1 024 000	1 033 000
Total émis / ha SAU avec énergies	7 920	1 1599	7 169	9 070	7 164	7 294
Total émis / ha SAU sans énergies	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						
**un écart énorme lié à la prise en compte des fumiers et des données météo réels						

Quant aux deux autres méthodes, GIEC niveau 1 et son adaptation CITEPA, elles sont forfaitaires à la tête d'animal ou plus exactement "à la panse" sans réelle prise en compte des âges ou gabarits des animaux :

- Un bovin laitier : 100 kg CH₄/tête/an, génisse incluse, en Europe occidentale , la production moyenne d'une vache laitière est de 4 200 kg/an

- Un bovin non laitier : 48 kg CH₄/tête/an

Or, ce qui est nécessairement forfaitaire au niveau national, peut être affiné au niveau d'une exploitation d'élevage dont les classes d'âge du troupeau et les poids sont bien connus.

En ce qui concerne la gestion des déjections, la méthode GIEC pénalise les fumiers puisque les facteurs d'émissions sont plus forts et le phénomène est accentué par la référence à une température moyenne nationale française qui a une incidence forte sur le facteur d'émission.

Deux autres postes font la différence des résultats du tableau 3 : la gestion des déjections et le poste fertilisation-fixation. En ce qui concerne la fertilisation organique, nous avons appliqué l'équation de FREIBAUER *et al.* (2002) sur la fraction minérale de l'engrais de ferme obtenue avec le coefficient d'équivalence engrais. Ceci permet de ne pas pénaliser les fumiers pour lesquels nous n'avons pas trouvé de référence spécifique. Si on applique l'équation d'émission sur l'azote total, cette émission est énorme alors que seulement 10 à 20% du N total peuvent être sous forme minérale et que l'équation de FREIBAUER prend en compte le taux de matière organique du sol donc

son entretien. Nous avons choisi de comptabiliser 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.

Les fumiers sont également pénalisés par les pertes au stockage dans les calculs GIEC en fonction du temps passé sous les animaux. De plus, la valeur des facteurs d'émissions augmente avec la température, qu'il s'agisse de l'ammoniac dans nos calculs intermédiaires ou des GES. Cette approche nationale des conditions météorologiques est aussi une pénalisation. Or, quels que soient les élevages sur lesquels nous avons travaillé, stations ou cas types, la température moyenne est très au-dessous de la température dite tempérée officiellement retenue donc appliquée pour les colonnes GIEC. Nous avons aussi pris en compte la température réelle des exploitations (données Météo France) alors que les calculs GIEC jusqu'ici prenaient en compte une température moyenne nationale.

– Passage des données journalières aux grands flux annuels

Dans les 4 colonnes de droite du tableau 2, nous avons travaillé sur des données annuelles et effectué des calculs à l'année. Nous avons travaillé avec 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.

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 Institut / Ruminair appliquée aux stations expérimentales pour les cas types des Réseaux d'élevage.

En prenant en compte les écarts que nous avons souligné ci dessus, nous avons considéré la méthode Ruminair validée et transférable dans un premier temps aux "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'Elevage

4.1. Qu'est ce qu'un cas type ?

L'approche globale (structurelle, technique et économique) des exploitations d'élevage est mise en œuvre en France dans les Réseaux d'Elevage depuis le début des années 80 dans le cadre d'une action partenariale associant des éleveurs volontaires, l'Institut de l'Elevage et les Chambres d'Agriculture (CHARROIN *et al.*, 2005). Ce dispositif a pour but la mise au point et la description de systèmes de production cohérents dans toutes les régions d'élevage. Cela passe par le suivi approfondi, l'accompagnement technique, l'enregistrement et l'analyse des résultats obtenus d'un échantillon raisonné d'exploitations (500 à 600 élevages par filière). Le traitement des données recueillies, combiné à l'expertise acquise par les acteurs de ce dispositif, permet de décrire et de modéliser une large gamme de systèmes de production à des niveaux d'optimisation compatibles avec leur contexte socio-économique et pédoclimatique. L'expérience acquise dans l'action Réseaux d'Elevage a permis d'élaborer une typologie nationale intégrant les approches retenues dans les principales enquêtes nationales que sont les enquêtes structure, les recensements agricoles et le Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA) (CHARROIN *et al.*, 2005).

A partir des résultats des exploitations suivies, les Réseaux d'Elevage élaborent, par modélisation, des références globales sur les systèmes appelées cas types. Ils décrivent le fonctionnement cohérent d'une exploitation en rythme de croisière pour un système et un contexte donné. La typologie a été appliquée à ces modélisations pour constituer un échantillon national de cas types par filière, permettant de couvrir l'essentiel de la diversité des systèmes d'élevage français (CHARROIN *et al.*, 2005).

La base de données des cas types des Réseaux d'Élevage que nous avons utilisée est constituée de 50 cas types, 24 classés en lait et 26 en viande, représentatifs de 109 475 élevages laitiers et 96 241 élevages viandes (chacune des deux catégories contient des systèmes mixtes, à la fois lait et viande). Chaque cas type est donc représentatif de plusieurs milliers d'exploitations d'élevage au niveau national.

4.2. Adaptation de la méthode aux données annuelles des cas types

Nous avons adapté la méthodologie en ce qui concerne les légumineuses prairiales puisque nous avons choisi de ne pas les comptabiliser. En effet, les légumineuses prairiales ne sont pas prises en compte dans les inventaires nationaux (Citepa 2005 et GIEC). De plus, leurs taux sont fluctuants et difficilement accessibles.

Nous avons validé l'utilisation de l'équation de GIGGER-REVERDIN *et al.* après comparaison sur les cas types avec les équations de KIRCHGESSNER *et al.* (1999) souvent utilisée par nos voisins européens, qui prennent en compte la production laitière mais pas la nature de l'alimentation. Nous avons cependant plafonné la matière sèche ingérée en fonction des niveaux de production et des périodes de rationnement : pâturage et bâtiment notamment.

Nous avons appliqué les facteurs d'émission en évaluant les flux de façon globale à partir des quantités et qualités du concentré distribué aux différents types d'animaux, des récoltes de fourrages, de la répartition des fertilisations organiques et minérales. Les consommations directes d'énergies (électricité, fuel, carburant) émanent des travaux de CHARROIN *et al.* (2006) ; les intrants en concentrés et fertilisants sont des flux dont on connaît la composition précise. Les ingestions et rejets ont été calculés avec les références Corpen 1999 et 2001 avant application des équations de GIGER-REVERDIN sur les périodes de production ou d'entretien.

Enfin, dans les résultats présentés ici, nous avons introduit la notion de SAUA, c'est-à-dire la surface agricole utile liée aux animaux, comprenant la surface en herbe et la surface en cultures contribuant à leur alimentation (blé, orge, protéagineux).

TABLEAU 3 – Emissions de GES par type de système en équivalent CO₂ rapporté à l'unité produite (l de lait ou kg de viande).

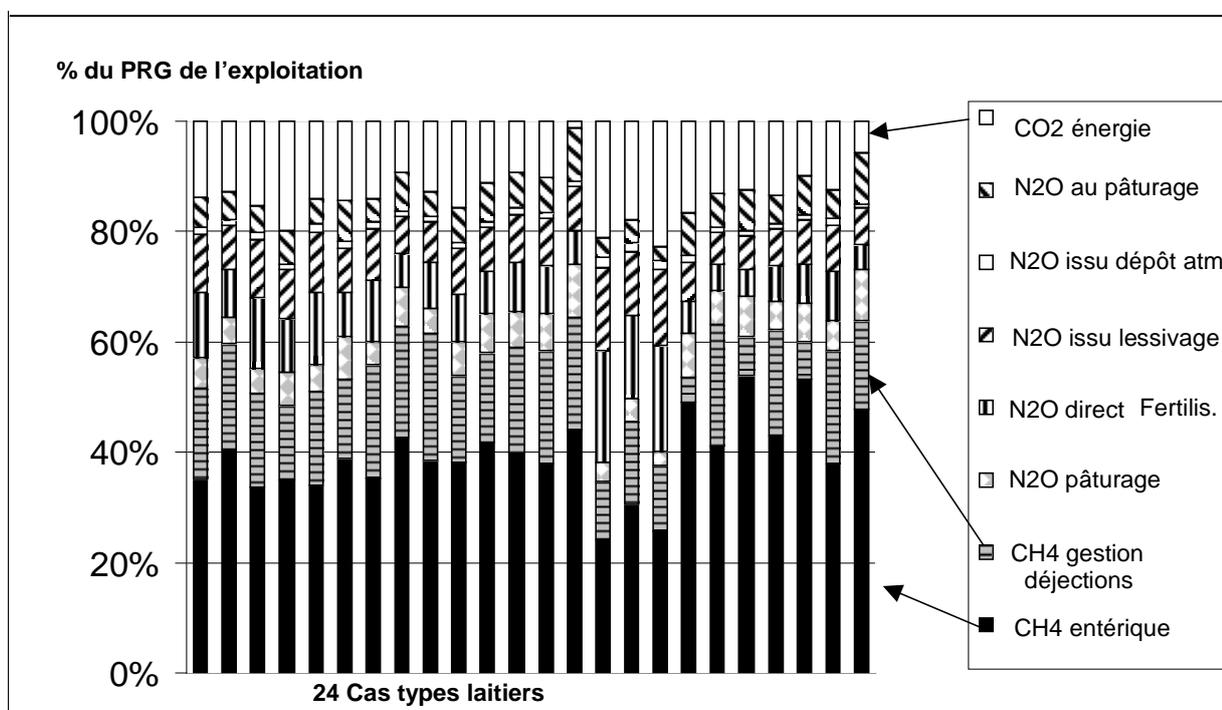
	Emissions		Quelques éléments de structure					
	kg CO ₂ /l lait	kg CO ₂ /kg viande vive	Lait l / VL	SAUA ha	SFP ha	nb VL	nb VA	Lait /ha SAUA
Systèmes spécialisés lait de plaine								
> 30% de maïs	0,98		6 749	40,	28	36		8 385
10 à 30% maïs	1,17		6 444	63	49	41		5 319
Herbagers	1,08		5 673	50	42	32		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

4.3. Résultats en système laitiers

Les résultats moyens par grand type de système figurent dans le tableau 3. Ils montrent les faibles écarts d'émissions totales en équivalent CO₂ par litre de lait. Cependant, lorsque l'on regarde l'ensemble des cas types, elles vont du simple au double sans lien apparent avec les grandes données structurelles du système de production.

La figure 2 ci-dessous présente, pour quelques cas types laitiers, la contribution au Pouvoir de Réchauffement Global des différents gaz et points d'émissions du système d'élevage (animaux, surfaces fourragères et cultures consacrées aux animaux). On y constate que les émissions globalisées masquent des disparités internes de répartition entre les points d'émission même si la contribution du méthane entérique représente environ 50% lorsque l'on prend en compte les animaux et l'ensemble des surfaces qui leur sont attachées.

FIGURE 2 – Contribution moyenne sur les cas types laitiers des différents points d'émissions.



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 le calcul du méthane entérique s'effectue en fonction de cette consommation (% de concentré dans la matière sèche totale ingérée), d'autres facteurs viennent s'ajouter aux émissions pour qu'au final il n'y ait aucune relation significative entre les deux paramètres.

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 leur propres modes de calculs, 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 3). Le système de production et l'approche relativement exhaustive des émissions nivellent donc probablement les écarts auxquels on peut s'attendre en regardant seulement les animaux. L'intensification animale ne diminue pas les émissions par kg de lait produit. De même, 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. De même, l'ensemble des émissions exprimées par hectare a toujours une corrélation forte avec l'intensification de l'hectare SAU, production laitière à l'hectare par exemple. C'est ce que montre la figure 4 ci-après.

FIGURE 3 – Emissions en kg équivalent CO₂ par litre de lait selon le niveau de production par vache et par an.

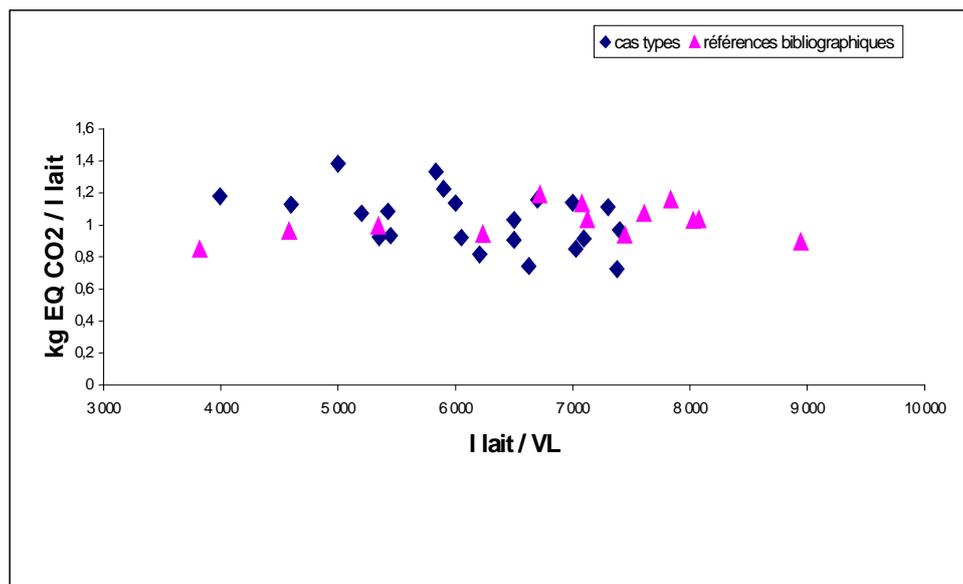
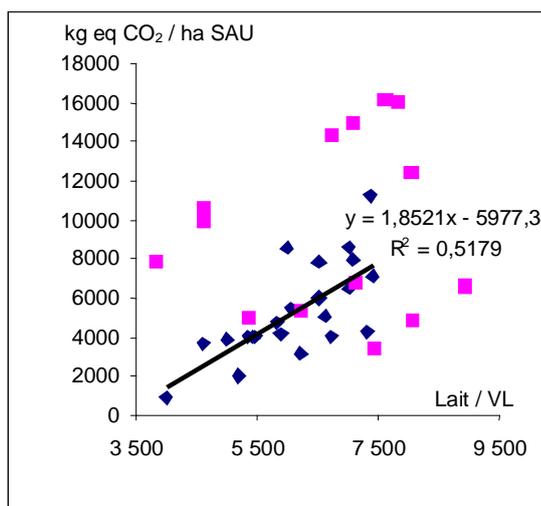


FIGURE 4 – Emission en eq CO₂/hectare en fonction de la production par vache laitière.



Dans nos deux échantillons de cas types, viande et lait lissés, il n'est pas possible de faire un lien entre niveau d'émission par litre de lait ou kg viande produit et grandes orientations de production : autoconsommation ou importation, intensification de l'animal ou système extensif. Tout type de système semble pouvoir produire avec les mêmes performances par rapport aux gaz à effet de serre.

Il est nécessaire de poursuivre ce travail, non pas sur des exploitations types mais sur des exploitations sans optimisation. La base de données Diapason des 1 200 élevages doit nous permettre de le faire sous réserve de collecter quelques données complémentaires dans chaque exploitation.

4.4. Résultats en systèmes viande

Dans les cas types viande (tableau 4), il n'a pas de corrélation entre le concentré ingéré et les émissions ramenées au kg de viande vive ; il en est de même pour le solde du bilan N par hectare. Cependant, la taille de notre échantillon est faible. Les approches réalisées sont à mener en exploitations non lissées.

TABLEAU 4 – Résultats de quelques cas types viande (valeurs moyennes).

	Emissions	Quelques éléments de structure			
	kg CO ₂ /kg viande vive	SAU animale (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
Systèmes naisseurs-engraisseurs 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

5. Mesures d'atténuation possibles

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.

La fertilisation peut faire l'objet d'un ensemble d'améliorations simples qui permettra aussi aux exploitations d'effectuer des économies.

Qu'il s'agisse de fertilisation ou d'alimentation, ces 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.

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

Mesure d'atténuation possible	Conséquences sur			
	Indirect NH ₃	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)	↓	↓	↓	↓

6. Quantification de mesures d'atténuation ou de compensation des émissions par le stockage du carbone dans les sols prairiaux

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. N₂O passe de 3,75 kg à 2,75 kg. Les émissions de méthane sont modifiées légèrement sur le poste fermentation entérique qui passe de 112 à 110 kg. Au final, pour un animal, c'est 110 kg d'équivalent CO₂ qui peuvent être évités 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.

Pour mesurer l'impact d'une modification, toutes les conséquences doivent être évaluées à tous les niveaux de l'exploitation.

Nous avons évalué de façon un peu caricaturale 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, signalons entre autres que 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, aucun calcul n'a été effectué avec les fumiers ; ils sont considérés comme épandus sur les cultures et 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.

Compensation par le stockage de carbone dans les sols et 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

Nous avons testé divers modes de calcul qui permettent de se rapprocher des méthodes de rationnement et de fertilisation des exploitations bovines. Mis au point en stations et comparés à des modes de calculs officiels, ils semblent adaptés aux élevages.

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 et bovins viande français. Ils n'ont pas mis en évidence des différences d'efficacité des systèmes 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 puisqu'une exploitation seulement se distingue avec un bilan N à l'hectare SAU de 130 kg, les autres s'étalant de 20 à 80 kg N/ha.

Ces résultats demandent à être confirmés par des calculs sur des exploitations tout aussi diverses, des cas réels, plus nombreux.

Les systèmes que nous avons étudiés, stations expérimentales ou cas types d'élevages de bovins lait et viande, comportent beaucoup de prairies, éléments forts de stockage de carbone, compensant les émissions. Nous les avons prises en compte de façon schématisée avec une approche simplifiée

des retournements. Selon les systèmes, le stockage peut compenser de 10 à 40% des émissions des troupeaux et des surfaces qui leurs sont attachées.

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. C'est dire que niveau d'émission, mesures d'atténuation ou mesures compensatoires de stockage de carbone sont tout à fait certifiables en exploitation d'élevage.

Remerciements

Les travaux présentés ici ont été menés dans le cadre d'un contrat avec l'Ademe numéro 0375007 dont le 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. cycl. agroecosyst.*, 60 (1/3), 103-113.
- ARROUAYS D., BALESSENT 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, 332pp.
- BOUWMAN A.F. (1990). Analysis of a global nitrous oxide emissions from terrestrial natural and agroecosystems. In: 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.
- BURNS (1976). Modèle d'estimation du lessivage. In : Observatoire azote dans le sol, fascicule n°3. Ministère de l'agriculture – ministère de l'environnement. Mai 1999.
- 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 pages
- 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.
- CHARROIN T., PALAZON R., MADELINE Y., GUILLAUMIN A., TCHAKÉRIAN E. (2005) : Le système d'information des réseaux d'élevage français sur l'approche globale de l'exploitation. Intérêts et enjeux dans une perspective de prise ne compte de la durabilité In *Renc. Rech. Ruminants*, 2005, 12
- CITEPA (2005) : Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France – Series sectorielles et analyses étendues Rapport d'inventaire National, 247 pages Ref 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, In IAEA (ed) *Nuclear Techniques in soil-plant Studies for sustainable Agriculture and environmental preservation*, IAEA, Vienna, pp205-224,1995
- DUPRÉ J.Y (2005) : Usage of LCA in the French dairy industry. Guide on Life Cycle Assessment towards Sustainability in the Dairy Chain. *Bulletin of the International Dairy Federation*, 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. Recommendations 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 [en ligne].. Disponible sur : <http://www.ipcc.ch>
- GIEC mise à jour permanente, Glossaire du GIEC sur le changement climatique.. Disponible sur : <http://www.greenfacts.org/fr/dossiers/changement-climatique/toolboxes/glossary.htm>
- 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, 2000, 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 Octobre 2004 - 99 pages
- 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, Volume 27, Issue 12, Pages 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), September, 4th & 5th 2003, Clermont-Ferrand, France.
- KIRCHGESSNER M., WINDISCH W., MULLER H.L. (1994). Methane release from dairy cows and pigs. In: Johnson K. A., Johnson D. E. (1995). Methane Emissions from Cattle. J. Anim. Sci., 73:2483-2492.
- OENEMA O., VELTHOF G.L., YAMULKI S. AND 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.
- 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. In: Jarvis, S.C., Pain, B.F. (eds) Gaseous nitrogen emissions from grasslands, 201-209.
- Midair 2004 – Proceedings. Greenhouse Gas Emissions from Agriculture – Mitigation Options and Strategies. 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
- UNFCCC Portail Francophone ONU
- VELTHOF G. L., VAN BEUSICHEM M. L., OENEMA O. (1998). Mitigation of nitrous oxide emission from dairy farming systems. Environmental Pollution, Volume 102, Issue 1, Supplement 1, Pages 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.