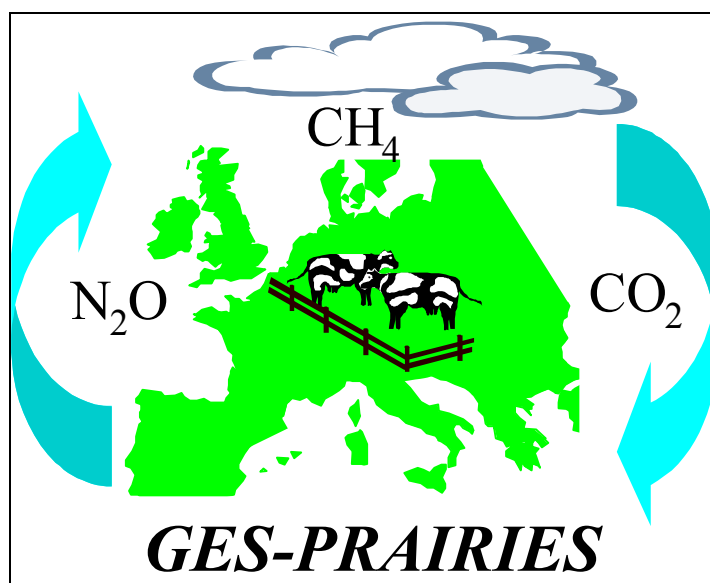


**Sources et puits de gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ )  
en prairie pâturée et stratégies de réduction**



**Rapport final de la seconde tranche du projet  
Avril 2004**

**Coordinateur**

**Jean-François SOUSSANA**  
Directeur de Recherches  
Equipe Fonctionnement et Gestion de l'Ecosystème Prairial  
Unité d'Agronomie, INRA, Centre de Clermont-Theix  
234, Av. du Brézet, 63039 Clermont-Ferrand Cedex 02  
E-mail : [soussana@clermont.inra.fr](mailto:soussana@clermont.inra.fr)  
Fax. 04 73 62 44 57 ; Tel. 04 73 62 44 23

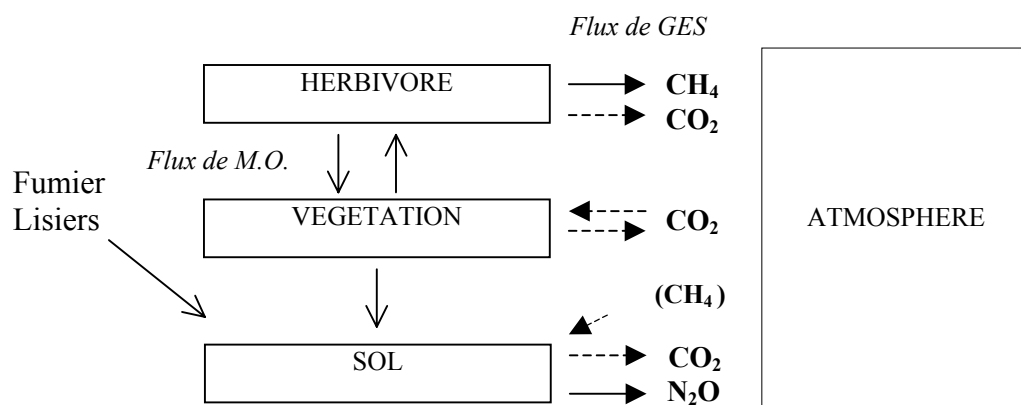
# 1. Introduction

Dans le cadre du protocole de Kyoto sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), divers écosystèmes dont les prairies peuvent jouer un rôle important pour la séquestration du carbone dans les sols. En effet, ce type d'écosystème utilisé par l'élevage couvre entre 20 et 30% du territoire métropolitain français. Dans le cadre des politiques environnementales post-Kyoto, une stratégie de conservation des prairies françaises et d'adaptation de leur gestion pourrait permettre de favoriser le stockage de carbone dans les sols, mais elle pourrait également s'accompagner d'émissions accrues de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> (par les ruminants au pâturage) et de N<sub>2</sub>O (par les sols).

L'expertise collective réalisée par l'INRA à la demande du MEDD sur le stockage de carbone dans les sols agricoles français a permis de montrer que la conversion de cultures en prairies s'accompagnait d'un stockage de carbone moyen dans les sols de l'ordre de 0,5 tC ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> durant 20 ans. Si cette mesure concernait 80 000 ha par an pendant 20 ans, elle aboutirait à un stockage annuel de 0,45 Mt C (INRA, 2002), soit 0,3 % des émissions annuelles brutes de gaz à effet de serre françaises, ce qui n'est pas négligeable au regard de l'effort de stabilisation des émissions de GES à leur niveau de 1990 que la France doit réaliser.

Toutefois, comme le souligne cette expertise, de nombreuses incertitudes persistent en ce qui concerne le bilan de gaz à effet de serre des surfaces prairiales et des systèmes d'élevage. Les écosystèmes prairiaux pâturés sont particulièrement complexes et divers, du fait d'une large gamme de modes de gestion et de conditions pédo-climatiques. Pour l'instant, leur contribution nette au réchauffement global (en équivalent CO<sub>2</sub>) n'est pas connue à l'échelle nationale. **Le projet GES-Prairies a pour objectif d'établir un premier inventaire de la contribution nette des prairies françaises aux flux de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) et d'évaluer les possibilités de réduction de ces émissions nettes par des adaptations des modes de conduite et des systèmes d'élevage.**

Trois gaz à effet de serre interviennent dans les échanges avec l'atmosphère dans une prairie pâturée : CO<sub>2</sub> (échangé avec les animaux, le sol et la végétation), N<sub>2</sub>O (émis par le sol), CH<sub>4</sub> (émis par les ruminants au pâturage) (Figure 1). L'amplitude de ces flux dépend de nombreux facteurs, qu'ils soient liés au climat, au sol, à la végétation, à la gestion, ou à l'environnement global.



**Figure 1** - Représentation schématique des flux de gaz à effet de serre (GES) et des principaux flux de matière organique (MO) dans une prairie pâturée.

Flux de GES directement inclus (—→), ou non (- - -→), dans les inventaires nationaux réalisés dans le cadre de l'Article 5.1 du protocole de Kyoto (Revised 1996 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Workbook).



## 2. Résumé & équipes participantes

### 2.1. - Résumé

*Le projet **GES-Prairies** a deux objectifs : 1° Réduire les incertitudes concernant les flux de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O des prairies françaises et évaluer le bilan de gaz à effet de serre de ces surfaces. 2° Analyser les émissions nettes de fermes d'élevage bovin, puis construire et évaluer des scénarios de gestion permettant de réduire ces émissions nettes. Ce projet comprend trois volets aux échelles de la parcelle, de la ferme et de la région.*

#### Volet parcelle

Des mesures des flux de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O ont été réalisées durant deux ans sur une prairie permanente préalablement gérée de manière intensive par la fauche et le pâturage en moyenne montagne (Laqueuille, 63). Depuis Avril 2002, cette prairie a été pâturée par des bovins en comparant deux traitements contrastés : pâturage intensif avec fertilisation azotée (1,0 Unité Gros Bétail UGB ha<sup>-1</sup> et 170 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) et pâturage extensif (0,5 UGB ha<sup>-1</sup>) sans fertilisation. Le bilan de la première année de mesures montre qu'une extensification (réduction du chargement animal et arrêt de la fertilisation azotée) permet de stocker plus de carbone dans la prairie (NEE de -0,38 et -1,40 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> dans les traitements intensifs et extensifs, respectivement). La respiration des bovins a un poids important dans ce bilan (émission de 1,0 et 1,9 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>).

L'extensification n'a pas entraîné d'augmentation significative par kilogramme de poids vif des émissions de méthane dues à la fermentation entérique des ruminants. Une faible activité d'oxydation de méthane par les sols a été mesurée. Les émissions de N<sub>2</sub>O ont présenté une forte variabilité spatiale (distribution log-normale) et temporelle. Les mesures indiquent des flux moyens faibles, correspondant à un facteur d'émission du N<sub>2</sub>O (selon la méthodologie IPCC) de 0,50% dans le traitement fertilisé. Au bout d'un an de mesures, le traitement intensif constitue une source nette de GES (+0,64 t équivalent C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>), alors que le traitement extensif a une activité nette de puits (-0,92 t équivalent C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>), du fait de moindres émissions de N<sub>2</sub>O et de CH<sub>4</sub> et d'une absorption accrue de CO<sub>2</sub>. Ces tendances ont également été simulées par le modèle PASIM, qui indique une activité de puits de GES durant la première année après extensification par réduction du chargement animal. L'évolution à plus long terme du bilan de GES n'est toutefois pas connue, même si le modèle PASIM indique que le stockage de carbone obtenu dans le traitement extensif serait difficile à maintenir dans la durée sans apport d'engrais azoté.

#### Volet ferme

Un modèle (FARMSIM, couplé à PASIM) permettant de simuler le bilan de GES d'une ferme d'élevage a été mis au point et a été testé sur une ferme Lorraine d'élevage bovin mixte (lait et viande, chargement annuel moyen de 1,3 UGB ha<sup>-1</sup>) de 100 ha de SAU (dont 76 ha de prairies et 21 ha de cultures annuelles). Les résultats indiquent une émission nette annuelle de 175 t équivalent C-CO<sub>2</sub> pour cette ferme. Le bilan annuel de GES s'élève à 1,34 t équivalent C-CO<sub>2</sub> par UGB, ou encore à 0,54 kg C-CO<sub>2</sub> par kg de lait produit. Le stockage de carbone par les prairies (simulé par le modèle PASIM) constitue le seul puits de carbone de l'exploitation. Sans ce puits de 56 t équivalent C-CO<sub>2</sub>, le bilan de GES de la ferme simulée serait alourdi de près de 30 %.

Les émissions directes du bétail (méthane éructé et CO<sub>2</sub> respiré) constitueraient le poste le plus lourd des émissions de la ferme (142 t équivalent C-CO<sub>2</sub>), le méthane représentant un peu plus de la moitié de ce total. Plus de la moitié des émissions de N<sub>2</sub>O sur cette ferme seraient liées au stockage des déjections animales produites en stabulation.

Malgré leur faible superficie, les 21 ha de cultures annuelles émettraient presque autant de N<sub>2</sub>O que les prairies. Plusieurs scénarios de réduction du bilan de GES sont en cours d'étude pour cette ferme. Le scénario le plus prometteur consisterait à supprimer l'atelier de production de viande, à remplacer la culture de maïs par un protéagineux, à réduire de moitié les apports d'azote sur les prairies (en comptant sur une fixation biologique accrue d'azote par des légumineuses) et à augmenter jusqu'à 85 % la part de l'herbe dans l'alimentation hivernale du troupeau. Les données concernant deux autres fermes de l'Ouest de la France devraient être prochainement disponibles et seront également analysées.

### Volet régional

Le modèle PASIM a été utilisé pour simuler les prairies européennes avec une résolution spatiale de 1° (environ 200\*200 kms). Pour chaque maille, l'analyse de sensibilité du modèle a permis de calculer un apport d'azote qui correspond à 30 % de la fertilisation qui maximiserait la croissance annuelle de la prairie. Les apports calculés varient en France de 150 à 300 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, ce qui correspond assez bien aux pratiques agricoles sur les prés de fauche. Des apports moindres sont simulés en pâture (le pâturage s'accompagnant d'un recyclage élevé d'azote) et dans le mode mixte où l'on combine sur un pixel des prairies fauchées et pâturées, au prorata des besoins alimentaires hivernaux et estivaux des troupeaux. La productivité végétale varie pour la France entre 4 et 6 t C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, soit de 10 à 15 tMS ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>.

Les simulations réalisées sur le mode mixte fauche/pâture montrent que près de la moitié de la superficie en prairie est en moyenne consacrée à la fauche. Les simulations indiquent des coefficients d'émission de N<sub>2</sub>O assez stables pour les différentes mailles en Europe, avec des valeurs qui sont de l'ordre de 1-2 % en fauche (apport d'azote minéral) et de 3-4 % en pâture (apport d'azote organique à partir des déjections animales). En régime de fauche, les simulations prédisent un stockage de carbone annuel important, dont l'amplitude varie de 0,5 à 6 tC ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Toutefois, une partie importante de ce stockage intervient dans le fourrage récolté (parties aériennes fauchées).

Le stockage de carbone des prairies pâturées (0,3 à 2 tC ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) est donc plus faible que celui des prairies fauchées. Les simulations indiquent que les prairies fauchées constituent un important puits net pour les GES étudiés, l'amplitude de ce puits varie en France de 2,5 à 6 t équivalent C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. En revanche, les prairies pâturées à leur chargement animal potentiel constitueraient une source nette de GES, avec des flux variant en France de 0,5 à 2 t équivalent C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>.

Les simulations associant prairies fauchées et pâturées, au prorata des besoins créés par l'alimentation hivernale des troupeaux, indiquent pour la France un puits nets de GES avec des flux annuels de 2 à 3 t équivalent C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Un réalisme accru serait également obtenu en tenant compte des spécificités des systèmes d'élevage. Les données des réseaux animés par l'Institut de l'Élevage sont en cours de mise en forme afin de pouvoir renseigner sur une base régionale les paramètres d'entrée liés à la gestion du modèle PASIM. A l'échelle européenne, une collaboration a été entamée afin de disposer de données analogues sur les principaux systèmes d'élevage en Europe. A terme, des simulations régionales des fermes d'élevage, de leur bilan de GES et de leurs résultats économiques pourraient être entreprises. On disposerait alors de bases solides pour raisonner des scénarios d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre de ce secteur agricole.

The project "**GES-Prairies**" (*Greenhouse Gases – Grasslands*) had two main objectives: 1° To measure more accurately the fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O of French grasslands and determine the greenhouse gas (GHG) balance of these areas. 2° To calculate the net GHG emissions of cattle production farms and finally to propose and evaluate some management scenarios leading to a reduction of GHG emissions. This project deals with three different spatial scales: the field scale, the farm scale and finally, the regional scale.

### **Field scale**

During two years, fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O were measured in a mid-mountain permanent grassland, previously managed intensively by cutting and grazing (Laqueuille, Auvergne, France). Since April 2002, this grassland has been exclusively grazed by cattle and two contrasted management have been compared: Intensive grazing (1 LSU (livestock unit) ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> and 170 kg N ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>) and extensive grazing (0.5 LSU ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>, no N fertilisation). Results from the first complete year of measurements show that the extensification process (reduction of the stocking rate and stopping N fertilisation) allows to stock more carbon in the ecosystem (Net Ecosystem Exchange (NEE) of -0.38 and -1.4 t C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup> in the intensive and extensive treatments respectively). The cattle respiration flux plays an important part in this budget (1.9 and 1 t C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>).

Per kg of live weight, the extensification did not lead to a significant increase of CH<sub>4</sub> emissions produced by the enteric fermentation of the ruminants. A small CH<sub>4</sub> oxidation activity by grassland soils was also detected. N<sub>2</sub>O emissions were characterised by a strong variability, as well spatial (log-normal distribution) as temporal. These measurements show that the average fluxes are small and correspond to an emission factor (calculated following the IPCC methodology) of 0.5% in the fertilised (intensive) treatment. After one year of measurements the intensive treatment was as a net source of GHG (all three gases cumulated) of +0.64 t C CO<sub>2</sub> equivalent ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>, whereas the extensive treatment showed a net sink activity of -0.92 t C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>) due to lower emissions of both N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> and a higher CO<sub>2</sub> absorption. These trends have also been simulated using the PASIM model, which predicts a GHG sink activity during the first year after reduction of the stocking rate. However, the long term evolution of the GHG balance is not known and the sink activity in the extensive treatment might be hardly maintained in the long run without any fertilisation.

### **Farm scale**

We developed a model (FARMSIM, coupled to PASIM) able to simulate the GHG balance of a livestock farm. FARMSIM has been tested with data obtained from a mixed livestock farm in Lorraine (dairy and meat production, annual average stocking rate = 1.3 LU ha<sup>-1</sup>) of 100 ha (including 76ha of grasslands and 21 of annual crops). The results indicate a net emission of 175 t equivalent C-CO<sub>2</sub> for this farm. If expressed per unit of product, it represents 1.34 t equivalent C-CO<sub>2</sub> per LU and per year or 0.54 kg CO<sub>2</sub> per kg of milk and per year. The carbon accumulation in the grasslands is the only C sink of the farm. Without this sink of 56 t equivalent C-CO<sub>2</sub>, the net GHG emission of the system would be 30% higher.

Livestock emissions (eructed CH<sub>4</sub> and respired CO<sub>2</sub>) represent the major part of the total simulated farm emissions (142 t equivalent C-CO<sub>2</sub>), with CH<sub>4</sub> representing sensibly more of 50% of this total. More than 50% of the N<sub>2</sub>O emissions on this farm is linked to storage of manure produced in animal housing.

In spite of their small participation to the total area of the farm, the 21 ha of crops are predicted to emit almost as much N<sub>2</sub>O as the grasslands. Several scenarios of reduction of the GHG balance are

presently investigated for this farm. The most promising of these scenarios would imply to stop the meat production unit, to replace the maize production by a proteaginous crop, to reduce the N fertilisation in the grasslands (expecting therefore a higher N input through N<sub>2</sub> fixation by legumes species) and to increase to 85% the proportion of herbage in the winter diet of the livestock. Data concerning two other farms situated in the western part of France should be available soon and will be analysed.

### **Regional scale**

The PASIM model has been used to simulate the European grasslands with a spatial resolution of 1' (about 200 \* 200 km). For each grid cell, a sensibility analysis allowed to determine the N application which correspond to 30% of the N application that would maximise the annual yield of the pasture. In France, these calculated values range between 150 and 300 kg N ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>, which is relatively close to the management practices observed in the field for cut grasslands. Lower values have been calculated for grazed grassland (because grazing is accompanied by a strong recycling of N) and in the mixed system (simulated by combining on the same grid cell cut and grazed grassland in proportion to the need of dietary need in summer and winter). The simulated yield in France ranges between 4 and 6 t c ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>, i.e. 10 to 15 t DM ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>.

Simulation runs on mixed systems (combining grazing and cutting) show that almost one half of the grassland area is, on average, used for cutting. These simulations predict N<sub>2</sub>O emission factors that are relatively stable for the different grid cells across Europe with values ranging between 1 and 2% in cut systems and between 3 and 4% under grazing (with organic N application through faeces and urine deposition). Under cutting, the simulations predict a important annual C storage (varying between 0.5 to 6 t C ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>). However one must consider that an important part of this storage occurs in the harvested forage.

C storage in grazed grasslands (0.3 to 2 t C ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>) is lower than in cut grasslands. The simulations indicates therefore that cut grassland could represent an important net GHG sink. In France, the amplitude of this sink could vary between 0.5 and 2 t C CO<sub>2</sub> equivalent ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>.

The simulations combining cut and grazed grassland, in proportion to the dietary needs, show that, in France, these systems would be a net GHG sink of 2 to 3 t C CO<sub>2</sub> equivalent ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>. More realistic results would be obtained if the differences between farming systems were taken into account more specifically. Data from farmers networks managed by "l'Institut de l'Élevage" are under processing in order to provide the PASIM model with parameters obtained on a regional basis. At the European scale, collaborations aim to provide similar data for the main farming systems in Europe. In the long term, simulations of livestock farms at the regional scale could provide their GHG balance and economic results. This would then create solid basis to propose mitigation scenarios of GHG emissions for this part of the agricultural sector.

## **2.2. - Equipes participantes**

Le projet de seconde tranche (2001-2002) fédère un ensemble de laboratoires de l'INRA, rassemblant un large éventail de compétences (micrométéorologie, zootechnie, agronomie de la prairie, systèmes d'élevage, modélisation, spatialisation), ainsi que le LSCE et l'Institut de l'Elevage.

### ➤ **INRA Clermont-Ferrand – Unité Agronomie (UR 23-874)**

234, rue de Brézet - F 63100 Clermont-Ferrand, France

- Dr. Jean-François Soussana (Coordinateur)
- Dr. Pierre Loiseau (caractérisation des parcelles et détermination des protocoles d'échantillonnage des sols)
- Ing. Robert Falcimagne (mise en place des mâts micrométéorologiques et suivi des mesures)
- Dr. Vincent Allard (suivi des mesures, traitement des données de flux et de production fourragères; post-doc)
- Dr. Eric Ceschia (suivi des mesures, traitement des données de flux et de production fourragères; post-doc)
- Ing Sloan Saletes (assistant coordinateur)

### ➤ **INRA Bordeaux – Bioclimatologie (UR 22-770)**

BP81 33883 Villenave d'Ordon, France

- Dr. Paul Berbigier (analyses spectrales des mesures micrométéorologiques et établissement des protocoles de mesure par corrélation turbulente)
- Ing. Jean-Marc Bonnefond (établissement des protocoles de mesure par corrélation turbulente et aide au traitement des données micrométéorologiques)

### ➤ **INRA Dijon – Microbiologie des Sols (UR 29-111)**

17, rue Sully BV 86510 - 21065 Dijon cedex, France

- Dr. Catherine Hénault (Suivi des variations saisonnières des flux de N<sub>2</sub>O et étude de la microbiologie des sols)

### ➤ **INRA Grignon – Environnement et Grandes Cultures (UR 11-1091)**

78850 Thiverval - Grignon – France

- Dr. Pierre Cellier (étude de la variabilité spatiale des flux de N<sub>2</sub>O par l'utilisation de TDL)
- Dr. Patricia Laville (mesure des flux de N<sub>2</sub>O par l'utilisation de TDL)

### ➤ **INRA Theix – Unité de Recherches sur les Herbivores (URH - UR 23-1053)**

63122 Saint-Genès-Champanelle, France

- Dr. Cécile Martin (étude des émissions de CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> par les ruminants en fonction de la digestibilité du fourrage)
- Dr. César Pinares (étude des émissions de CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> par les ruminants en fonction de la digestibilité du fourrage)



➤ **INRA Domaine des Mont Dore (UR 23-1053)**

- Ig. Pascal Dhour (gestion animalière sur le site)

➤ **INRA Mirecourt – Systèmes Agraires et Développement (UR 12-55)**

Station de Mirecourt - Domaine du Joly BP 35 - 88501 Mirecourt cedex, France

- Dr Jean-Louis Fiorelli (élaboration de scénarios de réduction des émissions de GESs)

**Sous-contactants :**

➤ **LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement)**

Orme, Bât. 709, Orme des Merisiers, F-91191 GIF-SUR-YVETTE CEDEX, France

- Dr Philippe Ciais (Modélisation et changement d'échelle)
- Dr Nicolas Viovy (Modélisation et changement d'échelle)
- Anne Cozic, Ingénieur en Informatique
- Nicolas Vuichard (Doctorant)

➤ **Institut de l'Elevage**

Theix, 63122 Saint-Genès Champanelle, France

- Ing. Anne Farrugia et Sylvie Hacala (Etude des systèmes d'élevage et options de réduction des émissions)

## 3. Méthodologie

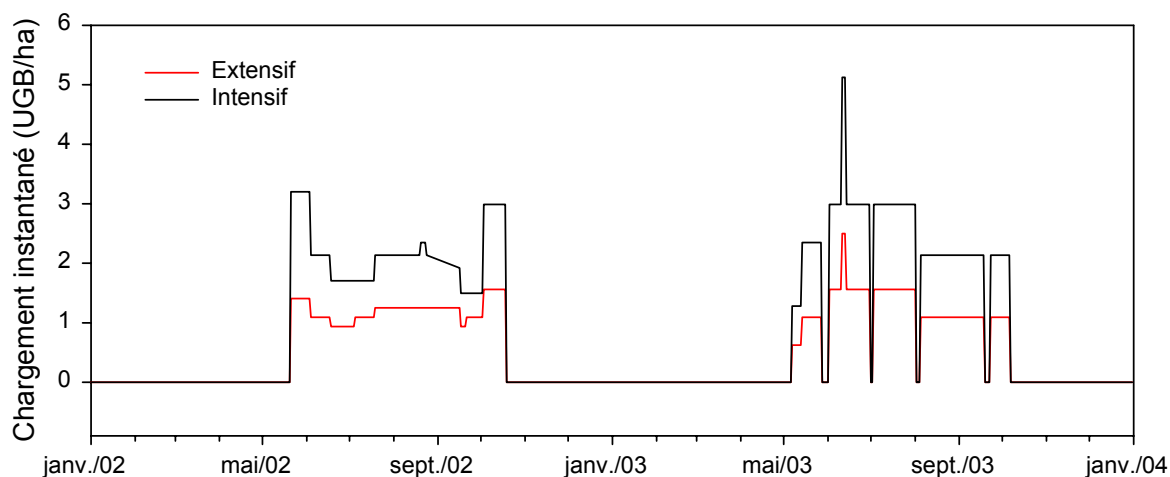
### 3.1. - Bilan des émissions nettes de gaz à effet de serre (GES)

Des mesures, à l'échelle de plusieurs hectares et de plusieurs années, des émissions de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O ont été effectuées dans des prairies pâturées par des troupeaux bovins :

- mesure continue des flux de CO<sub>2</sub> par la méthode des corrélations turbulentes,
- mesure des émissions de méthane et de CO<sub>2</sub> par les vaches au pâturage,
- campagnes ponctuelles de mesure des flux de N<sub>2</sub>O par la méthode des fluctuations turbulentes et suivi régulier des flux de N<sub>2</sub>O à l'échelle du mètre carré.

Une parcelle («Les Percières»), de 7 ha environ (Figure 2), a été sélectionnée en fonction d'un ensemble de critères physiques (site plat et dominant), biologiques (prairie permanente gérée de manière continue par la fauche et par le pâturage de bovins allaitants depuis plus de 10 ans) et économiques (possibilité de contrôler la gestion de la parcelle pour les besoins du projet GES-Prairies). Cette parcelle, de par sa dimension et son homogénéité, a permis de disposer d'un site de bonne qualité, pour estimer le bilan intégré des émissions nettes de gaz à effet de serre dans la prairie pâturée. En 2001, cette parcelle a été pâturée de manière continue pour obtenir de premières références sur les flux de CO<sub>2</sub> (cf. rapport GICC première tranche).

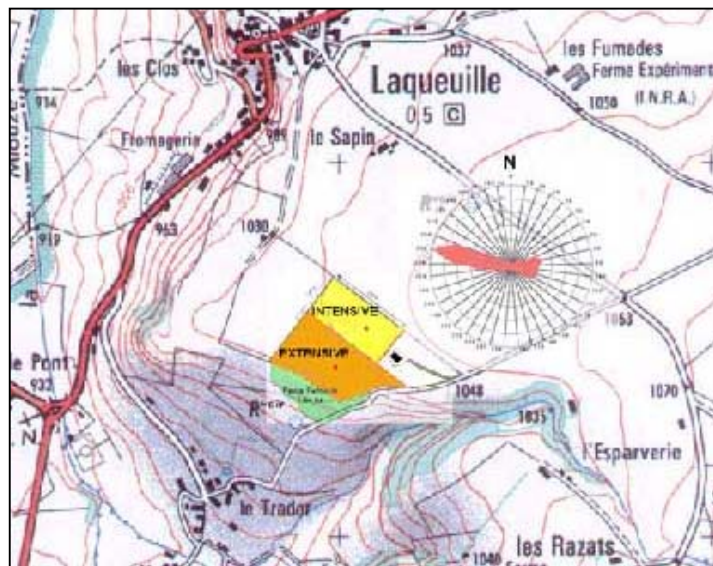
Au cours de la deuxième phase expérimentale, en 2002, le chargement témoin (traitement intensif avec un chargement moyen annuel de 0.9 UGB/ha) a été comparé à un chargement réduit à 0.5 UGB/ha (extensification). La parcelle initiale a été séparée en deux sous-parcelles de 3.8 ha (pâturage extensif) et 2.8 ha (pâturage intensif). Les traitements de pâturage ont été appliqués en Mai 2002 et ont été poursuivis en 2003 et 2004.



**Figure 2** - Evolution du chargement instantané (en UGB/ha) sur les parcelles intensive et extensive au cours des saisons 2002 et 2003

Les deux parcelles ont été pâturées en continu de Mai à Octobre par des génisses laitières (Charolaises). La hauteur de l'herbe dans chaque parcelle a été mesurée chaque semaine, voire deux fois par semaine au printemps, par un herbomètre à plateau. Le nombre de génisses dans le traitement intensif a ensuite été ajusté, de manière à rester proche d'une hauteur de l'herbe correspondant à une biomasse sur pied d'environ 1 t MS ha<sup>-1</sup>. Le nombre de génisses dans le traitement extensif a été modifié simultanément afin de conserver un chargement animal par hectare environ deux fois inférieur dans le traitement extensif comparé au traitement intensif (Figure 3)

Seule la parcelle intensive a été fertilisée (170 U N, 50 U P, 75 U K) en 2002 et 2003 dans le but de maintenir des indices de nutrition équivalents dans les deux traitements, en tenant compte des pertes plus forte dans le traitement intensif. Des analyses de concentration N, P, K en 2002 et 2003 ont en effet montré que le niveau de fertilité n'avait que peu divergé entre les deux parcelles.



**Figure 3** - Plan de la parcelle des Percières (7,68 ha, domaine expérimental de Laqueuille, 63). Rose des vents, localisation approximative des deux mâts micrométéorologiques (en rouge, hauteur de 2,7 m) et de la station météorologique (en vert) à partir de 2002. Les traitements de pâturage continu mis en place en 2002, exploités de manière intensive (1,6 UGB/ha) ou extensive (0,8 UGB/ha), sont délimités par le tracé en rouge.

### 3.1.1. - Mesure des flux de CO<sub>2</sub>

La parcelle des « Percières » a été instrumentée en plusieurs étapes, de manière à obtenir les données nécessaires au calcul des échanges de CO<sub>2</sub> et à leur interprétation :

- Météorologie : température de l'air, température du sol, humidité relative de l'air, humidité du sol, vitesse et direction du vent, rayonnement global, rayonnement net....
- Corrélations turbulentes : flux de masse d'air (anémomètre sonique, Gill R3) sur un mât de 4.5 m de hauteur en 2000-2001 (parcelle unique), puis sur deux mâts de 2.70 m en 2002 sur chaque sous-parcelle.
- Concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> à 4.5 m au dessus du sol (mesure à une fréquence de 10 Hz) avec un analyseur en système fermé (2000-2001, LI-COR 6262), puis à 2.70 m au dessus du sol avec des analyseurs en système ouvert (2002, LI-COR 7500) sur les deux sous-parcelles (Fig. 3).
- 2 micro-ordinateurs avec disque dur amovible pour acquérir et décharger les données.
- Raccordement aux réseaux téléphoniques et EDF.
- Alimentation électrique en circuit flottant (batteries et alternateur) pour se prémunir des sautes de tension.

### 3.1.2. - Mesure des émissions de méthane et de CO<sub>2</sub> par les ruminants

Les émissions digestives de méthane sur 7 génisses par parcelle à quatre reprises durant la saison de pâturage. Ces mesures ont été réalisées par la technique d'ingestion d'un traceur SF<sub>6</sub> (hexafluorure de soufre, Johnson *et al* 1994, Figure 5). Le SF<sub>6</sub> relâché progressivement par la capsule ingérée par l'animal se combine au CH<sub>4</sub> produit dans le rumen et au CO<sub>2</sub> respiré par les génisses. Ces gaz sont collectés au niveau des naseaux de l'animal grâce à un collier de prélèvement, placé durant 24 h, constitué d'un harnais, d'un capillaire de prélèvement et d'un container d'accumulation en PVC. Ce tube PVC en forme de U placé autour du cou de l'animal a au préalable été mis sous vide. Le flux de SF<sub>6</sub> libéré par la capsule étant connu, les quantités de méthane éructé et de CO<sub>2</sub> respiré par l'animal sont calculées..



Figure 4 - Instrumentation d'un des mâts de mesures micrométéorologiques en 2002

Un collier témoin permet de mesurer le CH<sub>4</sub> ambiant sur la parcelle. Les échantillons de gaz sont analysés par chromatographie en phase gazeuse. Ce dispositif permet aussi de mesurer le CO<sub>2</sub> respiré par les ruminants. En 2002 et 2003, ces mesures ont été réalisées tous les mois environ (quatre périodes par an) sur 7 génisses pour chacun des deux traitements de pâturage continu. De plus, afin de pouvoir interpréter les résultats, des mesures complémentaires concernant l'ingestion au pâturage et la digestibilité de l'ingéré ont été réalisées à ces 8 périodes, respectivement, par l'emploi d'un traceur Yterbium et par la méthode de l'azote fécal.

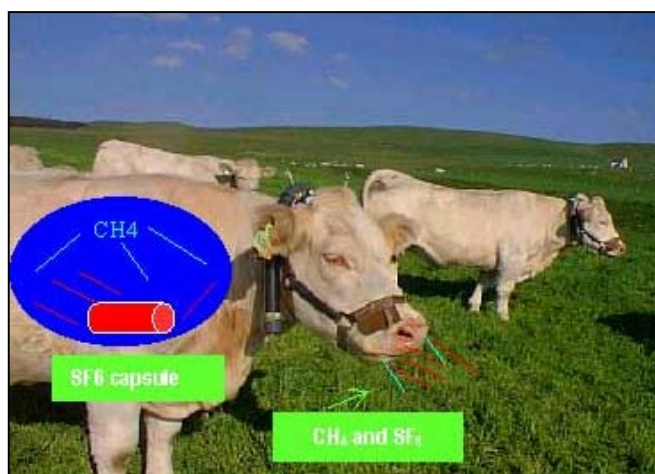


Figure 5 - Méthode de mesure des émissions entériques de méthane chez une vache par la technique SF<sub>6</sub>

### 3.1.3. - Mesure des émissions de N<sub>2</sub>O par les sols prairiaux

Les premières mesures de flux de N<sub>2</sub>O à l'échelle du mètre carré (prélèvements dans des chambres au sol et analyses par CPG) ont été réalisées en 2000 afin de déterminer la variabilité spatiale des émissions, de manière à établir le nombre de répétitions nécessaires, ainsi que la fréquence des observations qui devait être ajustée en fonction des dates de passage des troupeaux. Les premières observations tendaient à montrer qu'une étude de la variabilité spatiale ne pouvait s'effectuer grâce à l'emploi de chambres temporaires (+CPG) mais que cette techniques allait s'avérer utile pour étudier les variations saisonnières des flux.



**Figure 6** - *Chambres de mesure des émissions de N<sub>2</sub>O à Laqueuille en 2002*

Ainsi, en 2002, l'étude des variations saisonnières des émissions de N<sub>2</sub>O a été effectuée par l'emploi de ces chambres de mesures (8 par traitement) installées pour une journée tous les 15 jours sur les parcelles Extensive. et Intensive (Figure 6). Des échantillons de gaz étaient prélevés dans des tubes de verre sous vide. Les gaz récoltés (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub>) étaient ensuite analysés en CPG au laboratoire de microbiologie des sols de Dijon. Le même jour, des échantillons de sols étaient prélevés pour analyser leur humidité et leur teneur en azote.

Par ailleurs, deux campagnes ponctuelles (2 semaines) d'étude de la variabilité spatiale des flux de N<sub>2</sub>O ont été entreprises en Septembre 2002 puis en Juin 2003. Des mesure des flux ont été effectuées grâce à un système de détection par diode laser ajustable (Figure 7) couplée avec des chambres au sol adaptées pour des mesures rapides (5 minutes de mesure environ par chambre). Cette technique de mesure étant assez lourde à gérer, il est impossible de l'appliquer au suivi saisonnier des flux de N<sub>2</sub>O.

Une nouvelle campagne de mesure de la variabilité spatiale des émissions de N<sub>2</sub>O a eu lieu en Juin 2003. Lors ce cette campagne, la variabilité des émissions a été comparée à la variabilité des teneur en eau, en nitrate et en ammonium dans le sol (teneurs déterminées grâce à des résines anioniques et cationiques). Les zones du sol à forte teneur en nitrate ou en ammonium pourraient être échantillonnées, ainsi que des zones témoin à faible teneur, de manière à étudier leurs émissions de N<sub>2</sub>O en distinguant les contributions respectives de ces deux types de zones dans la parcelle ainsi que leurs dynamique saisonnière.





**Figure 7** - Caravane abritant le système TDL et chambre de mesure utilisée pour étudier les variations spatiales des émissions de  $N_2O$  lors de la campagne de mesure à Laqueuille en Septembre 2002

### **3.1.4. – Mesures complémentaires sur la végétation**

Tout au cours de la saison de végétation, des coupes d'herbe toutes les trois semaines permettent d'obtenir un suivi relativement fin de la biomasse d'herbe sur pied. L'utilisation de cages de mise en défens permet de plus d'estimer la production potentielle des deux parcelles à la même fréquence. Lors de ces coupes de végétation, la fraction de matériel vert et mort est déterminée et la teneur en azote du matériel vert est mesurée à l'aide d'un analyseur C/N.

## **3.2. - Modélisation des émissions nettes de GES et options de réduction**

### **3.2.1 - Présentation du modèle PASIM**

Le modèle de simulation d'écosystème prairial PASIM (Riedo et al., 1998). Ce modèle, dérivé du "Hurley Pasture model" (Thornley, 1998), a été calibré et évalué en Suisse et en Angleterre. Il est composé de cinq modules, correspondant respectivement au microclimat, à la biologie et à la physique du sol, à la végétation et aux herbivores. Il simule la production de la prairie, l'ingestion par l'herbivore, ainsi que flux de carbone, d'azote, d'eau et d'énergie dans l'écosystème en fonction des variables climatiques et d'autres paramètres d'entrée concernant le sol et la gestion par l'éleveur (fauche, pâture, fertilisation) (Figure 8).

Les données climatiques (rayonnement global, température, humidité relative de l'air, vitesse du vent, précipitations toutes les 6 heures) fournies au pas de temps horaire (ou sous forme de moyennes journalières) sont utilisées en entrée du modèle de simulation d'écosystème prairial PASIM. Pour chaque site, les compartiments du sol sont d'abord mis à l'équilibre ans avant le début des simulations (cf. Riedo et al., 1998).

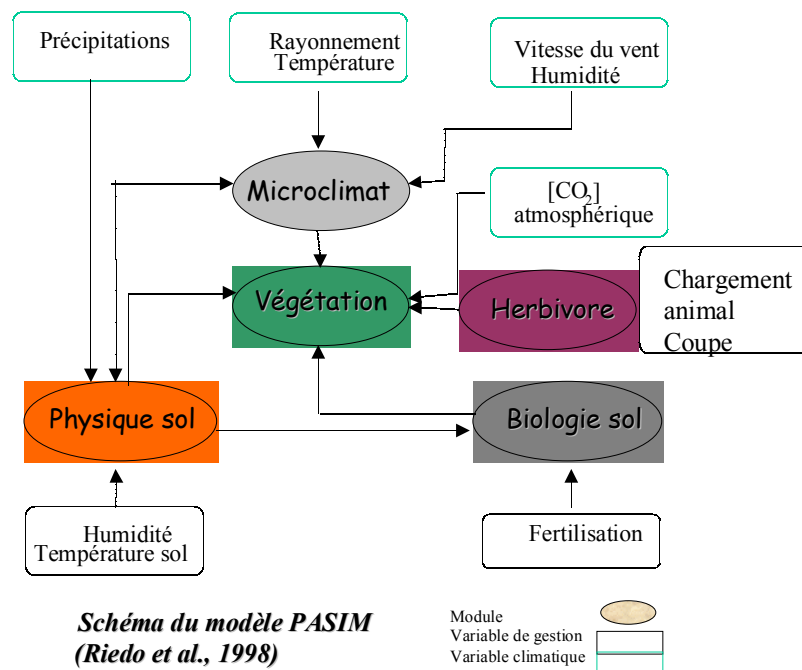


Figure 8 -

La version initiale du modèle PASIM était codée sous ACSL (« Advanced Computer Simulation Language »). De l'avis de l'ensemble des utilisateurs du modèle, ce langage interprété limitait l'utilisation du modèle (une licence étant nécessaire), ainsi que son développement (le code des bibliothèques utilisées par ACSL n'étant pas accessible). Une nouvelle version a donc été entièrement recodée en Fortran 90 par Anne COZIC du LSCE. La version Fortran donne les mêmes résultats numériques que la version ACSL. Ce travail considérable (plus d'un an d'ingénieur contractuel) n'a pas été financé par le projet GICC, mais par d'autres contrats sur la même thématique.

Plusieurs modules du modèle PASIM ont été améliorés de manière à réduire les écarts entre les prédictions du modèle et les mesures faites sur différents sites prairiaux en Europe dans le cadre du projet européen « GreenGrass ».

En particulier, les équations prédisant les effets du déficit hydrique, la sénescence des parties aériennes, la sélection alimentaire au pâturage, les émissions de méthane par les ruminants (en fonction de la composition de la ration pâturée et des choix alimentaires des herbivores) et la production de N<sub>2</sub>O (amélioration du module de physique du sol pour rendre compte des effets du compactage sur la diffusion des gaz) dans le sol ont été revues. Ces différentes améliorations ayant été réalisées dans le cadre du projet européen « GreenGrass », nous présenterons seulement les résultats qui ont été obtenus avec la dernière version du modèle.

### 3.2.2 - Echelle de la parcelle

De premières simulations du bilan complet de GES de parcelles de prairie pâturée ont été entreprises à l'aide de ce modèle, afin d'évaluer les effets de la gestion agricole. On a retenu au cours d'une première approche deux variables de gestion :

- le chargement animal annuel moyen (qui détermine la pression de pâturage et les émissions de méthane des ruminants),
- la fertilisation azotée annuelle.

Avant de simuler les scénarios souhaités, le système a été mis à l'équilibre durant 40 ans en supposant un apport annuel de 230 kgN ha<sup>-1</sup>an<sup>-1</sup> et une fauche par mois entre le 15 juin et le 15 septembre. Il n'y a pas de pâturage durant la mise à l'équilibre. Le climat simulé est celui du site expérimental de Laqueuille.

Au cours d'une seconde étape, le modèle a ensuite été comparé directement aux mesures obtenues sur le site de Laqueuille et sur le site de Oensingen (Suisse), en le forçant dans les mêmes conditions de climat, de sol et de gestion de la prairie par le pâturage (Laqueuille) ou par la fauche (Oensingen).

### **3.2.3. - Echelle de l'exploitation d'élevage**

L'objectif des travaux est de construire un modèle des émissions directes de gaz à effet de serre à l'échelle d'une exploitation agricole d'élevage. On se propose de construire un bilan aussi complet que possible (englobant les trois gaz : CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> et les différents postes d'émission ou d'absorption), mais limité au portail de la ferme. Ne seront donc pas comptabilisées les émissions de GES générées en amont de la ferme par la fabrication et le transport des intrants par la consommation d'intrants et en aval par la transformation et la commercialisation des produits agricoles. Cette approche diffère donc de celle du cycle de vie.

#### **3.2.3.1. - Le modèle FARMSIM**

La calibration et l'évaluation du modèle mécaniste d'écosystème prairial pâturé PASIM doit permettre d'estimer différents scénarios de réduction des émissions nettes à l'échelle de fermes d'élevage au niveau de la région agricole du site expérimental étudié (Massif central). Les bilans nets des émissions de GES doivent à terme être simulés pour plusieurs scénarios de gestion de fermes d'élevage de trois bassins d'élevage français (Massif-Central, Lorraine, Bretagne). Nous avons conçu et implémenté FARMSIM, un outil informatique performant permettant à la fois de :

- décrire de manière consistante et standardisée les flux de C & N pour des fermes d'élevage quel qu'en soit le type (élevage laitier ou allaitant, polyculture -élevage...),
- structurer la collecte de l'ensemble des données « Ferme » nécessaires au calcul du bilan GES à l'échelle de l'exploitation agricole,
- préparer les fichiers d'entrée des modèles utilisés pour calculer le bilan de GES des composantes de la ferme. PASIM est utilisé pour calculer le bilan de GES des prairies de la ferme. Pour les autres composantes (cultures, bâtiments d'élevage, émissions de méthane par les ruminants à l'étable, consommation directe d'énergies fossiles, stockage des effluents d'élevage), la méthodologie IPCC Tier II est utilisée.

#### **3.2.3.2. - Collecte des données dans FARMSIM**

La collecte des données s'appuie sur des fermes réelles ou des cas types décrits par des spécialistes locaux des fermes d'élevage. Une combinaison de données statistiques régionales peut également être utilisée au cas où les données réelles ne seraient pas disponibles. Le recueil des données s'effectue sous un classeur développé et automatisé sous environnement Excel (Figure 9), divisé en neuf modules interagissant les uns avec les autres (Figure 10).



1.3.a. Description of the dairy herd				Number of heads per category of animal	
Animal Breed	Holstein		Dairy Cow s	48	
Quota (liters)	300 000		Bulls		
Milk production / head (l cow <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> )	6700		Calves F born over the year	23	
Live weight of lactating cow s (kg)	650		Calves M born over the year	23	
Period(s) of drying off (start / end)	June-1	October-2	Heifers (1-2 years old)	22	
Period(s) of calving (start / end)	August-1	November-2	Heifers (2-3 years old)	22	
Number of fortnights betw . drying off & calving	4		Baby Beefs (1-2 years old)		
Replacement rate (%)	35%		Baby Beefs (2-3 years old)		
Fat content of milk (%)	42.4		Steers (1-2 years old)	23	
			Steers (2-3 years old)	23	

4.2. Full-time housing : type of housing per category of animal				DAIRY HERD				
		Type of Housing	Type of waste produced	Milking cows	Dry cows	Calves F 0-0.5 yr	Calves M 0-0.5 yr	Calves F 0.5-1 yr
Type 1	Full-time	Straw bedding + scraped concrete passage	Solid manure + slurry	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Type 2	Full-time	Cubicles + slatted passage	Slurry or liquid manure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Type 3	Full-time	Strow ed cubicles + scraped concrete passage	olid manure + dung wate	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Type 4	Full-time	100 % straw bedding	olid manure + dung wate	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Type 5	Full-time	100 % slatted floor	Slurry or liquid manure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Type 6	Full-time	Sloped strow ed yard+ scraped concrete passage	Solid manure + slurry	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Type 7	Full-time	Other (to be specified)	to be specified	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figure 9 - Exemple de tableau de collecte de données sous FARMSIM

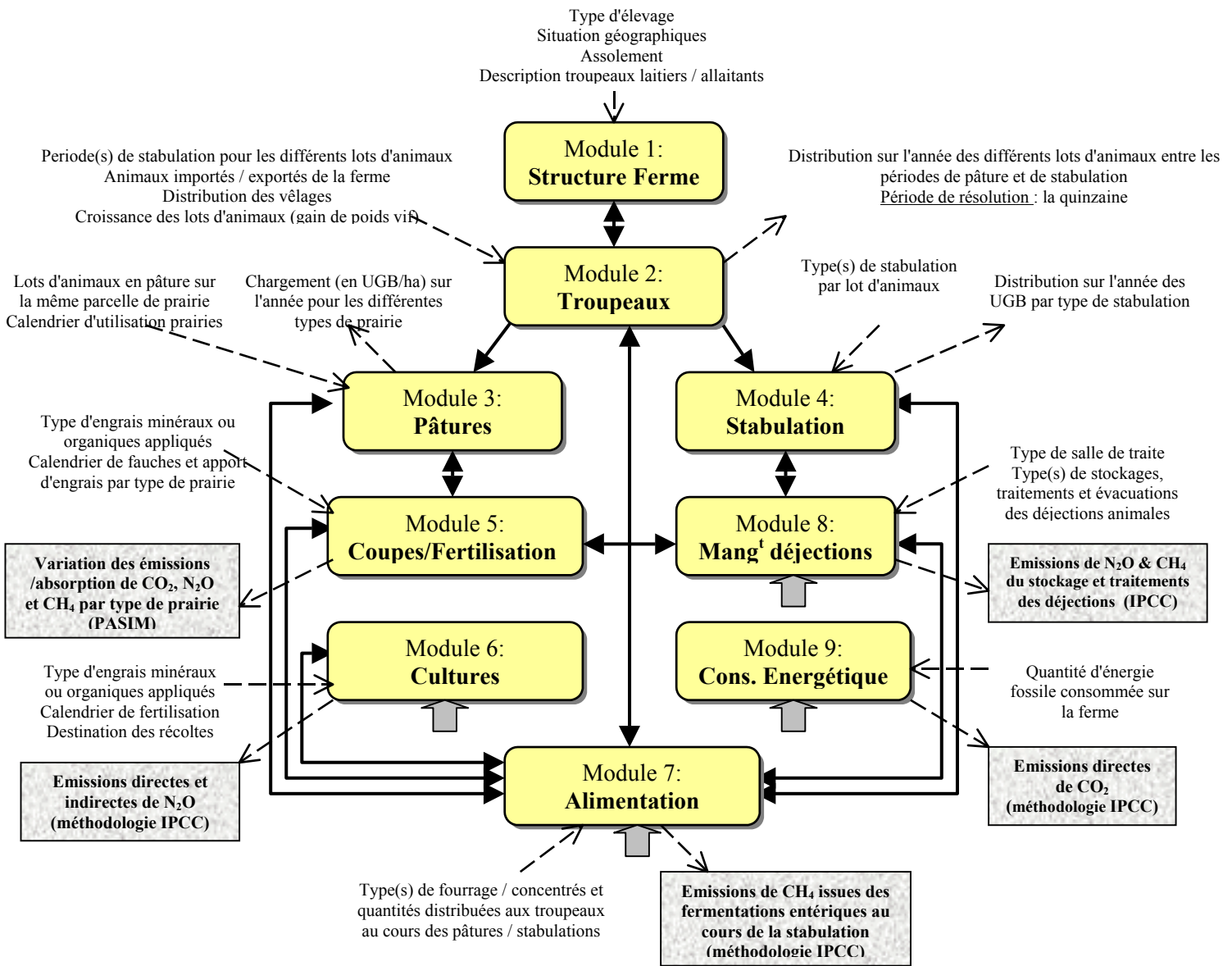
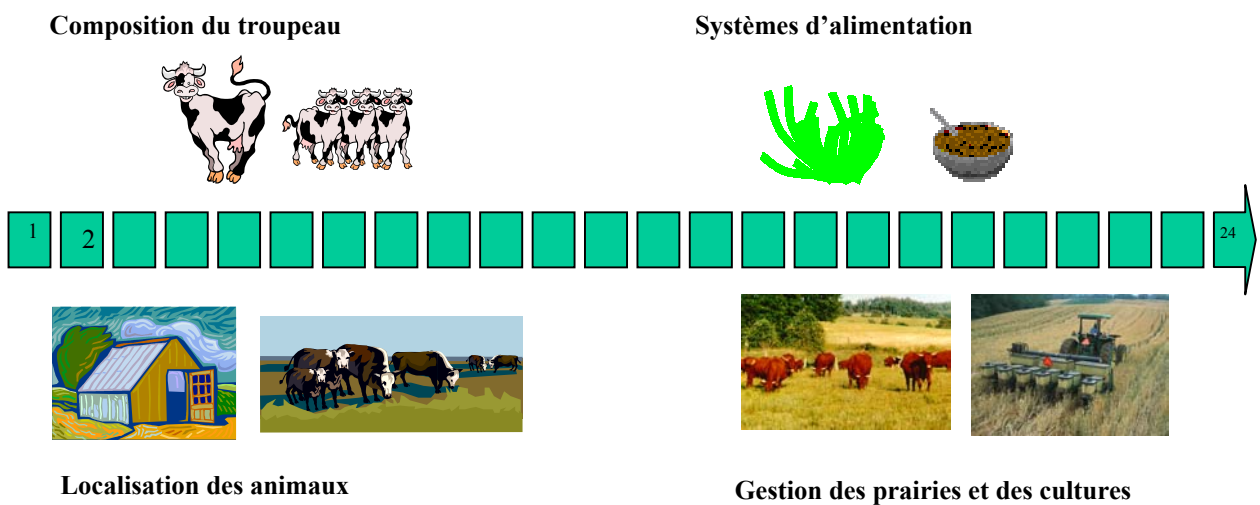


Figure 10 - Structure du modèle de ferme FARMESIM



### ➤ **Module 1 - Présentation Générale**

Ce module permet de saisir les renseignements généraux sur l'exploitation. L'entrée principale du modèle est la composition et la nature du troupeau, composé de vaches laitières, de vaches allaitantes ou mixtes. Le troupeau est par ailleurs divisé selon les différentes classes d'âge et selon le sexe pour les jeunes bovins car les coefficients UGB, les indices de production d'engrais de ferme ou les quantités de CH<sub>4</sub> érucées diffèrent entre ces catégories d'animaux. L'utilisateur donne des renseignements sur l'utilisation de ses prairies et l'assolement des cultures, en précisant les rendements produits, ainsi que la fertilisation apportée.

### ➤ **Module 2 - Le troupeau**

Ce module prend en compte la variation saisonnière des effectifs des animaux (Figure 11). Le passage des animaux dans la catégorie supérieure a été entièrement automatisé. Dès qu'il y a des naissances, la catégorie des 0-6 mois augmente progressivement. Une fois qu'il n'y a plus de naissance, cet effectif est conservé pendant quelque mois avant d'être progressivement diminué, ce qui correspond au passage des animaux dans la catégorie suivante (cohortes d'âge). Cependant, l'exploitant peut aussi durant l'année acheter ou vendre des animaux, paramètres pris en compte par le modèle. Une fois l'effectif déterminé par catégorie pour chaque unité de temps (15 jours), l'utilisateur communique les périodes de stabulation dans un agenda. Une fois cette dernière information fournie, l'effectif de chaque catégorie sera automatiquement calculé en précisant spécifiquement les périodes de pâture ou de stabulation.

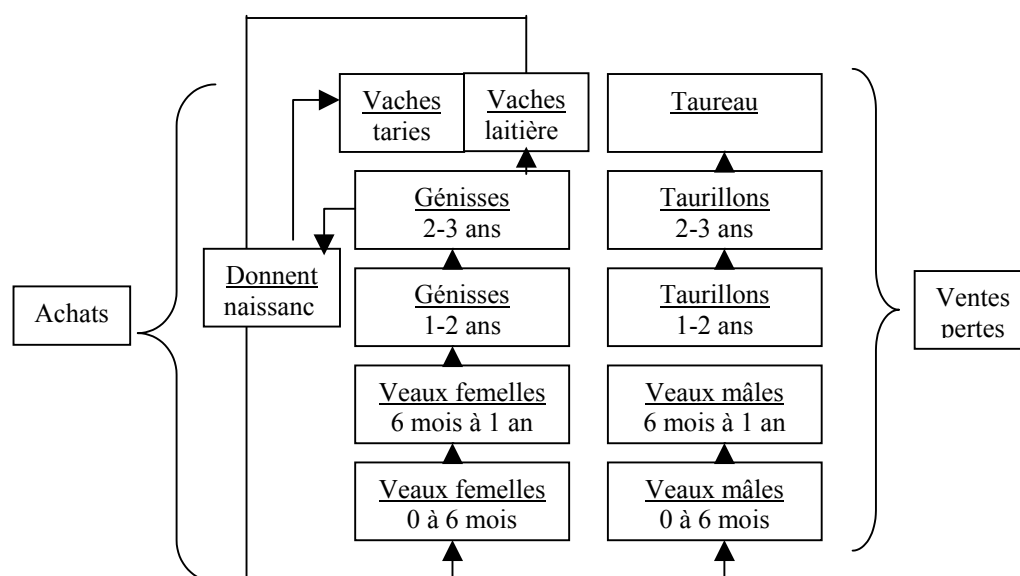


Figure 11 - Module effectif des troupeaux

### ➤ **Module 3 - Pâture**

L'exploitant peut partager son exploitation en plusieurs parcelles, toutes gérées par des pratiques agricoles différentes, que ce soit par le niveau de chargement en animaux, les apports d'engrais, ou l'intensité des coupes. Le module "Pâture" permet de prendre en compte la variété de cette typologie prairiale prise en compte par PASIM et de calculer les variations saisonnières des surfaces prairiales (définies selon la typologie du 1<sup>er</sup> module) et la variation du chargement animal associé.

### ➤ **Module 4 - Stabulation**

Les animaux en stabulation produisent des déjections animales sous forme de fumier, lisier ou purin, sources de gaz méthane lors des fermentations dues au périodes de stockage. Pour chaque type de stabulation, les quantités de déjections sont calculées et cumulées selon les différentes catégories d'animaux.

### ➤ **Module 5 - Coupe et fertilisation**

Dans ce module, l'utilisateur donne les dates de fertilisation avec les quantités d'engrais azotés apportées pour chaque parcelle définie dans le module "Pâture". Il informe aussi des dates de coupe et du rendement récolté. Ce module permettra d'estimer à l'aide de PASIM les variations des émissions /absorption de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub> par type de prairie définie.

### ➤ **Module 6 - Cultures**

Dans ce module, l'utilisateur donne les dates de fertilisation avec les quantités d'engrais azotés apportées pour chaque parcelle définie. Ce module permettra d'estimer à l'aide de PASIM les émissions directes et indirectes de N<sub>2</sub>O par type de parcelle en culture. Les équations IPCC (méthodologie Tier II) sont utilisées dans ce but.

### ➤ **Module 7 - Alimentation**

Ce module renseigne sur les type(s) de fourrage / concentrés et quantités distribuées aux troupeaux au cours des pâtures / stabulations. En utilisant la méthodologie IPCC, ce module permettra d'estimer les émissions de CH<sub>4</sub> issues des fermentations entériques lors des périodes de stabulation.

### ➤ **Module 8 - Gestion des déjections**

Ce module indique le type de salle de traite de l'exploitation et le(s) type(s) de stockages, traitements et évacuations des déjections animales produites en période de stabulation. Il permet d'estimer les émissions de N<sub>2</sub>O & CH<sub>4</sub> liées au stockage et traitements de ces déjections.

### ➤ **Module 9 - Consommation énergétique**

Ce module propose une méthodologie pour estimer la quantité d'énergie fossile consommée directement sur la ferme (utilisation d'engins agricoles). Il permet de calculer les émissions directes de CO<sub>2</sub> liées à la combustion d'énergies fossiles dans la ferme.

## 3.2.4. - Modélisation du bilan de gaz à effet de serre à l'échelle régionale

### 3.2.4.1. - Couplage des modèles PASIM et ORCHIDEE

Une démarche de couplage entre modèles a été entreprise afin de disposer d'un outil permettant de réaliser de premières simulations du bilan de gaz à effet de serre des prairies françaises et européennes. Le modèle ORCHIDEE développé par le LSCE a été couplé au modèle d'écosystème prairial PASIM (Figure 12).

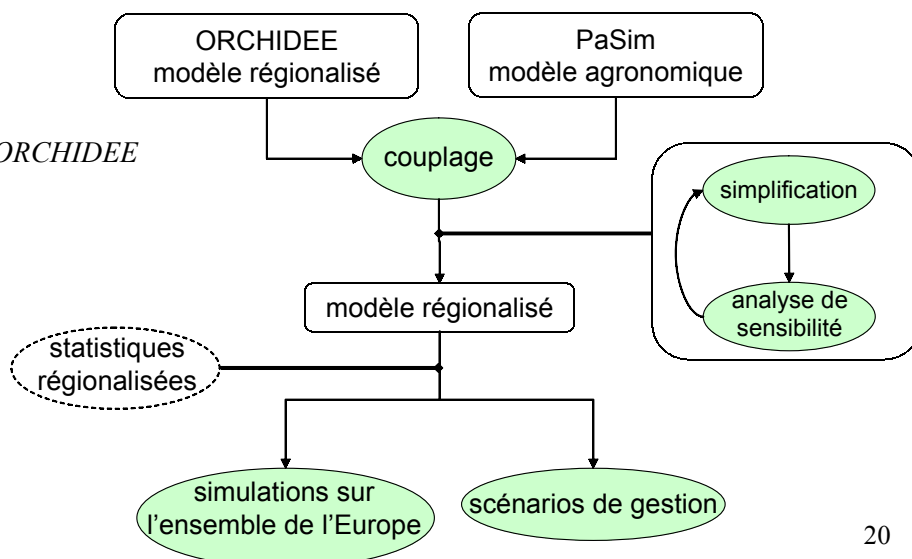


Figure 12 - Couplage PASIM et ORCHIDEE

La stratégie de couplage a consisté à forcer le modèle ORCHIDEE par l'indice foliaire (LAI) prédit par le modèle agronomique PASIM. De plus, la teneur en azote des feuilles a également été forcée par le modèle PASIM. On a ainsi pu établir une bonne concordance entre les assimilations nettes photosynthétiques et les bilans d'énergie prédits par ces deux modèles.

Toutefois, des difficultés informatiques liées aux différences de langage entre les deux modèles ne permettaient pas jusqu'en 2004 d'envisager un couplage direct des deux codes. Le nouveau code de PASIM sous FORTRAN 90 est maintenant compatible avec ORCHIDEE, ce qui permettra de coupler étroitement les deux modèles à l'avenir. Les simulations à l'échelle régionale ont donc été réalisées directement avec PASIM.

### **3.2.4.2. - Données d'entrée pour les simulations régionales**

Ces données sont résumées dans le Tableau 1. Les simulations sont réalisées sur l'Europe avec une maille de 10°. Seules les zones pour lesquelles les prairies occupent plus de 10 % de la superficie de la maille sont simulées. Les données climatiques ont été générées par le projet européen ATEAM avec une climatologie mensuelle pour chaque maille. Les données de sol sont, pour l'instant, celles de la base de données FAO.

La carte de végétation CORINE Land Cover a été utilisée pour définir les zones de prairies. Pour chacune des mailles, le modèle a d'abord été amené à proximité d'un état d'équilibre, en simulant en boucle une même année type. Cette mise à l'équilibre du modèle permet d'éviter que les compartiments de la matière organique du sol (dont il est impossible de connaître la valeur à l'échelle de l'Europe) ne génèrent des flux importants correspondant à une initialisation arbitraire et peu réaliste au regard des conditions locales de sol et de climat.

Il faut souligner que l'on fait ici implicitement une hypothèse qui conditionne en partie les résultats de la simulation : on suppose en effet que les prairies ont été gérées de la même manière pendant un nombre suffisant d'années pour qu'un équilibre des compartiments organiques du sol ait pu être atteint.

La disponibilité de données concernant les types de prairies et les modes de gestion de la prairie (fertilisation minérale et organique, dates et modalités des récoltes ou du pâturage) s'est avérée être sévèrement limitante tant en France qu'en Europe. A terme, il devrait être possible d'utiliser des données issues des statistiques européennes et concernant les systèmes d'élevage (projet européen ELPEN, European Livestock Typology), afin de préciser pour chaque système d'élevage les types de prairie, les quantités d'engrais apportées et les modes de fauche et de pâturage.

A défaut, nous avons pour l'instant conduit une analyse de sensibilité en simulant le bilan de GES des prairies européennes dans des conditions théoriques, qui sont générées par le modèle lui-même. En répétant des simulations pour des conditions successives de fertilisation croissante, on peut calculer pour chaque maille la quantité d'azote minéral qui est nécessaire pour maximiser la croissance aérienne de la prairie. On simule alors sous cette hypothèse d'un apport d'azote optimal le bilan de gaz à effet de serre de la prairie soit en fauche, soit en pâturage.

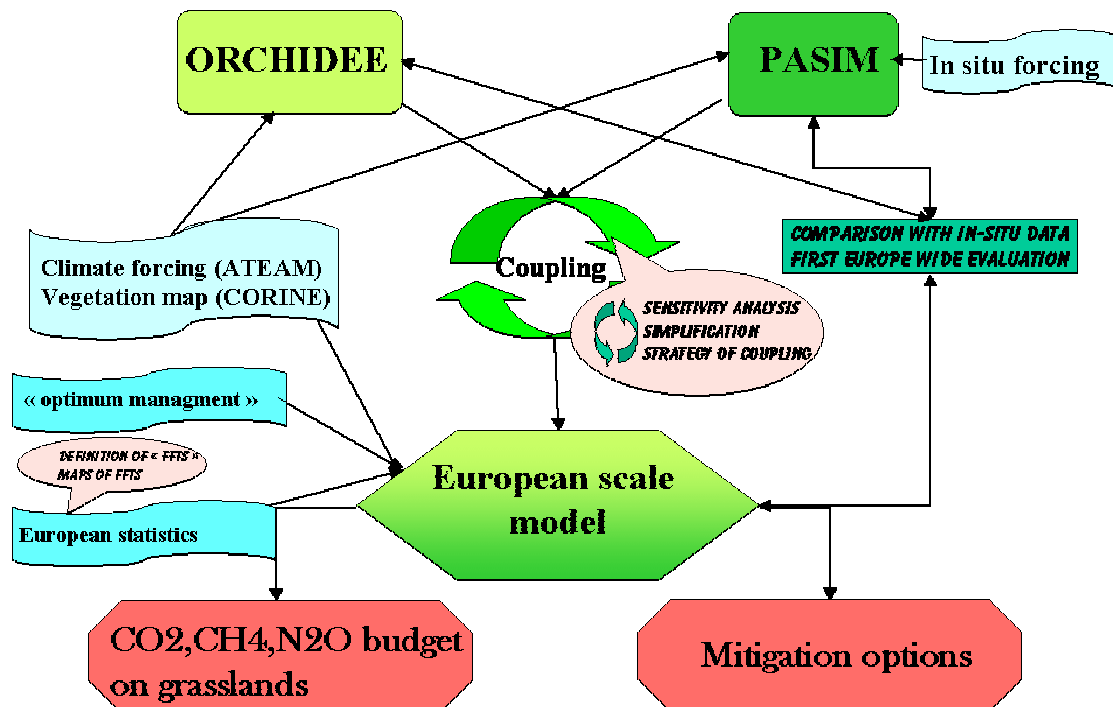
Dans le cas de la fauche, des dates de coupe fixes ont été choisies : quatre fauches (15/05, 01/07, 15/08 et 15/10). Dans le cas du pâturage, on a réalisé des simulations pour des chargements animaux (bovins) croissants de manière à calculer un chargement d'équilibre, pour lequel la production d'herbe est utilisée de manière optimale par les ruminants. Cette mise à l'équilibre a été réalisée toutes les semaines.

Enfin, un dernier jeu de simulations a été réalisé en choisissant un mode d'exploitation mixte, combinant fauche et pâture. La proportion de fourrage récoltée par la fauche a alors été calculée en fonction des besoins en énergie durant la période hivernale pour l'entretien des ruminants en stabulation. Cette routine tient également compte de la durée de la période de pâturage, durée qui est elle-même fonction du climat de la maille.

Cette méthodologie a donc permis de générer des prédictions du bilan de GES pour les régions d'Europe où la prairie a une place significative, en considérant des scénarios théoriques de fauche, de pâture et d'utilisation mixte fauche-pâture et ce en supposant un apport d'azote non limitant pour la croissance de la prairie. Ces simulations approchent donc le bilan de GES pour la gestion la plus intensive qui soit autorisée par les conditions pédo-climatiques locales (Figure 13).

**Tableau 1 - Sources des données utilisées pour les simulations régionales**

<b>Couvert végétal</b>	Carte CORINE ; 44 types de vegetation; résolution de 250m basée sur l'analyse par LANDSAT/SPOT
<b>Données climatiques</b>	ATEAM, 10' de résolution - données mensuelles et CRU 1900 – 2000 anomalies mensuelles Paramètres manquants– ERA 15 climatologie ERA15 années 1993 pour simuler la variabilité
<b>Sols</b>	Base de données du JRC et FAO



**Figure 13 - Méthodologie pour la modélisation du bilan de gaz à effet de serre à l'échelle régionale**

## 4. Résultats

### 4.1. - Bilan des flux de GES à l'échelle de la parcelle

#### 4.1.1. – Climat et teneur en eau du sol pendant la période de mesures

La sécheresse de l'été 2003 a été d'une moindre ampleur à Laqueuille (versant Ouest du Massif-Central) que dans les régions de plaine. Le cumul annuel des précipitations a diminué de 10 % environ en 2003 par rapport à 2002 (total 2002: 1100 mm; total 2003: 1010 mm). La teneur en eau du sol (teneur en eau volumique) a diminué en dessous de 0,3, en Août 2003, alors qu'elle était proche de 0,4 lors de la même période l'année précédente. La différenciation des traitements de pâturage s'est traduite par une teneur en eau du sol plus élevée dans le traitement extensif durant la première année de mesures. Cet effet n'a pas été observé au cours de la seconde année, qui était également plus sèche (Figure 14).

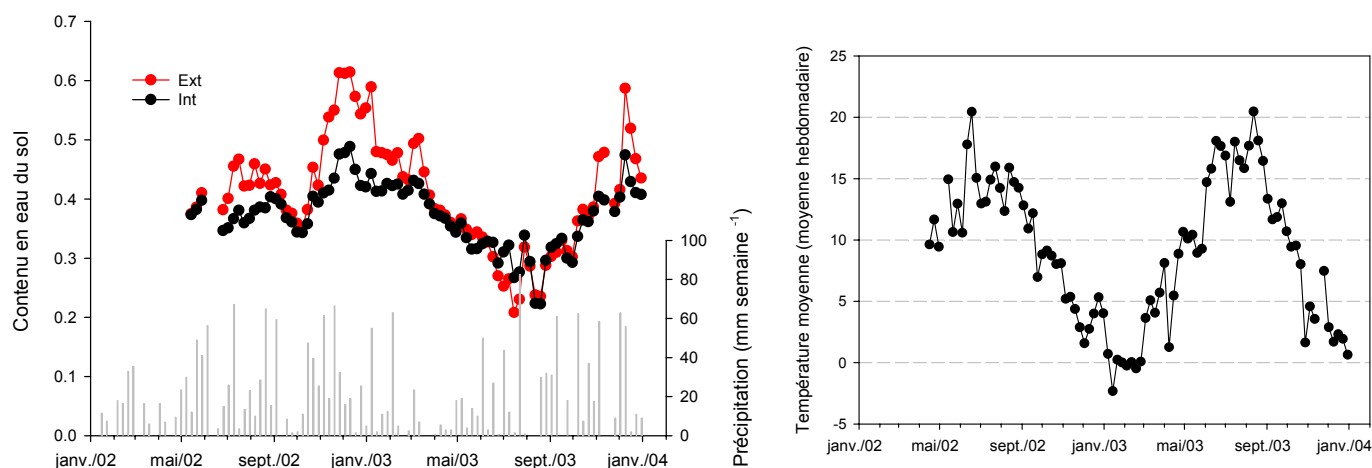
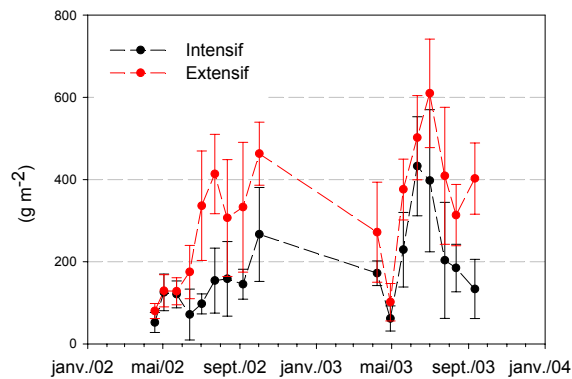


Figure 14 – Pluviométrie moyenne

#### 4.1.2. - Biomasse aérienne et nutrition azotée

Dans le traitement extensif, la réduction de l'intensité de pâturage sur la parcelle a été accompagnée d'un arrêt de la fertilisation. En revanche, dans le traitement intensif, un apport d'azote minéral de 160 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> (trois apports: Mai, Juillet et Août) a été réalisé, de même qu'une fertilisation P,K en début de saison de végétation (50 kg P ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> ; 75 kg K ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> en Mai). Comme l'indice de nutrition azotée (Lemaire et Gastal, 1997) des deux traitements était similaire (résultats non présentés) on peut conclure que les deux traitements ne différaient que par la pression de pâturage et non par des disponibilités contrastées en azote. Ce résultat est confirmé par le fait que la vitesse de croissance de l'herbe, mesurée sous cage toutes les trois semaines, était similaire dans les deux traitements (résultats non présentés) à l'exception de deux dates sur les deux ans de mesure.

La différence d'accumulation de biomasse aérienne dans les deux traitements (Figure 15) proviendrait donc presque exclusivement du contraste de pression de pâturage et non de variations des conditions de croissance de l'herbe.



**Figure 15** - Biomasse végétale aérienne sur pied au cours des années 2002 et 2003 pour les parcelles intensive et extensive

### 4.1.3. - Flux de CO<sub>2</sub>

#### 4.1.3.1. - Méthodologie de calcul des flux de CO<sub>2</sub>

Les diverses adaptations méthodologiques réalisées au cours de l'année 2002 ont permis une nette optimisation des mesures de flux par la méthode des fluctuations turbulentes. En effet le choix d'une hauteur de mat de mesure à 2 mètres a permis de maximiser la proportion de flux mesurés provenant des parcelles étudiées. Ceci a été montré grâce au calcul des empreintes de mesure (*via* un modèle théorique développé par Schmid et Lloyd, 1999 et modifié par Aubinet et *al.*, 2001). De plus, les améliorations techniques réalisées sur le site et en particulier la possibilité de vérifier l'état de fonctionnement du système à distance, ont permis de limiter au maximum la perte de données. Les données manquantes proviennent essentiellement de conditions météorologiques défavorables pour les anémomètres soniques et l'IRGA (pluie et condition de vents défavorables en particulier).

#### 4.1.3.2. – Données manquantes

D'Avril 2002 à Mai 2003, les données ont été acquises durant 79,8 et 69,6 % du temps sur les parcelles extensives et intensives, respectivement. Ces pourcentages ont augmenté durant la seconde année de mesure. Un premier traitement des données par le logiciel EdiRe a été effectué. Les données ont ensuite été filtrées et analysées par différentes procédures, qui correspondent à celles retenues dans les projets européens 'GreenGrass' et 'CarboEurope'.

#### 4.1.3.3. - Filtrage des flux de CO<sub>2</sub>

Ces procédures comprennent notamment une élimination :

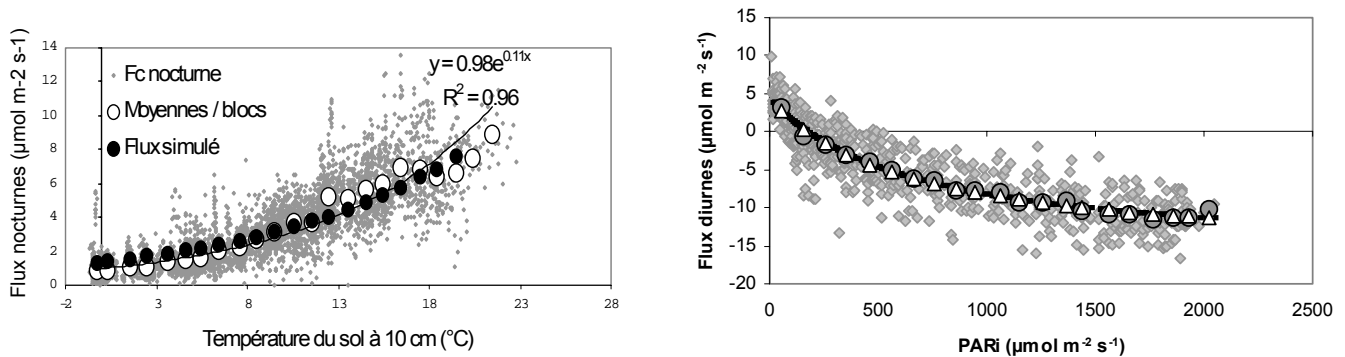
- des données aberrantes (pics instantanés de CO<sub>2</sub> par temps de pluie);
- des données obtenues pour des valeurs de U\* (indicateur de stabilité de la couche d'air) inférieures à 0,8 m s<sup>-1</sup>. Dans ces conditions de forte stabilité de l'air, l'on observe un artefact de diminution de la respiration nocturne calculée. Sur le site de Laqueuille, qui est bien venté, ces conditions sont absentes le jour et ne représentent que 20 % du temps de mesure la nuit.

#### 4.1.3.4. – Interpolation des données manquantes

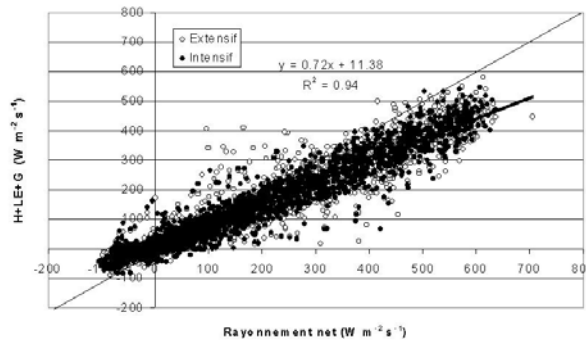
Après filtrage, les données restantes concernaient environ 50 % de la période de mesure. Une procédure d'interpolation ('gap-filling' ; Falge et al., 2000) a ensuite été appliquée. Elle consiste à ajuster la réponse au rayonnement des échanges nets diurnes de CO<sub>2</sub> à une hyperbole rectangulaire dont l'ordonnée à l'origine indique la respiration diurne. Les données nocturnes de respiration ont été ajustées selon la méthode du Q<sub>10</sub> à une loi exponentielle.



Pour chaque traitement, ces ajustements ont été réalisés sur les données disponibles par période de un mois. Les données manquantes de flux ont ensuite été recalculées, le jour à partir du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) et la nuit à partir de la température du sol mesurée à 10 cm. Un exemple d'ajustement des données de flux mesurés aux modèles discutés ci-dessus est présenté dans la figure 16.



**Figure 16** - Ajustement des données de flux nocturnes et diurnes à une fonction exponentielle par la méthode du Q10 (flux nocturnes) et à une fonction de type Michaelis-Menten (flux diurnes)



**Figure 17** - Analyse de la fermeture du bilan d'énergie sur les parcelles Intensive et Extensive à Laqueuille en 2002:  $H$  représente le flux de chaleur sensible,  $LE$ , le flux de chaleur latente d'évaporation et  $G$  le stockage de chaleur dans le sol. La somme de ces trois termes est théoriquement égale à l'énergie solaire reçue par la parcelle (Rayonnement net).

#### 4.1.3.5. – Bilan d'énergie

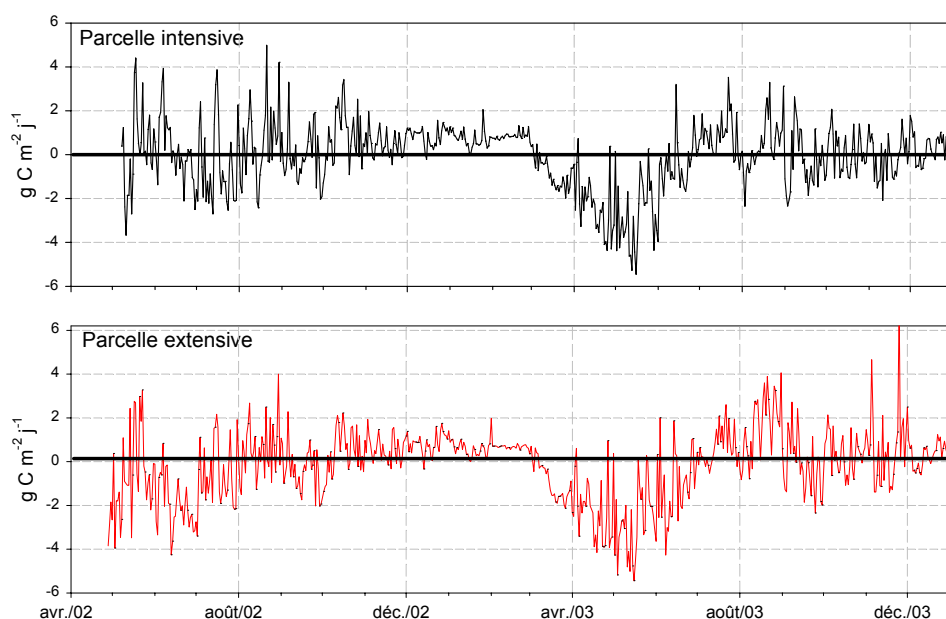
Le calcul du bilan d'énergie du système a été établi à partir des données micro-météorologiques (chaleur latente et chaleur sensible, Figure 17). On observe une corrélation ( $r^2=0,94$ ) de bonne qualité entre le bilan calculé et le rayonnement net, ce qui confirme la validité des calculs effectués pour les flux de  $H_2O$  (et par conséquent pour les flux de  $CO_2$ ). Toutefois, comme dans la plupart des sites, le bilan d'énergie est inférieur au rayonnement net, de 30 % environ dans notre cas. Cet écart ne signifie pas pour autant que les flux de  $CO_2$  soient sous-estimés dans la même proportion.

#### 4.1.3.6. - Advection

Les problèmes d'advection sur le site de Laqueuille n'ont pas encore été évalués avec précision. Bien que situé sur un plateau, le terrain n'est pas parfaitement plat. Les pentes maximales atteignent environ  $5^\circ$ . On ne peut donc exclure des écoulements de l'air nocturne dans des conditions de forte stabilité. Toutefois, on peut remarquer que dans ces conditions, (faible  $U^*$ ) les données ont été exclues des calculs lors de l'étape de filtrage.

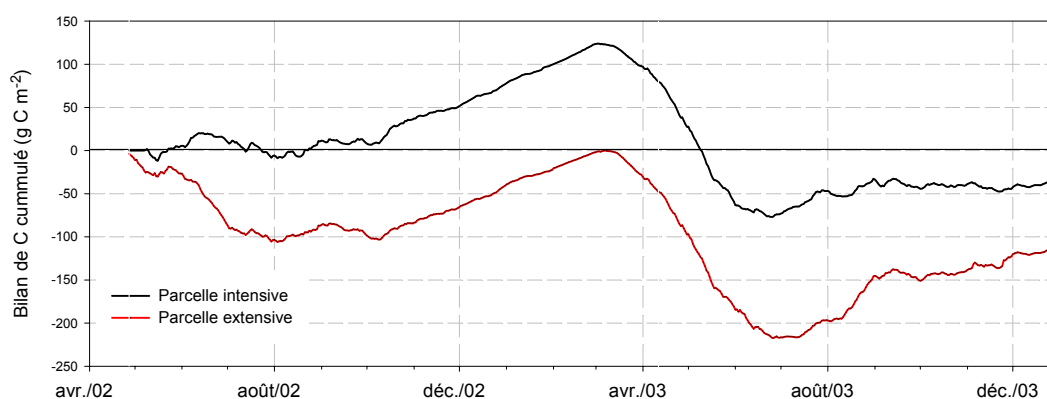
#### 4.1.3.7. - Flux instantanés et cumulés de CO<sub>2</sub>

Sur la période allant de mai 2002 à décembre 2003, les flux de CO<sub>2</sub> ont permis de mettre en évidence des différences marquées entre les deux parcelles (Figure 18).



**Figure 18** - Variation saisonnière des flux de CO<sub>2</sub> (en g C m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>) à Laqueuille sur la période Mai 2002 – Décembre 2003 pour les parcelles intensive et extensive.

Lorsque ces résultats sont exprimés de manière cumulative, les variations saisonnières et entre traitements sont particulièrement apparentes (Figure 19). Les périodes printanière et estivale se caractérisent par une très forte accumulation de C dans le système, principalement sous forme de biomasse végétale, du fait de flux nets largement dominés par la photosynthèse. Inversement, à l'automne et en hiver, la baisse des températures et du rayonnement réduit puis stoppent l'activité assimilatrice du couvert et les flux nets sont dominés par la respiration des végétaux et celle du sol.



**Figure 19** - Bilan cumulé de carbone (g C m<sup>-2</sup>) depuis mai 2002 sur les parcelles intensive et extensive du site de Laqueuille.

L'observation de l'état du bilan de C au bout d'un an, fin avril 2003, permet de comparer les deux parcelles après une saison complète de végétation. A cette date, le bilan de la parcelle extensive est fortement négatif, mettant en évidence un stockage de l'ordre de 90g C m<sup>-2</sup>. A l'inverse sur cette même période, un flux net positif de C à été mesuré sur la parcelle intensive, correspondant donc à un déstockage de carbone (45g C m<sup>-2</sup>).

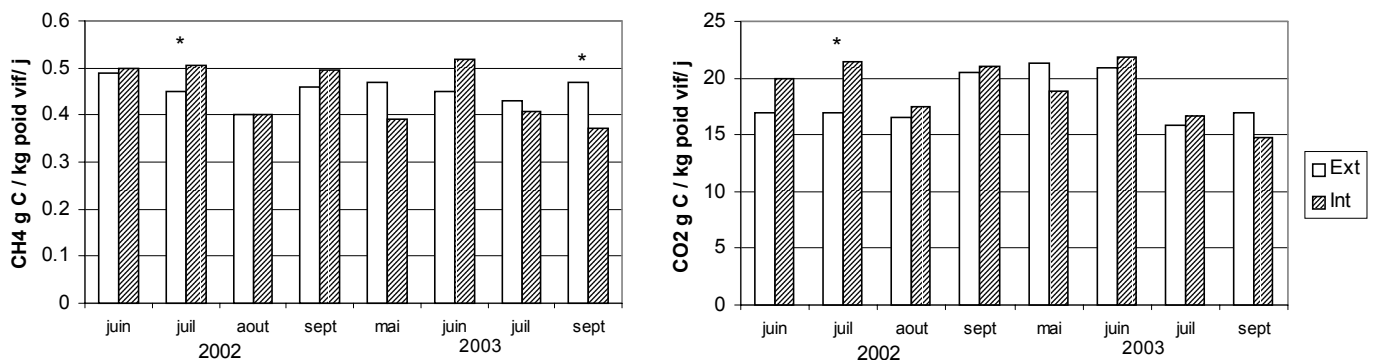
Le bilan de C en prairie est donc assez nettement affecté par l'intensité de pâturage à même état de nutrition azotée des deux parcelles. Il reste à ce stade difficile de préciser dans quel(s) compartiment(s) le C supplémentaire stocké dans la parcelle extensive est localisé (matière organique du sol, biomasse végétale ?). Ceci revêt une importance majeure dans la mesure où le temps de résidence du C dans ces différents compartiments est fortement variable et influe donc sur la capacité réelle de la prairie à stocker de manière durable du carbone.

Néanmoins, la comparaison du bilan cumulé de carbone et de la biomasse aérienne sur pied indique qu'une partie du carbone stocké était accumulée au dessus du sol, dans la végétation herbacée. Dans la parcelle extensive, ce stockage temporaire, particulièrement visible au printemps de la première année, ne s'est toutefois pas accompagné d'un déstockage complet durant l'hiver, malgré une diminution des stocks aériens mesurés, ce qui suggère qu'une partie du carbone a été accumulée dans des compartiments souterrains.

#### 4.1.4. - Emissions de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> par les bovins au pâturage

Les mesures ont été réalisées sur 7 bovins par parcelle à quatre reprises au cours de chacune des deux saisons de pâturage par la technique SF<sub>6</sub> (voir Matériel et Méthodes). En 2002 et 2003, les émissions de méthane des génisses ont été mesurées au pâturage dans les deux traitements (Intensif et Extensif) comparés sur le site de Laqueuille, quatre fois par saison : en Juin, Juillet, Août et Septembre 2002, puis en Juin, Juillet, Août et Septembre 2003.

Exprimées par kg de poids vif des ruminants, les émissions de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> n'étaient pas significativement différentes entre les deux traitements, excepté en Juillet 2002, où les émissions de méthane étaient supérieures pour le traitement de pâturage continu intensif (Figure 20) et en Septembre 2003 où, au contraire, les émissions étaient supérieures pour le traitement extensif.



**Figure 20** - Emissions de CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> par des bovins au cours de la saison 2002 à Laqueuille exprimées en g par jour et par Kg de poids vif.

Ces résultats sont notables, car ils montrent pour la première fois que le pâturage extensif ne s'accompagne pas nécessairement d'un accroissement des émissions de méthane par animal ou par kilogramme de poids vif. Les analyses qui ont été effectuées de la quantité et de la digestibilité de l'herbe pâturée permettent d'interpréter plus finement ces résultats. En 2002, les émissions de méthane étaient étroitement corrélées à la quantité de fibres digestibles (qui est calculée comme le produit des fibres totales, ou NDF, par la digestibilité de ces fibres) ingérée. L'ingéré de fibres digestibles n'était pas affecté par le traitement, malgré une qualité moyenne du fourrage offert plus faible dans le traitement extensif (plus de matériel végétal à forte teneur en fibres).

Grâce à leur capacités de tri au pâturage, les bovins auraient donc maintenu une forte digestibilité de l'herbage ingéré (par opposition à l'herbage offert), ce qui expliquerait que les émissions de méthane ne soient pas accrues dans la parcelle extensive comparée à la parcelle intensive. Chez les ovins, la même conclusion d'un maintien de la qualité de l'ingéré en pâturage extensif (chargement animal par hectare divisé par deux) a été obtenue précédemment (Garcia et al., 2004 J Agr Sci Cam.).

Toutefois, en 2003, la corrélation entre les émissions de méthane par animal et la quantité de fibres digestibles ingérées ne rendait compte que de 5% de la variance totale des émissions de méthane. (résultats non présentés). Pour cette année, un autre modèle statistique rendait mieux compte des résultats:

$$\text{Méthane par animal (g j}^{-1}\text{)} = 255.3 + 10.4 \text{ ADFI} - 1.4 \text{ DNDF}, n=54, r^2 = 0.35$$

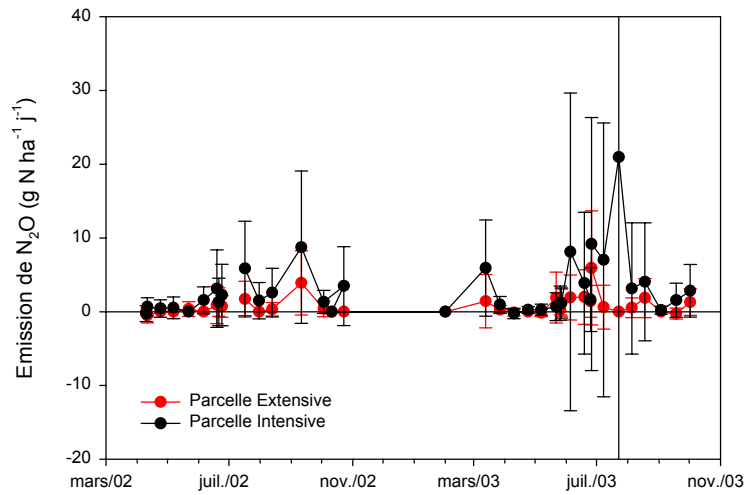
Selon ce modèle, qui est en cours d'évaluation pour l'année 2002 l'émission de méthane liée à la fermentation entérique s'explique par la quantité de cellulose et de lignine (ADF, Acid Detergent Fibers) ingérée, pondérée par la digestibilité des fibres totales. Des comparaisons avec les résultats obtenus dans d'autres sites du projet européen GreenGrass sont en cours, afin de déterminer quel est la meilleure équation de prédiction des émissions digestives de méthane par des ruminants au pâturage en fonction de la quantité et de la qualité de la ration ingérée.

Une autre conclusion importante de ce travail concerne la réévaluation du poids de la respiration des herbivores, par rapport à celui du méthane éructé. En effet, si l'on tient compte du pouvoir de réchauffement global du méthane, par rapport à celui du CO<sub>2</sub>, on observe que la respiration des herbivores contribue plus que la fermentation entérique à l'émission de gaz à effet de serre par animal: par kilogramme de poids vif, la moyenne des émissions de méthane représente 3,6 g C-CO<sub>2</sub> alors que la respiration atteint en moyenne 17 gCO<sub>2</sub> par kg de poids vif.

Les dépenses respiratoires des bovins au pâturage sont plus élevées qu'en stabulation, du fait de la dépense supplémentaire d'énergie engendrée par les déplacements, par la préhension de l'herbe et, enfin, par la thermorégulation. Dans ces conditions, la respiration des ruminants constitue donc une part importante de leur contribution au bilan de gaz à effet de serre de la parcelle. Il faut observer que la méthode des fluctuations turbulentes permet de mesurer la respiration totale de l'écosystème (dont celle des herbivores). Le bilan de CO<sub>2</sub> présenté précédemment intègre par conséquent cette composante de la productivité nette du biome prairial.

#### **4.1.5. - Mesure des émissions de N<sub>2</sub>O**

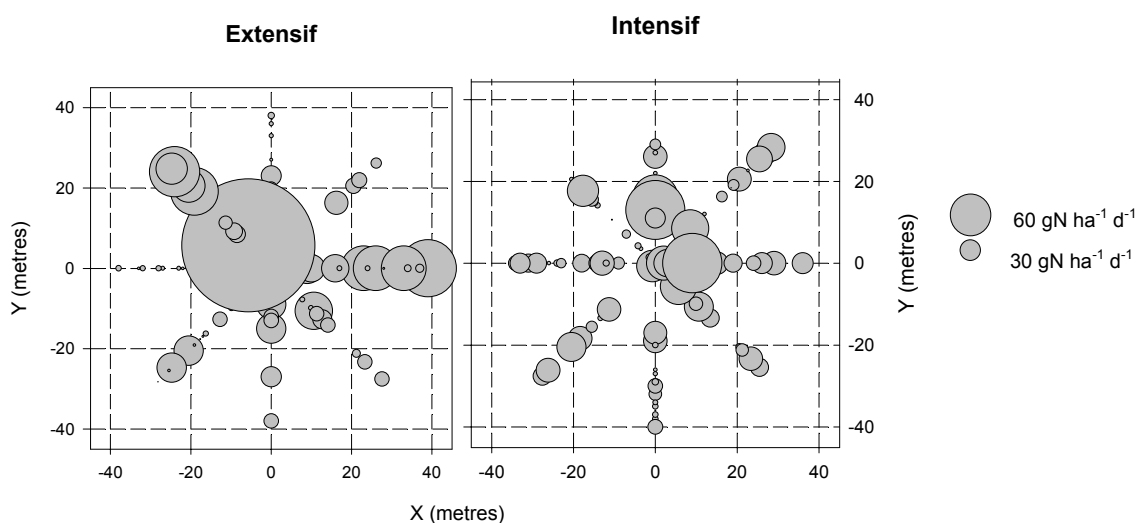
Les mesures de flux de N<sub>2</sub>O en 2002 et 2003 ont permis de mettre en évidence une forte variabilité saisonnière des émissions avec des valeurs maximales obtenues en fin de saison végétative (Figure 21). L'apport d'engrais (80 kg d'azote) sur la parcelle intensive fin Juin 2002 a provoqué un autre pic d'émission en Juillet. Même si les émissions de N<sub>2</sub>O ont été supérieures dans le traitement intensif, elles sont restées faibles en comparaison avec d'autres situations agronomiques. La forte variabilité entre répétitions (chaque point est une moyenne des valeurs obtenues à partir de 8 chambres) rend néanmoins difficile la comparaison entre les traitements.



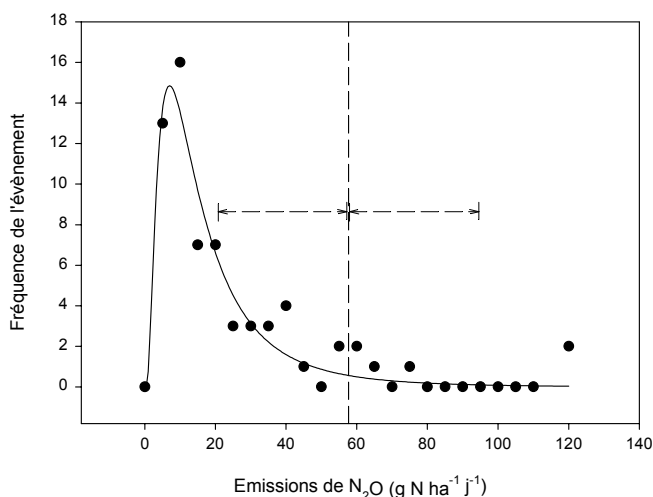
**Figure 21** - Evolution saisonnière des émissions de  $N_2O$  sur les parcelles Intensives et Extensives à Laqueuille en 2002 et 2003

Des corrélations peu significatives ont été observées entre le flux de  $N_2O$  et les variables d'environnement (température du sol à -5 cm ; humidité pondérale et teneur pondérale en azote nitrique du sol) qui étaient enregistrées à chaque mesure et pour chaque chambre. De même, en 2003, les corrélations obtenues entre flux de  $N_2O$  mesurés par TDL et teneur en nitrate (estimée par des résines anioniques) ou en eau du sol ont également été faibles. Par conséquent, les flux instantanés et locaux de  $N_2O$  demeurent difficiles à prédire dans nos conditions expérimentales.

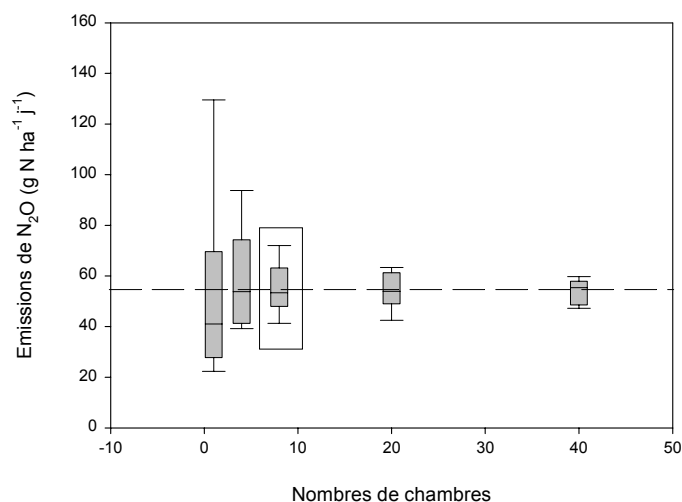
L'origine de la variabilité entre répétitions a été appréhendée de manière plus fine lors de campagnes intensives de mesure des flux de  $N_2O$  réalisées à l'aide de chambres de mesure rapides (mesures en quelques minutes) couplées à une TDL. Ces campagnes de mesures ont été réalisées à deux reprises (Septembre 2002 et Juillet 2003) sur le site de Laqueuille. La figure 22 démontre l'extrême variabilité spatiale des parcelles pâturées qui s'ajoute à la variabilité saisonnière discutée plus haut. Néanmoins, les valeurs moyennes mesurées d'émissions de  $N_2O$  par la méthode des chambres rapides sont comparables avec celles obtenues à l'aide des chambres fixes à la même période. L'estimation obtenue, tout au cours de l'année avec ces chambres fixes serait donc relativement robuste.



**Figure 22** - Distribution des flux de  $N_2O$  mesurés par la technique des chambres à réponse rapide couplées à la TDL sur la parcelle extensive en Juillet 2003



**Figure 23** - Fréquence de mesure d'émission de  $N_2O$  en 2003 sur la parcelle extensive mesurée avec les chambres de mesure rapide. Les données suivent une distribution log-normale. La barre verticale représente la moyenne  $\pm$  écart type.

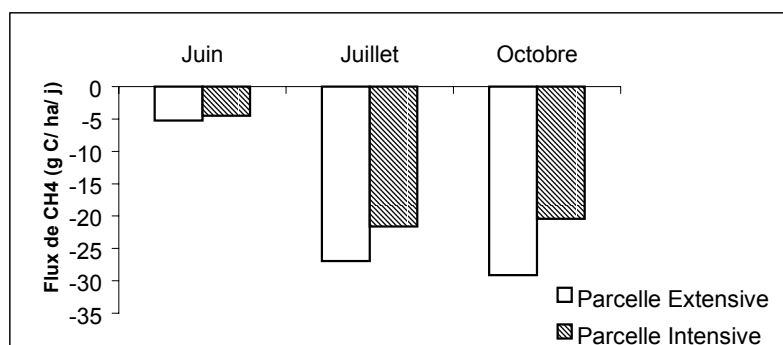


**Figure 24** - Représentation graphique de la variabilité de 20 répétitions de mesures (tirées au hasard dans la distribution de la figure 17) de  $N_2O$  pour un nombre de chambres variable. La variabilité calculée pour 8 chambres de mesures est encadrée.

La figure 23 démontre clairement que la variabilité spatiale des flux de  $N_2O$  s'ajuste à une loi de type "log-normale", distribution classique pour ce type de phénomènes spatialisés mais qui pose néanmoins la question du nombre de répétitions nécessaire afin d'estimer la valeur moyenne des émissions. En effet, la forme de la courbe traduit le fait que pour un nombre de répétitions limitées, la probabilité est forte de ne pas mesurer de valeur fortes d'émission et donc, de sous-estimer le flux moyen ce qui, dans notre cas pourrait traduire le fait que nos mesures d'émissions de  $N_2O$  avec 8 chambres fixes par parcelle fournit une valeur largement sous-estimée. Cependant la figure 24 montre l'influence du nombre de répétitions sur la variabilité de l'estimation des flux et celle-ci est relativement fiable pour 8 répétitions par parcelles et de ce fait les mesures faites tout au long de l'année avec les chambres statiques semblent être un estimateur peu biaisé des émissions de  $N_2O$ .

#### 4.1.6. - Mesure de l'oxydation de $CH_4$ par le sol

En prairie pâturée, le méthane ( $CH_4$ ) est émis par les ruminants. Cependant les sols prairiaux sont capables dans une certaine mesure d'oxyder le méthane de l'air ambiant en  $CO_2$  et donc de diminuer sensiblement la participation de ce gaz au bilan GES des prairies. L'évolution de la teneur en  $CH_4$  dans les chambres fixes (utilisées pour les mesures d'émission de  $N_2O$ ) permettent de mesurer ce flux d'oxydation. Ceci a pu être réalisé à trois reprises au cours de la saison de végétation 2003 (Figure 25).

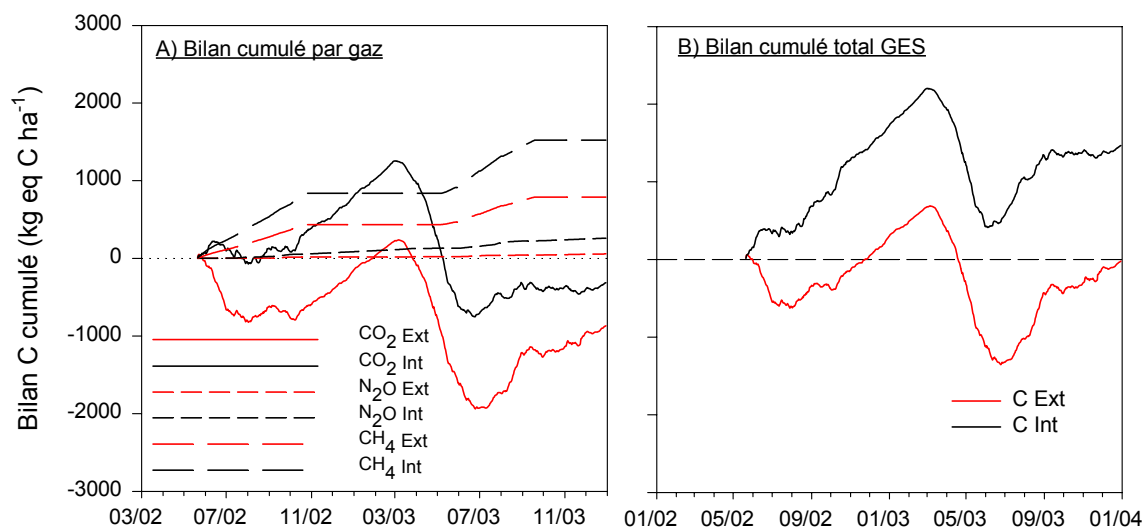


**Figure 25** – Oxydation de  $CH_4$  par le sol dans les parcelles extensive et intensive au cours de l'année 2003

Les valeurs moyennes de ces flux d'oxydation de CH<sub>4</sub> qui sont de l'ordre de 15-20 g C. ha<sup>-1</sup> j<sup>-1</sup> sont à comparer aux émissions de CH<sub>4</sub> par les ruminants. Exprimées, elles aussi par unité de surface elles atteignent environ 600 g C ha<sup>-1</sup> j<sup>-1</sup>. Il est donc important de noter qu'en prairie pâturée, les émissions de CH<sub>4</sub> par les ruminants sont environ 30 fois plus élevées que les flux d'oxydation par le sol. Puisque le CH<sub>4</sub> oxydé par le sol est émis à nouveau sous forme de CO<sub>2</sub>, cette émission est prise en compte par la méthode des fluctuations turbulentes.

#### 4.1.7. – Bilan des GES en prairie pâturée

La figure 26 montre clairement la faible participation des émissions de N<sub>2</sub>O dans le bilan total des émissions de GES dans nos deux parcelles. A l'inverse, les émissions de CH<sub>4</sub> par les ruminants pendant la période de pâturage (Mai à Octobre) participent de manière non négligeable au bilan total. Ces émissions de CH<sub>4</sub> étant contrôlées presque exclusivement par le chargement en animaux, qui est somme toute relativement constant au cours de la saison de pâturage, elles ne modifient qu'à la marge le schéma de variation saisonnière des émissions de GES. L'oxydation du méthane intervient peu dans le bilan puisqu'elle est pratiquement négligeable par rapport à l'émission cumulée des ruminants.



**Figure 26** - Bilan net des émissions cumulées A) des trois gaz à effet de serre B) du total GES des parcelles intensives et extensives (t eq.C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>)

La forte variabilité saisonnière induite par l'alternance de période de stockage et d'émissions de CO<sub>2</sub> du fait des changements d'état de la végétation implique certaines précautions lorsque l'on essaye de dresser un bilan annuel des GES. En effet, il s'agit de calculer ce bilan sur un cycle annuel complet afin de prendre en compte les variations saisonnières des stocks de C. Le tableau 2 présente un tel calcul pour la période après le début des deux traitements, de Mai 2002 à Mai 2003, seule période annuelle complète disponible dans l'immédiat.

**Tableau 2** - Bilan en équivalent CO<sub>2</sub> des échanges de gaz à effet de serre des parcelles intensive et extensive du site de Laqueuille entre Mai 2002 et Mai 2003.

Bilan par gaz en équivalent C-CO <sub>2</sub> (kg C ha <sup>-1</sup> )	Intensif	Extensif
CO <sub>2</sub>	-376	-1395
N <sub>2</sub> O	130	20
CH <sub>4</sub>	887	456
<b>Bilan</b>	<b>641</b>	<b>-919</b>

Les flux de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O ont été convertis en équivalent C-CO<sub>2</sub> en tenant compte du pouvoir relatif de réchauffement global sur un horizon de 100 ans du N<sub>2</sub>O et du CH<sub>4</sub> et des masses molaires de ces gaz. En bilan annuel, la parcelle intensive démontre une activité de source de GES très nette (de l'ordre de 0,64 t équivalent C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>). A l'inverse, la parcelle extensive montre une activité de puits de -0,92 t équivalent C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>. Il semble, au vue de la figure 25 que le bilan GES sur la période (encore incomplète) Mai 2003-Mai 2004 s'oriente vers une légère augmentation de la force de puits des deux parcelles. Néanmoins, il paraît fort peu probable que cela permette à la parcelle intensive de se transformer en un puits net de GES.

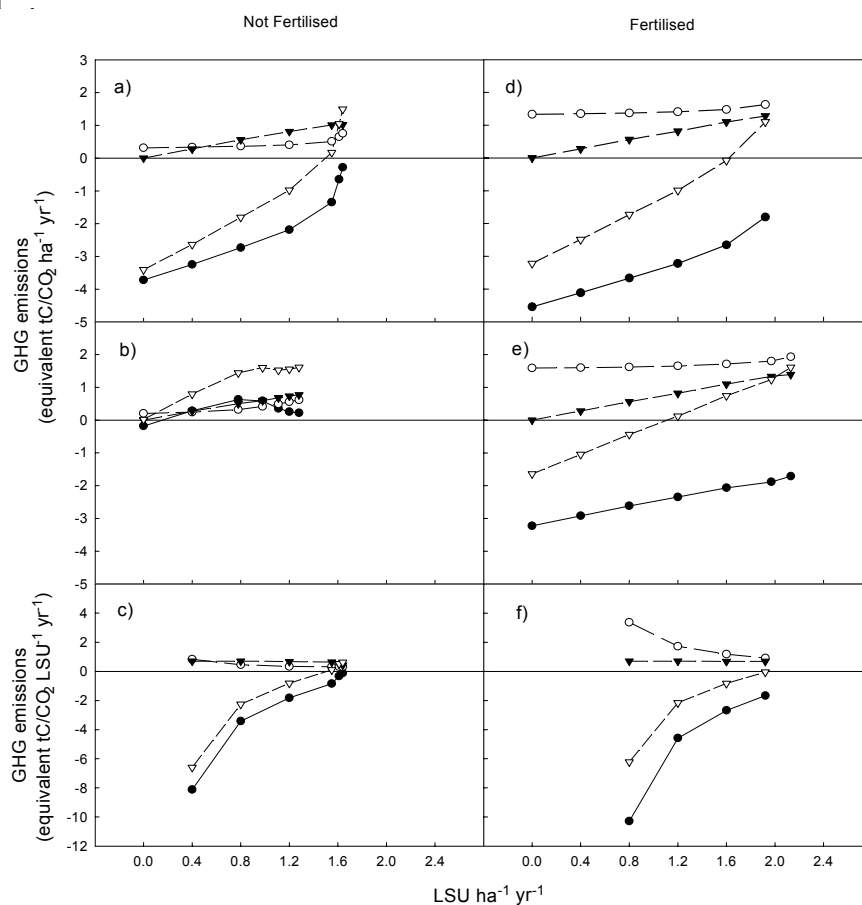
De manière plus générale, ce tableau démontre clairement l'intérêt de mesurer de manière conjointe les échanges nets des différents GES. Ceci est principalement vrai dans un système pâturé ou une grande partie du C stocké dans la biomasse végétale est prélevé par les animaux entraînant ainsi une forte production de méthane. De la même manière, la figure 25 illustre la nécessité de mesurer de manière continue les échanges de GES et du CO<sub>2</sub> en particulier si l'on veut accéder à des bilans fiables d'émissions de GES intégrant les variations saisonnières des flux.



## 4.2. - Simulation des émissions nettes de GES par l'écosystème prairial

### 4.2.1 - Simulation de la sensibilité des flux de GES aux variables de gestion de la prairie (azote et chargement animal au pâturage)

Le modèle a été amené à l'équilibre grâce aux données de climat et de sol obtenues sur le site de Laqueuille, en considérant une gestion typique de la prairie pour ce site : 4 coupes par an, apports d'engrais N inorganique ( $150 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , fractionné en trois parts égales) et apports d'engrais organique ( $50 \text{ kg N ha}^{-1}$  en Mars). Les mêmes données météorologiques étaient utilisées en boucle afin d'éliminer la variabilité climatique inter-annuelle sur les données de sortie. A la fin de la période d'équilibre, le bilan d'émission de GES présentait un stockage de carbone représentant  $3.8 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  et une perte d'azote (denitrification, volatilisation and lessivage) en équivalent C/CO<sub>2</sub> de  $1.6 \text{ tC ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ .



**Figure 27** - Simulation du bilan des émissions nettes de GES en équivalent C-CO<sub>2</sub> pour une prairie permanente soumise à différentes charges de pâturage continu (LSU, exprimé par UGB ou par hectare) pendant la première (a, b, e, f) et la cinquième (c, d) année après le début du pâturage. Deux scénarios de fertilisation étaient considérés : pas de fertilisation (figures de gauche) et  $150 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  (figures de droite). Les émissions étaient exprimées soit en fonction des surfaces de prairie (en  $\text{tC}$  équivalent  $\text{CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ ) (a, b, c, d), soit en fonction du chargement en animaux (en  $\text{tC}$  équivalent  $\text{CO}_2 \text{ UGB}^{-1}$ ) (e, f). Une valeur positive correspondrait à une source de gaz à effet de serre pour l'atmosphère, et à l'inverse, une valeur négative correspondrait à un puits de GES.  
CO<sub>2</sub> (●), N<sub>2</sub>O (◇), CH<sub>4</sub> (▼), bilan d'émission de GES (▽)

A partir de cet état d'équilibre, cinq années de simulation ont été effectuées. A titre d'exemple, nous présentons les résultats de simulations effectuées afin d'évaluer les effets du chargement animal sur les bilans d'émission des différents GES et sur le pouvoir de réchauffement global (PRG) de prairies pâturées en continu durant 5 mois (entre JJ 141 et 192).

Les réponses à un chargement variant entre 0,4 et 2,4 UGB/ha par pas de 0,4 sur une durée de cinq ans ont été simulés avec (150kg N ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> en trois applications) et sans apport d'engrais (Figure 27, UGB, Unité Gros Bétail). Le chargement était réduit lorsque l'ingestion alimentaire (résultant de la quantité d'herbe offerte) n'était pas suffisante pour les animaux (c.a.d. en dessous de 13,5 kg MS UGB<sup>-1</sup> j<sup>-1</sup>). Ainsi, le chargement annuel maximum simulé était toujours inférieur à 2,4 UGB ha<sup>-1</sup> (Figure 27).

Les sorties journalières de simulation obtenues avec PaSim comprenaient : la photosynthèse nette du couvert, la respiration du sol, des plantes et des animaux, les émissions de méthane par les animaux et de N<sub>2</sub>O provenant du sol. Les émissions annuelles nettes de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub> furent calculées à partir de ces données et exprimées en équivalent C-CO<sub>2</sub> émis par unité de surface (Figure 27 A à D) ou par UGB (Figure 27 E, F).

Au cours de la première année de pâturage, avec ou sans engrais, le bilan d'émissions de C (i.e. la productivité nette du biome) pour la prairie simulée était négative, correspondant à un puits de CO<sub>2</sub> par rapport à l'atmosphère (Figure 27 A, B). Cependant, l'importance de ce puits diminuait avec le chargement en bétail alors que les émissions de méthane augmentaient proportionnellement avec le chargement. Les émissions de N<sub>2</sub>O étaient environ deux fois plus fortes avec apport d'engrais mais semblaient peu affectées par le chargement. Le bilan net des émissions simulées de GES (exprimé en équivalent CO<sub>2</sub>) était toujours négatif, correspondant à un puits, au cours de la première année pour des chargements inférieurs à 1.6 UGB ha<sup>-1</sup>.

Après 5 années de pâturage, les émissions simulées de GES présentaient une évolution similaire à la première année dans le cas d'un apport d'engrais. En revanche, en absence de fertilisation, la production de fourrage diminuait fortement et le bilan des émissions de carbone était soit nul, soit positif (Figure 27 C, D). Le bilan net des émissions de GES en équivalent CO<sub>2</sub> était négatif (puits) pour la prairie fertilisée en dessous d'un chargement de 1.2 UGB ha<sup>-1</sup>, mais positif ou nul pour la prairie non fertilisée.

Les flux de GES étaient aussi calculés par unité de gros bétail (UGB) pour la première année de simulation. Les émissions de méthane par UGB, étaient relativement constantes. En revanche, la magnitude des flux de CO<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub>O par UGB diminuait fortement avec le chargement. Ainsi, le bilan des émissions de GES par UGB était proche de l'équilibre pour de fortes valeurs de chargement (Figure 27 E, F).

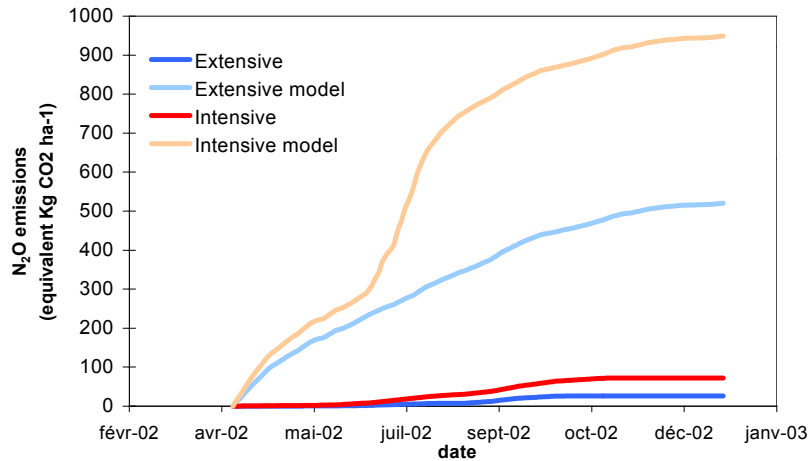
En conclusion, il semble que le bilan des émissions de GES reste faible mais généralement positif (source) quand les données sont exprimées par unité de gros bétail pour de forts chargements, alors qu'il serait possible de garder un bilan négatif (puits) pour de faibles chargements à conditions que les apports d'engrais soient adaptés. Ces simulations sont qualitativement en accord avec le contraste de bilan de GES mesuré sur le site de Laqueuille (Figure 25).

#### **4.2.2. - Evaluation du modèle PASIM sur deux sites expérimentaux**

Le modèle PASIM a été évalué grâce aux données de flux de GES obtenues sur le site de Laqueuille (pâturage continu), ainsi que sur un autre site du projet européen FP5 « GreenGrass », le site suisse de Oensingen (FAL, Zürich, Prof. Juergen Fuehrer et coll.), où la prairie est gérée par la fauche.

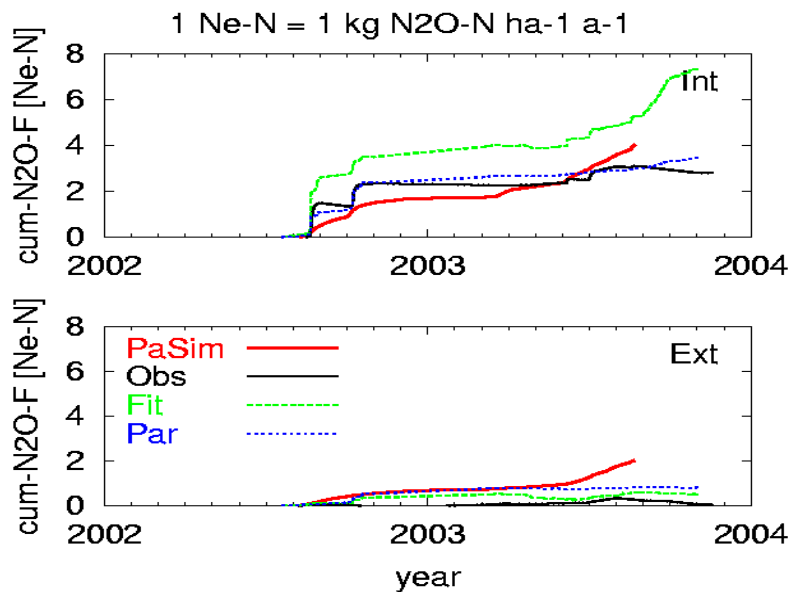
- Emissions de N<sub>2</sub>O

Sur le site de Laqueuille, le modèle surestime fortement les émissions de N<sub>2</sub>O mesurées par la méthode des chambre statiques. En 2002, les émissions mesurées ont atteint 568g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> dans le traitement intensif, alors que les émissions simulées ont atteint 7460 g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>. Ces valeurs correspondent à des coefficients d'émission mesurés et simulés de 0,3 et 5 %, respectivement.

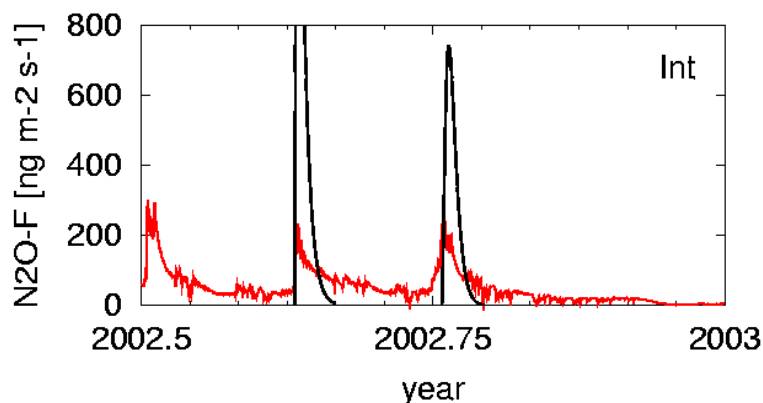


**Figure 28** - Comparaison des flux cumulés de N<sub>2</sub>O, mesurés et simulés par PASIM, sur les parcelles intensives et extensives de Laqueuille en 2002

Sur le site d'Oensingen, les résultats de la simulation sont proches des valeurs mesurées (respectivement, 3 600 et 4 100 g N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>) par la même technique, mais avec des mesures automatisées (plus fréquentes) qui ne sont pas possibles à réaliser en conditions de pâturage continu (Figure 28 et 29). Toutefois, le modèle ne simule pas bien sur ce site les pics de production de N<sub>2</sub>O après fertilisation (Figure 30)



**Figure 29** - Emissions cumulées de N<sub>2</sub>O sur le site expérimental suisse d'Oensingen depuis obtenus par PASIM (courbe en rouge) et de manière expérimentale à l'aide des chambres de mesures (lignes bleues, grises et noires - début des mesures : juillet 2002)

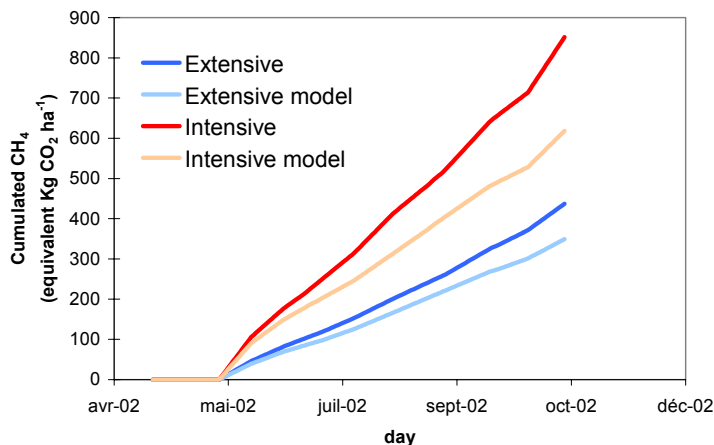


**Figure 30** - Emissions de  $N_2O$  sur le site expérimental suisse d'Oensingen entre juin et août 2002 obtenus par PASIM (courbe en rouge) et de manière expérimentale à l'aide des chambres de mesures (ligne noire : la courbe est un modèle ajusté aux variables discontinues)

Ces résultats montrent qu'il est encore difficile de prédire les émissions de  $N_2O$  à partir d'un modèle mécaniste, même si des ordres de grandeur assez réalistes peuvent être obtenus dans des parcelles fauchées et fertilisées par de l'azote minéral. Les émissions de  $N_2O$  en pâturage continu sont particulièrement difficiles à mesurer, du fait de la très forte variabilité spatiale qui a été démontrée par la méthode des 'fast-box' (cf. Section 4.1.5). Comme l'indique le caractère log-normal de la distribution des émissions, cette variabilité spatiale résulte de la présence d'une faible proportion de zones fortement émettrices. Ces zones sont créées par les déjections animales et surtout par les pissats.

- **Emissions de méthane**

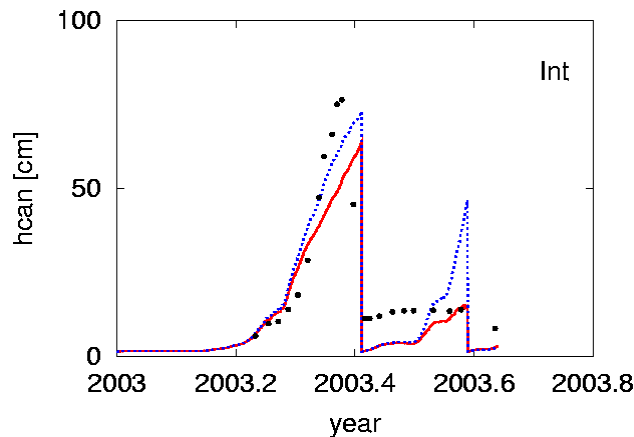
Les émissions de méthane étaient considérées initialement comme constantes (par kg de poids vif) par le modèle PASIM. Ces émissions ont été revues, afin de tenir compte des effets de la qualité de la ration alimentaire. On a ainsi considéré que les émissions dépendaient linéairement de la quantité d'énergie digestible ingérée au pâturage par le ruminant. Toutefois, cette relation sous-estime d'environ 25 % l'émission de méthane cumulée des deux traitements de pâturage. Un meilleur pouvoir de prédiction est obtenu en utilisant une dépendance positive par rapport à la quantité de fibres polymérisées (cellulose et lignine) ingérées (ADFI,  $kg\ animal^{-1}\ jour^{-1}$ ) et une dépendance négative par rapport à la dégradabilité des fibres totales (DNDF, %) (cf. section 4.1.6). Si ce résultat est confirmé sur les autres sites du projet, européen « GreenGrass » qui conduisent des mesures similaires, il sera utile de modifier les équations régissant les émissions de méthane au pâturage dans PASIM, afin d'augmenter le pouvoir de prédiction du modèle (Figure 31).



**Figure 31** - Flux cumulés de  $CH_4$  mesurés en 2002 et simulés par PASIM sur les parcelles intensives et extensives de Laqueuille

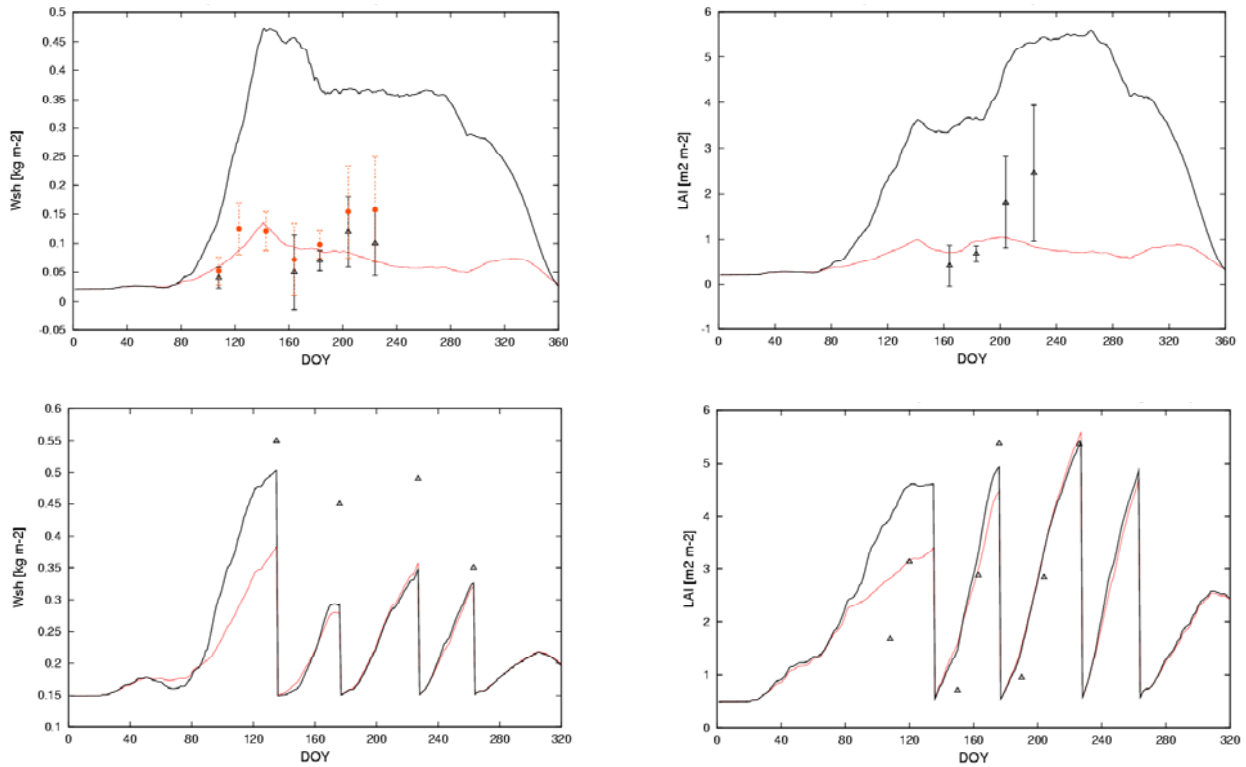
- **Croissance aérienne**

La dynamique de la croissance aérienne en hauteur a été simulée au cours de deux repousses successives sur le site d'Oensingen. La nouvelle version du modèle qui comprend une formulation plus détaillée des effets du stress hydrique sur la plante (augmentation de la sénescence des feuilles et des racines pour des potentiels hydriques bas) rend mieux compte de la réduction de la croissance en hauteur du couvert lors d'une repousse estivale (Figure 32)



**Figure 32** - Evolution de la hauteur de la canopée sur le site expérimental suisse d'Oensingen entre janvier et août 2003: hauteur observée (pointillés), simulée avec la première version de PASIM (3.5 pointillés bleus) et simulée en incluant une nouvelle paramétrisation du modèle sur les effets du stress hydrique sur le turnover des feuilles et des tiges (courbe rouge)

Sur le site de Laqueuille, les améliorations du modèle (dépendance de la sénescence vis-à-vis de l'âge des compartiments aériens) ont également permis de simuler la dynamique de la biomasse aérienne végétale au cours d'une saison de pâturage continu. Au total, les différentes améliorations du modèle ont permis de se rapprocher de la dynamique observée dans les deux sites pour la biomasse des parties aériennes (Figure 33).

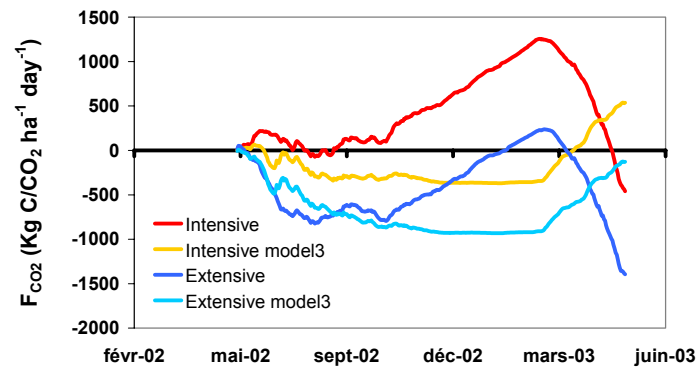


**Figure 34** - Biomasse des parties aériennes ( $W_{shoot}$ ) et indice foliaire (LAI) mesurés (triangles) dans les deux sites (Laqueuille A, B) et Oensingen (C,D) et simulés par l'ancienne (en noir) et la nouvelle (en rouge) version du modèle PASIM.

- **Echanges nets de  $CO_2$  de l'écosystème**

Les échanges nets de  $CO_2$  ont été comparés avec le modèle sur les sites de Laqueuille et d'Oensingen. La dynamique saisonnière est mal reproduite sur le site de Laqueuille qui est pâturé en continu. En particulier, le modèle simule une faible respiration nette de l'écosystème durant la période hivernale, suivie d'un pic de respiration à partir de Mars 2003.

Les mesures indiquent une respiration hivernale importante (déstockage d'environ 1t C ha<sup>-1</sup> d'Octobre à Février), suivie d'un retour au stockage de carbone de l'écosystème dès le mois de Mars. Selon la saison considérée, le modèle sous-estime (en été) ou surestime (en hiver) le stockage net de carbone par l'écosystème. Cette erreur semble provenir d'une mauvaise calibration de l'effet de la température sur la respiration des compartiments du sol et des racines. Une révision de ces équations a été entreprise. On peut toutefois observer que le modèle prédit assez bien l'écart entre les traitements, en montrant un stockage accru de carbone d'environ une tonne par hectare dans le traitement extensif par rapport au traitement intensif (Figure 35).



**Figure 35** - Flux cumulés de CO<sub>2</sub> mesurés sur les parcelles de Laqueuille en 2002, et simulés par la version modifiée de PASIM (Model 3)

En conclusion, un travail important a été réalisé pour améliorer les prédictions du modèle PASIM à l'échelle de la parcelle. Grâce au jeu de données détaillées dont nous disposons, nous avons pu évaluer le modèle bien plus précisément que par le passé (les évaluations publiées du modèle ne portaient que sur la production aérienne de biomasse). De plus, le modèle a été appliqué à des conditions de gestion qui n'avaient pas été testées auparavant (comme le pâturage continu). Même si des progrès significatifs ont été réalisés, les écarts avec les mesures sont encore trop importants et la phase de mise au point du modèle doit donc se poursuivre, ce qui est prévu dans le projet européen GreenGrass qui se terminera à la fin de l'année 2004. Malgré ces imperfections, le modèle PASIM peut déjà être utilisé pour évaluer les flux de gaz à effet de serre à l'échelle de la parcelle, puisqu'il prédit les ordres de grandeur et les tendances observées pour les trois gaz étudiés.

Conformément aux objectifs du projet GES-Prairies, nous avons donc appliqué ce modèle à deux échelles spatiales plus larges : la ferme d'élevage, puis la région.

### **4.3. - Modélisation des émissions nettes de GES à l'échelle des exploitations d'élevage et options de réduction**

#### **4.3.1. - Modélisation des émissions sur une ferme Lorraine en polyculture-élevage laitier**

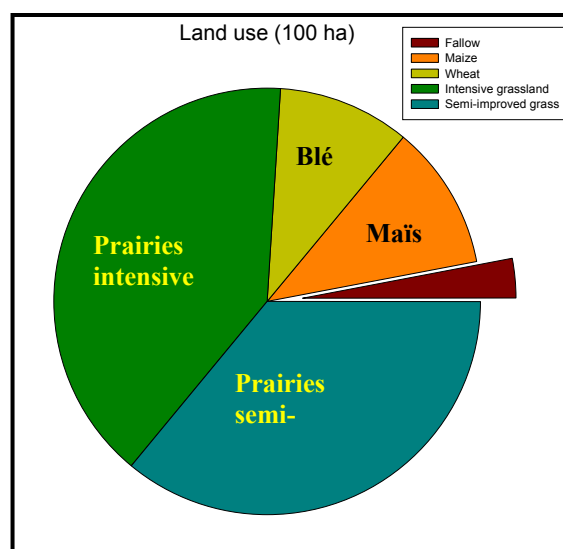
Les premières simulations en utilisant FARMSIM ont été réalisées sur une ferme Lorraine en polyculture-élevage laitier. La SAU est de 100 ha avec un important quota laitier (300,000 l).

La ferme produit du lait et des bœufs. La SAU est dominée par les prairies permanentes (76 ha). 21 ha sont cultivés sur une rotation maïs-blé, 3 ha sont en jachères (Figure 36). Les prairies sont pâturées de mi-avril à octobre. 32 ha sont fauchés mi-mai (ensilage d'herbe) et 9 ha fin juin (foin). Le regain d'une partie des prairies est fauché au cours de l'été ou au début de l'automne.

Les engrais minéraux sont appliqués entre la fin de l'hiver et le milieu de l'été sur les prairies fauchées et la plupart des prairies pâturées. Les prairies intensives (40 ha) et semi-intensives (36 ha) sont respectivement fertilisées avec 110 et 45 kg N ha<sup>-1</sup>. Les prairies intensives reçoivent en automne également 12 tons/ ha (i.e. 70 kg N ha<sup>-1</sup>) de fumier composté. Les prairies semi-intensives reçoivent environ de fumier frais pendant l'hiver.

Les rendements des prairies sont situés entre 4.5 and 6.5 t MS ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, soit une quantité totale de fourrage autour de 100, 33 and 7 t MS en ensilage d'herbe foin et regain. Les rendements en maïs ensilage sont de 120 t MS an<sup>-1</sup> utilisés pour l'alimentation du troupeau laitier entre octobre et avril. Le 9 ha de blé permettent une récolte de 20 t MS de grain et environ 35 t MS de pailles utilisée pour l'alimentation des génisses et des bœufs. Le blé d'hiver et le maïs sont fertilisés avec 15 tonnes de fumier compostés et 22 tonnes de fumier frais (soit respectivement 110 et 75 kg N minéral N ha<sup>-1</sup>).

Le troupeau est constitué de 48 vaches Prim'Holstein produisant chacune en moyenne 6,700 kg de lait par an. Le taux de remplacement du troupeau est de 35% ; les génisses mettent bas à 3 ans. Les vêlages s'étalent d'août à novembre. Tous les bœufs sont élevés jusqu'à 3 ans.



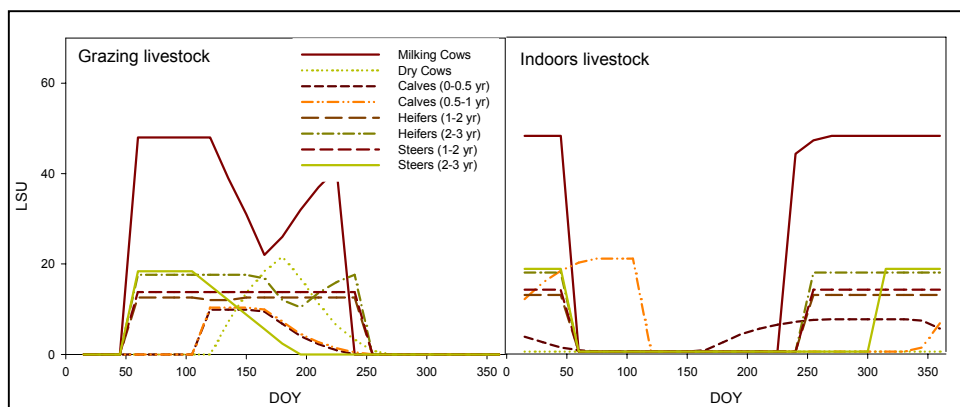
**Figure 36** - SAU de la ferme Lorraine étudiée

L'alimentation du troupeau repose essentiellement sur l'herbe à l'exception du troupeau de vaches laitières. D'octobre à avril, le troupeau laitier est nourri avec du maïs ensilage (13 kg MS / vache et par jour) et du foin ou regain (2 kg MS/vache/jour). Un complément à base de tourteau de soja et de blé (2.2 kg MS/vache/jour). Pendant toute la période de pâture, le troupeau laitier est nourri à l'herbe uniquement. Au cours de la première année, les veaux sont nourris à base de foin, puis d'ensilage d'herbe et de foin. Pendant la période de pâture, il reçoivent en moyenne 0.5 kg MS de foin par jour.

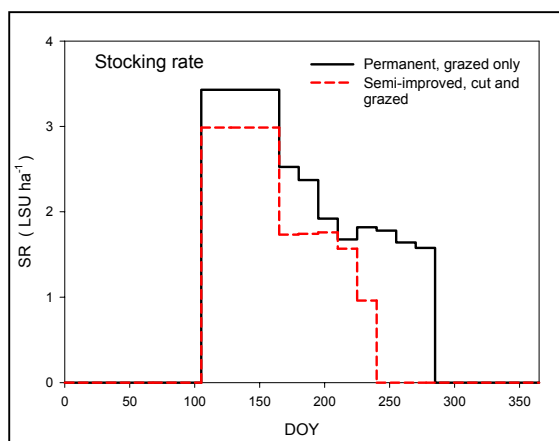
Les génisses et les bœufs reçoivent chacun en hiver 4.5 et 3 kg MS / jour d'ensilage d'herbe et de paille. Les bœufs sont vendus de juin à septembre. Les flux de fourrage sont assez tendus sur cette exploitation avec un chargement moyen de 1.3 Unité Gros Bétail par hectare (UGB/ ha) dont l'alimentation repose à 13% sur le maïs, 46% sur les prairies intensives et 41% sur les prairies semi-intensives. Les figures 37, 38 et 39 illustrent quelques sorties de FARMSIM, comme la distribution sur l'année des UGB pour chaque catégorie d'animal au pâturage et en stabulation, le chargement moyen en UGB / ha par quinzaine pour les différents types de prairies définies et les différentes rations alimentaires apportées aux différents lots d'animaux.



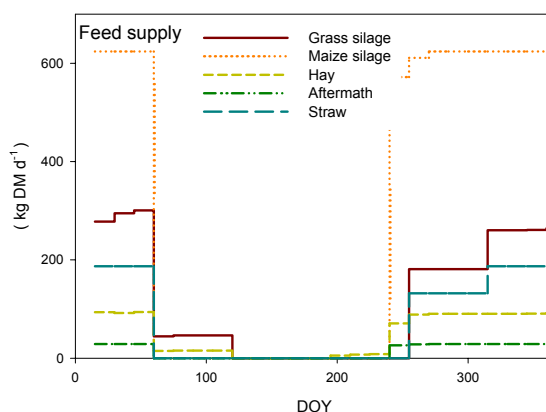
Ces données de sorties sont directement utilisées par FARMSIM pour calculer les émissions de GES à partir du modèle PASIM et de la méthodologie IPCC -Tier 2.



**Figure 36** - Effectif bovin (UGB) au pâturage (A) et en stabulation (B) par catégorie: vaches laitières, vaches taries, veaux (0-6 ; 6-12 mois), génisses (1-2 ; 2-3 ans), bœufs (1-2 ; 2-3 ans)



**Figure 37** - Chargement animal moyen (UGB / ha) par quinzaine pour les deux types de prairies de l'exploitation (prairie permanente pâturée ; prairie permanente intensifiée fauchée et pâturée)



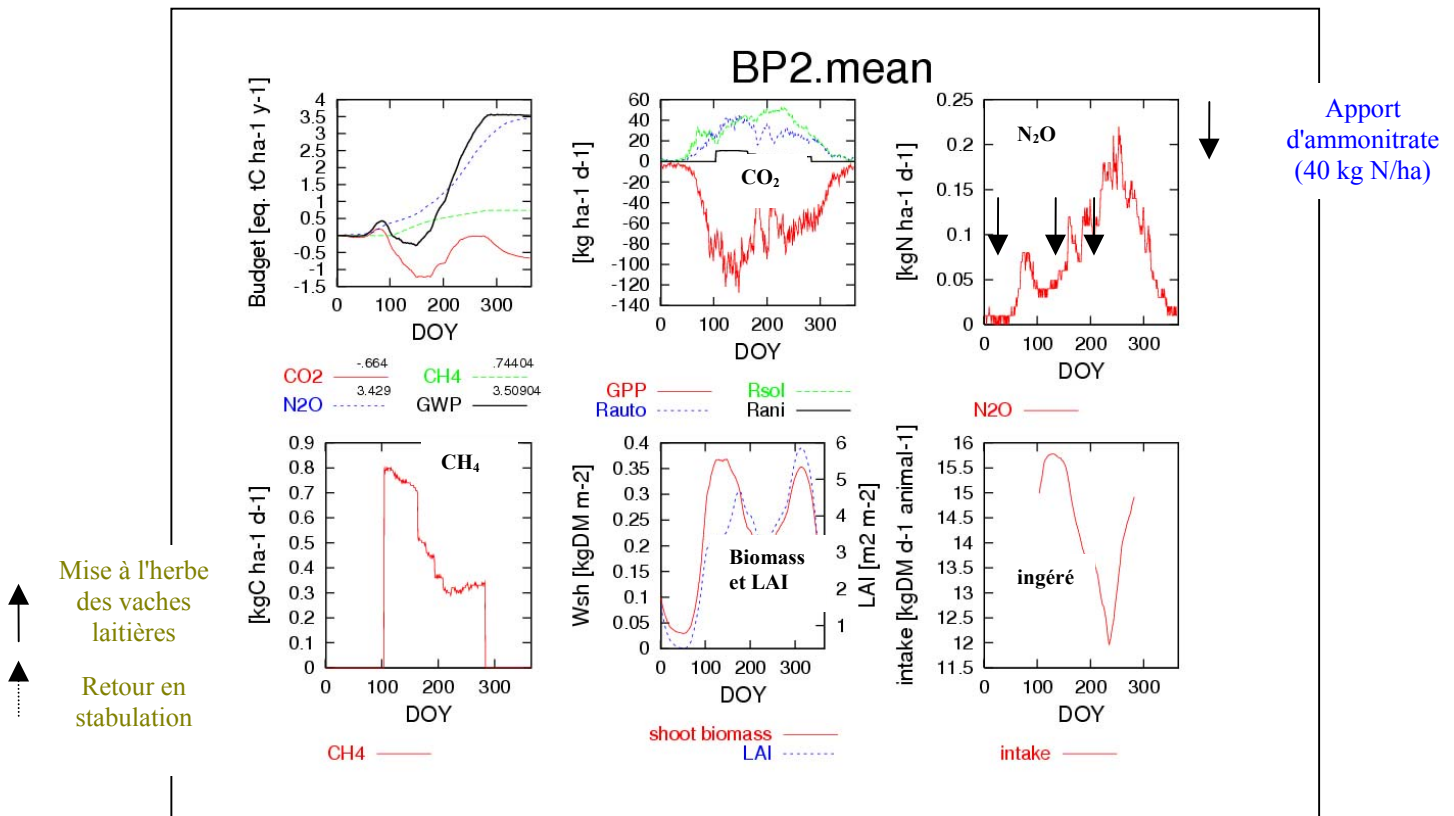
**Figure 38** - Calendrier d'alimentation (hors pâturage) des troupeaux. Les quantités journalières distribuées figurent pour chaque type d'aliment (ensilage d'herbe ; ensilage de maïs ; foin ; regain ; paille)

Neuf lots de prairie ont été caractérisés sur cette ferme d'élevage en fonction des modes de gestion agricole des parcelles et de la conduite du pâturage. Ces 9 lots de prairies ont été obtenus en croisant les paramètres suivants :

- prairies permanentes / semées
- prairies intensives / semi-intensives, extensives,
- prairies pâturées toute l'année / pâturées pendant la saison végétative / pâturées saison végétative + coupe(s) / non pâturées - fauchées uniquement
- nombre de coupes
- fertilisation minérale / organique
- nombre de fertilisations

### 4.3.2. - Résultats

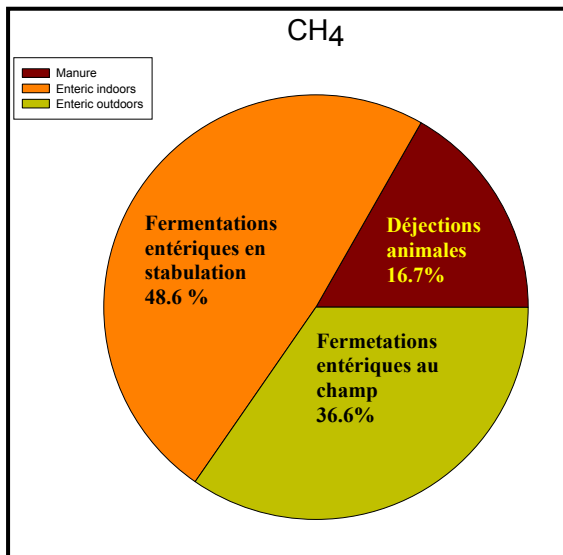
Le modèle PASIM a permis de simuler chacun de ces 9 lots de prairies. Les flux de GES obtenus en sortie ont ensuite été cumulés sur l'ensemble des 9 lots, en les pondérant par les surfaces respectives de chaque lot, afin d'obtenir le bilan des émissions de GES des prairies de la ferme d'élevage. La figure 39 illustre les sorties obtenues par PASIM pour le lot de prairie "BP2" constitué de 14 ha de prairie pâturée d'avril à fin octobre par le troupeau laitier et recevant trois apports d'ammonitrate en mars, juin et août, chacun de 40 kg N / ha.



**Figure 39** - Sorties du modèle PASIM pour le lot de prairie de type « BP2 ». Simulation au cours de l'année : du bilan de gaz à effet de serre (flux cumulés) ; des échanges nets journaliers de CO<sub>2</sub> et de leurs composantes (GPP, assimilation brute ; respiration du sol, de la végétation et du troupeau) ; de l'émission journalière de N<sub>2</sub>O et de CH<sub>4</sub> ; de la biomasse aérienne et de la surface foliaire ; de l'ingéré au pâturage

## ➤ Emissions de méthane

Les émissions de CH<sub>4</sub> sont principalement liées à la fermentation entérique des ruminants : plus de 80% du CH<sub>4</sub> est en effet issu de la digestion des ruminants, que ce soit au pâturage ou en stabulation (Figure 40). 17% des émissions de CH<sub>4</sub> proviennent des processus de fermentation anaérobie des déjections animales produites en stabulation, récoltées sous forme de fumier de raclage et stocké sur une fosse pendant la période hivernale avant l'épandage en champ.



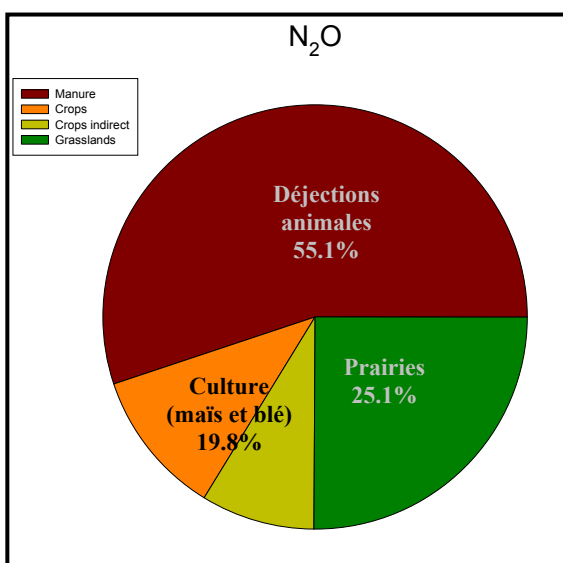
### Bilan des émissions de CH<sub>4</sub> sur l'exploitation :

- Fermentation entérique :  
77 t eq C-CO<sub>2</sub> / an (83.3% des émissions)
  - Déjections animales :  
15 t eq C-CO<sub>2</sub> / ha / an (16.7% des émissions)
- Total : 0.92 t eq C-CO<sub>2</sub> / ha SAU / an**  
ou **0.71 t eq C-CO<sub>2</sub> / UGB / an**

Figure 40 - Sources de CH<sub>4</sub> sur l'exploitation agricole (t eq. C-CO<sub>2</sub>/ ha / an)

## ➤ Emissions de N<sub>2</sub>O

Plus de la moitié des émissions de N<sub>2</sub>O sur cette ferme sont liées au stockage des déjections animales produites en stabulation (Figure 41). Les émissions de N<sub>2</sub>O sont légèrement plus élevées sur prairies (12 t eq C-CO<sub>2</sub> / an) que sur cultures (10 t eq C-CO<sub>2</sub> / an). La totalité des émissions en champ (maïs, blé ou prairies) représentent environ 45% des flux de N<sub>2</sub>O sur l'exploitation.



### Bilan des émissions de N<sub>2</sub>O sur l'exploitation :

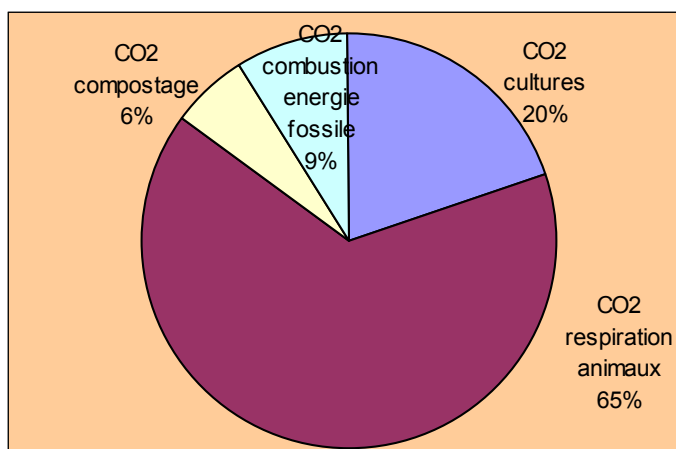
- Déjections animales :  
27 t eq C-CO<sub>2</sub> / an (55.1% des émissions)
  - Cultures (maïs et blé - 21 ha) :  
10 t eq C-CO<sub>2</sub> / an (19.8% des émissions)
  - Prairies (40 ha intensives, 36 ha semi-intensives)  
12 t eq C-CO<sub>2</sub> / an (25.1% des émissions)
- Total : 0.49 t eq C-CO<sub>2</sub> / ha SAU / an**  
ou **0.37 t eq C-CO<sub>2</sub> / UGB / an**

Figure 41 - Sources de N<sub>2</sub>O sur l'exploitation agricole (t eq. C-CO<sub>2</sub>/ ha / an)

## ➤ Emissions et absorption de CO<sub>2</sub>

A l'échelle de l'exploitation agricole, 65% du CO<sub>2</sub> émis dans l'atmosphère est lié à la respiration des animaux (Figure 42). La part du CO<sub>2</sub> émis provenant de la combustion d'énergies fossiles sur la ferme est relativement faible (9%) par rapports aux autres sources de CO<sub>2</sub>. Le compostage d'une partie du fumier recueilli en stabulation contribue pour seulement 6% des émissions totales de CO<sub>2</sub>.

Les surfaces en cultures annuelles de l'exploitation représentent environ 20% des émissions de CO<sub>2</sub>, en raison d'une perte de matière organique des sols labourés, que l'on suppose avoir été occupés par des prairies de 20 à 50 ans auparavant. En revanche, les prairies constituent selon les simulations un puits pour le CO<sub>2</sub> atmosphérique, qui se traduit par une absorption nette d'environ 0.74 tC-CO<sub>2</sub> par hectare de prairies et par an (Figure 43). Le stockage du fourrage entre deux années consécutives représente également un stockage temporaire de carbone, qui atteint 14% du C stocké à l'échelle de la ferme d'élevage.

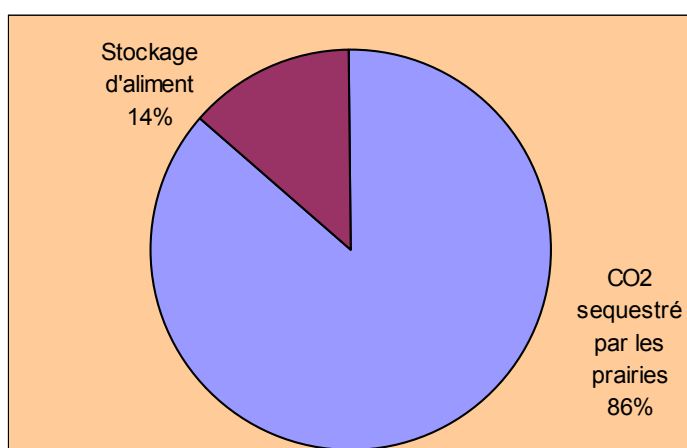


### Bilan des émissions de CO<sub>2</sub> sur l'exploitation :

- Respiration des animaux :  
65 t eq C-CO<sub>2</sub> / an (65% des émissions)
- CO<sub>2</sub> cultures :  
20 t eq C-CO<sub>2</sub> / an (20% des émissions)
- CO<sub>2</sub> combustion énergie fossile:  
9 t eq C-CO<sub>2</sub> / an (9% des émissions)
- CO<sub>2</sub> compostage:  
6 t eq C-CO<sub>2</sub> / an (6% des émissions)

**Total :**            **1.00 t eq C-CO<sub>2</sub> / ha SAU / an**  
ou                    **0.75 t eq C-CO<sub>2</sub> / UGB / an**

**Figure 42 - Sources de CO<sub>2</sub> sur l'exploitation agricole (t eq. C-CO<sub>2</sub>/ ha / an)**



### Séquestration de CO<sub>2</sub> et stockage de Carbone sur l'exploitation :

- Stockage de C par les prairies  
56 t C-CO<sub>2</sub> / an (86.2% du puit de C)
- Stockage d'aliment entre 2 années consécutives  
9 t C-CO<sub>2</sub> / an (13.8% du puit de C)  
ou

**Total :**            **0.65 t C-CO<sub>2</sub> / ha SAU / an**  
ou                    **0.51 t C-CO<sub>2</sub> / UGB / an**

**Figure 43 - Puits de CO<sub>2</sub> / Carbone sur l'exploitation agricole (t equivalent C-CO<sub>2</sub>/ ha / an)**

## ➤ Synthèse

Le Tableau 3 montre le bilan des trois gaz à effet de serre, converti en équivalents CO<sub>2</sub> selon le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) de chaque gaz, ainsi que le bilan net de gaz à effet de serre exprimé soit par exploitation, soit par hectare de SAU, soit par UGB. Selon ces estimations, cette exploitation d'élevage bovin constitue une source de GES à hauteur de 174.7 t C-CO<sub>2</sub>, soit 1.75 t C-CO<sub>2</sub> / ha SAU ou 1.34 t C-CO<sub>2</sub> / UGB.

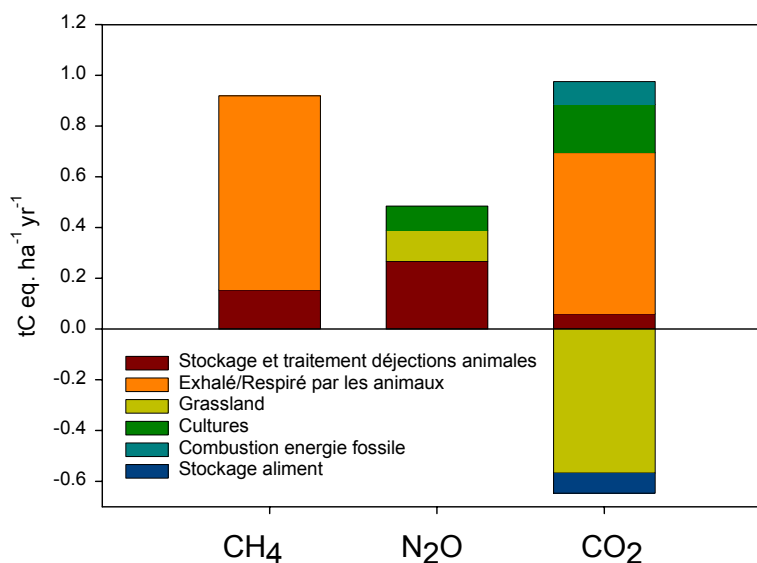
**Tableau 3** - Production totale de GES sur l'exploitation agricole en t équivalent C-CO<sub>2</sub>

	CH <sub>4</sub> *	N <sub>2</sub> O *	CO <sub>2</sub> *	Somme des 3 GES
Production totale sur la ferme	91.9	48.5	34.3	174.7
Production totale / ha SAU	0.92	0.49	0.34	1.75
Production totale / ha prairies	1.21	0.64	0.45	2.30
Production totale / UGB	0.71	0.37	0.26	1.34
Contribution (%)	52.6%	27.8%	19.6%	

\* En équivalent C-CO<sub>2</sub>

Dans le détail (Figures 44 et 45), on observe que le CH<sub>4</sub> contribue à plus de 50% au total des émissions nettes de GES ; les plus grosses émissions sont liées aux fermentations entériques dans le rumen après ingestion des fourrages par le troupeau laitier et, dans une moindre mesure, à la fermentation anaérobie des déjections animales (fumier et lisier) récoltées et stockés en stabulation. Le N<sub>2</sub>O contribue à environ 28% des émissions : la moitié des flux de N<sub>2</sub>O est liée au stockage des déjections animales, l'autre moitié étant liée directement aux applications d'engrais minéraux ou organiques en champ (prairies ou cultures).

Le bilan en CO<sub>2</sub> est légèrement positif. Le potentiel de séquestration de CO<sub>2</sub> lié au sol prairial et au stockage résiduel de fourrage entre 2 années consécutives est annulé par les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la respiration animale.



**Figure 44** - Emissions de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub> e, t eq C-CO<sub>2</sub> par ha et par an

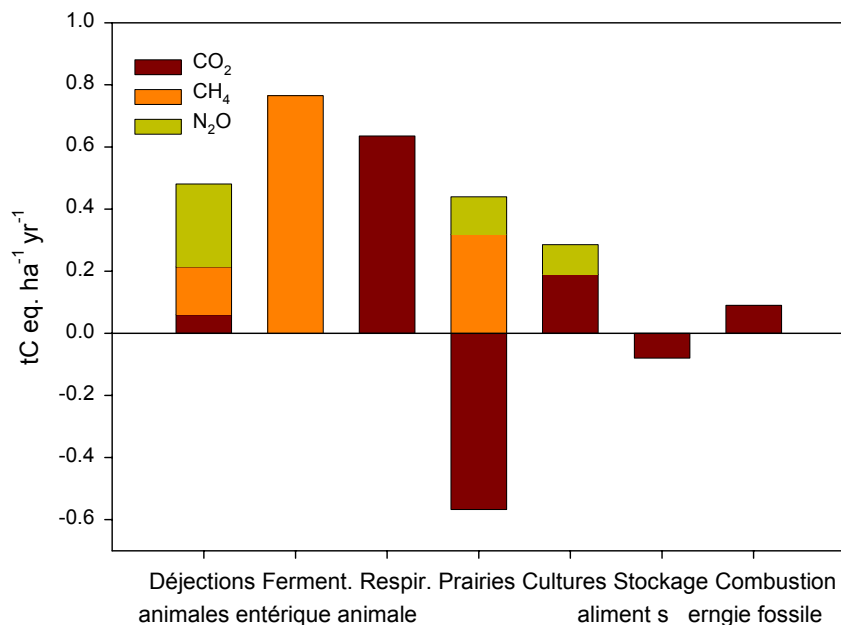


Figure 45 - Emissions de GES pour chacun des postes de l'exploitation agricole

### 4.3.2. - Stratégies d'atténuation du bilan de gaz à effet de serre d'une ferme d'élevage

Différents types de mesures peuvent être utilisées pour améliorer le bilan de GES d'une exploitation d'élevage (Tableau 4). Ces mesures peuvent toucher seulement la ration alimentaire des bovins : par exemple, en augmentant la teneur en acides gras dans la ration (ce qui aurait pour effet de réduire les émissions de méthane). Elles n'auraient alors que peu de conséquences sur le système d'élevage dans son ensemble. En revanche, d'autres mesures pourraient remettre en cause le système fourrager et, par extension, le système d'élevage. Il s'agit notamment des modifications de fertilisation azotée, qui affectent la production fourragère et conduisent donc à modifier soit le nombre d'animaux, soit les surfaces fourragères. De même, les mesures ayant trait à la conduite des troupeaux (nombre de lactations par vache, réduction de l'âge d'abattage des bœufs) nécessitent d'adapter l'ensemble du système d'élevage, et les produits animaux (quantité et qualité) qui en sont tirés.

Tableau 4 - Liste de mesures à comparer afin d'évaluer les effets sur le bilan de GES d'une ferme d'élevage

Secteurs		Propositions de variation
1.	Fertilisation	Taux de fertilisation azotée : -30% / +30%
2.		Différentes périodes d'épandage des engrais organiques
3.		Application d'azote minéral à la date de coupe / 10 jours après
4.		Application estivale d'azote minéral en période sèche / Pas d'application
5.	Type de prairie temporaire	Graminées seules / Association graminée-légumineuse
6.	Irrigation	Pas d'irrigation / Irrigation 1/2 optimale / Irrigation optimale
7.	Chargement animal	-30% / +30% → ajuster le concentré en conséquence
8.	Nature de la ration alimentaire	Teneur en acides gras dans la ration : Témoin / x 2
9.	Conduite de l'élevage et de la reproduction	Nombre de lactations en système laitier : Témoin, +1 → veaux en surplus sont vendus
10		Réduction de l'âge d'abattage des bœufs en système viande → De nouvelles stratégies d'alimentation

## ➤ Exemple de la ferme lorraine : pistes d'atténuation des émissions de GES

Dans l'exemple lorrain, plusieurs pistes peuvent être envisagées pour atténuer les émissions de GES de la ferme d'élevage.

### *Scénario 1. Réduction des apports d'engrais azotés sur les prairies.*

On peut souhaiter réduire l'emploi d'engrais azotés sur les prairies afin de limiter les émissions de N<sub>2</sub>O mais, dans ce cas, la baisse de la production fourragère réduirait fortement les stocks fourragers, y compris en envisageant une augmentation de la proportion de trèfle blanc dans les prairies. Cela nécessiterait alors de réduire le chargement animal au pâturage. Une réduction d'environ 50 % de la fumure azotée pourrait ainsi conduire à une baisse du chargement global de 1,3 à 1,1 UGB ha<sup>-1</sup> sur l'exploitation. La fixation biologique d'azote par les légumineuses de la prairie permanente pourrait en partie prendre le relais des engrais azotés et maintenir ainsi un niveau acceptable de productivité fourragère. Pour ce faire, l'éleveur serait néanmoins conduit à abandonner l'élevage des bœufs, en vendant les veaux mâles pour ne conserver que le troupeau laitier et sa suite.

### *Scénario 2. Conversion des cultures en prairies permanentes*

Dans ce scénario, la conversion des cultures annuelles en prairies permettrait de stocker du carbone dans le sol à raison d'environ 0,5 tC par hectare et par an pendant les vingt premières années (Soussana et al., 2004). De plus, cette conversion pourrait s'accompagner d'une réduction des apports d'engrais azotés ce qui réduirait d'autant les émissions de N<sub>2</sub>O. Ce scénario pose la question de la substitution de l'ensilage de maïs par un autre régime alimentaire hivernal. Une utilisation accrue de l'ensilage d'herbe ou du foin pourrait constituer une réponse, avec toutefois un risque important de baisse de la production laitière du fait d'une moindre valeur alimentaire de la ration hivernale. Cependant, l'abandon de la production de blé pose la question de l'origine des concentrés énergétiques nécessaires à une bonne productivité laitière, sans oublier la production de paille (fourrage et litière) ou l'importation de concentrés protéiques (soja...). Le fait d'acheter du blé et de la paille réduirait, certes, les émissions de GES de la ferme étudiée, mais cette mesure n'aurait a priori aucun effet bénéfique sur le bilan des émissions à une échelle régionale ou nationale.

### *Scénario 3. Augmentation du nombre de lactations et élevage de taurillons laitiers.*

Afin de réduire le poids des émissions directes (respiration, fermentation entérique) ou indirectes (effluents d'élevage) liées aux troupeaux, un remplacement des bœufs par des taurillons (par exemple un atelier de 15 taurillons abattus à l'âge de 20 mois) ainsi qu'un accroissement du nombre moyen de lactations par vache (de deux à trois lactations) seraient envisageables. Ces mesures permettraient de réduire l'effectif animal (de 125 à 100 UGB) tout en ménageant la production laitière de l'exploitation. Elles se traduiraient par une réduction du chargement animal à 1.14 UGB/ha, qui serait dès lors compatible avec une réduction de l'emploi des engrais azotés (scénario 1).

### *Scénario 4. Recherche d'une autonomie alimentaire du troupeau laitier.*

Le remplacement de la culture du maïs par un protéagineux comme la féverole et le développement du trèfle blanc dans les prairies permettraient de réduire de moitié la fertilisation azotée des prairies et d'équilibrer des régimes alimentaires en tirant parti de la production de triticale et d'orge (grains et paille).

Ainsi, sans réduire ni la superficie assolée, ni la fertilisation azotée des céréales, mais en supprimant la production de viande, un tel scénario présenterait un double intérêt : limiter l'importation d'intrants à une quantité modérée d'engrais azotés et à de la paille pour la litière ; faire reposer l'alimentation hivernale du troupeau laitier à 85% sur de l'herbe, contre 42% dans la situation initiale en ce qui concerne les fourrages, sans importer aucun aliment concentré (énergétique ou azoté).

#### *Scénario 5. Conversion à l'agriculture biologique.*

Cette conversion aurait pour effet de supprimer le recours à des engrais azotés minéraux. On rejoint donc le scénario 1, en le poussant un peu plus loin. La principale source d'azote après conversion deviendrait la fixation biologique d'azote par les légumineuses de la prairie permanente ou par des associations semées graminée – trèfle. Dans la logique de ce scénario, la superficie des cultures annuelles devrait être réduite, les quantités d'azote organique disponibles sur l'exploitation devenant limitantes. La recherche d'une autonomie alimentaire dans ce contexte ne pourrait plus alors être envisagée sans une transformation notable du troupeau laitier : diminution de la productivité, accroissement de l'effectif, changement de période de vêlage... L'arbitrage entre ces différents choix et les compromis à trouver ouvrent alors autant de nouveaux scénarios.

## **4.4. - Bilan et flux de GES à l'échelle régionale**

Afin de commencer à tester le modèle PASIM à une échelle régionale, des simulations ont été effectuées sur l'ensemble de l'Europe (cf. Matériel et Méthodes). Les résultats de ces simulations sont fournis sous forme de cartes dans les figures 46 à 48.

### **4.4.1. Fertilisation azotée (Nfert)**

Pour chaque maille, l'analyse de sensibilité du modèle a permis de calculer un apport d'azote qui correspond à 30 % de la fertilisation qui maximiserait la croissance annuelle de la prairie. Il faut noter qu'une fertilisation maximale n'est que rarement apportée sur prairie, à la fois pour des raisons économiques et pour limiter les pertes vers la nappe (lixiviation du nitrate) ou les pertes gazeuses (par volatilisation, dénitrification ou nitrification). Le modèle prédit des apports maximaux d'azote de l'ordre de 600 à 900 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> en fauche, ce qui n'est pas irréaliste puisqu'une dose de 540 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> était limitante dans une expérimentation antérieure (Soussana et al., 1996). Les doses calculées indiquent un gradient climatique, avec des apports plus faibles aux latitudes élevées et dans les zones de montagne (Alpes, Pyrénées).

Les apports calculés varient en France de 150 à 300 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, ce qui correspond assez bien aux pratiques agricoles sur les prés de fauche. Des apports moindres sont simulés en pâture (le pâturage s'accompagnant d'un recyclage élevé d'azote) et dans le mode mixte où l'on combine sur un pixel des prairies fauchées et pâturées, au prorata des besoins alimentaires hivernaux et estivaux des troupeaux.

### **4.4.2. Chargement animal potentiel (UGB)**

Les simulations au pâturage ont été effectuées sur la base d'un chargement animal potentiel qui a été calculé comme le nombre d'animaux nécessaire pour consommer l'ensemble de la production végétale aérienne. Les chargements annuels potentiels simulés varient de 3 à 4 UGB/ha/an en France.



Ce chargement potentiel est très élevé au regard des pratiques agricoles, ce qui s'explique par deux raisons : le modèle simule des conditions transitoires où les animaux ne prélèvent pas suffisamment d'herbe pour assurer leurs besoins alimentaires ; de plus, il ne tient pas compte de l'hétérogénéité spatiale des parcelles pâturées, dont certaines zones sont mal utilisées par les herbivores (zones de couchage, refus, zones piétinées etc...). Ces deux facteurs tendent à surestimer le chargement animal moyen annuel d'au moins 50 %. Ce biais pourra être corrigé ultérieurement, en considérant comme pour l'azote une fraction du chargement annuel calculé. La coexistence de prairies pâturées et fauchées dans le mode mixte se traduit par des chargements animaux par hectare réduits qui varient selon les simulations de 2 à 3 UGB/ha/an en France.

#### **4.4.3. Exportation de carbone par la fauche (Yield)**

La production de matière sèche aérienne récoltée par la fauche a été simulée en tonnes de carbone par hectare et par an. Cette productivité végétale varie pour la France entre 4 et 6 t C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, soit de 10 à 15 tMS ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Ces valeurs correspondent bien aux données obtenues dans les réseaux d'essais fourragers en petites parcelles expérimentales (Schapendonk et al., 1996). Les gradients de productivité simulés soulignent l'influence du gradient de continentalité, les prairies les plus productives étant situées en climat doux et océanique, alors que des hivers froids ou des été secs réduisent de plusieurs tonnes la productivité des prairies. Les simulations réalisées sur le mode mixte fauche/pâturation montrent que près de la moitié de la superficie en prairie est consacrée à la fauche, les récoltes par hectare moyen variant de 2 à 3 tC ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>.

#### **4.4.4. Emission de méthane au pâturage**

Selon les simulations, ces émissions dues à la fermentation entérique des ruminants sont comprises en France entre 250 et 350 kg C-CH<sub>4</sub> par hectare et par an. Il s'agit là d'émissions cumulées durant la période de pâturage. En revanche, les émissions durant la période de stabulation n'ont pas été simulées, puisque le modèle PASIM, contrairement à FARMSIM, ne simule que le bilan de GES des prairies. Les émissions varient principalement avec le chargement animal par hectare, l'influence de variations de la composition chimique de l'herbe ingérée étant assez faible.

#### **4.4.5. Coefficient d'émission de N<sub>2</sub>O**

Le coefficient d'émission de N<sub>2</sub>O est défini comme le pourcentage de l'azote apporté qui est émis vers l'atmosphère sous cette forme. Ce coefficient est considéré comme constant au cours du temps pour une source donnée d'azote dans la méthodologie proposée par l'IPCC (IPCC, Good Practice Guidelines, 2000) pour calculer les émissions de ce gaz. Les valeurs du coefficient d'émission varient le plus souvent de 1 à 4 % selon les références expérimentales. Les simulations indiquent des coefficients d'émission assez stables pour les différentes mailles en Europe, avec des valeurs qui sont de l'ordre de 2 % en fauche (apport d'azote minéral) et de 4-5 % en pâturation (apport d'azote organique à partir des déjections animales).

Des valeurs plus élevées des coefficients d'émission en cas de pâturation ont été proposées par différents auteurs, du fait de la présence de carbone soluble dans l'urine, qui favorise l'activité métabolique des dénitrifiants hétérotrophes. Il est remarquable, compte tenu de la complexité du modèle PASIM, qu'il prédise des valeurs assez stables du coefficient d'émission de N<sub>2</sub>O, qui sont en bon accord avec la méthodologie internationale.

#### 4.4.6. Echange net de CO<sub>2</sub> de l'écosystème (NEE)

Cette variable (NEE) correspond au bilan annuel de carbone des prairies. Une valeur négative indique un puits de carbone pour l'atmosphère, soit un stockage de carbone. En régime de fauche, les simulations prédisent un stockage annuel important, dont l'amplitude varie de 0,5 à 6 tC ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Il faut préciser qu'une partie importante de ce stockage intervient dans le fourrage récolté (parties aériennes fauchées). Le temps de résidence du carbone dans ce stock fourrager est court, de l'ordre de l'année, les fourrages récoltés étant destinés à l'alimentation animale.

La fraction digestible du carbone (60 à 80 %) des fourrages sera respirée après ingestion par des ruminants. Seule la fraction non digestible (20 à 40 %) sera restituée par les déjections et pourra, en partie revenir au sol, après des pertes respiratoires supplémentaires, liées au stockage et à l'épandage des effluents d'élevage (fumiers et lisiers). La différence entre le NEE (en valeur absolue) et la quantité de carbone exportée par la fauche (Yield) est faible (de 0 à 1 tC ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>). Le stockage de carbone dans des pools organiques plus pérennes (MOS) est donc très inférieur au NEE en prairie fauchée.

En régime de pâturage continu, l'interprétation du NEE est différente, ce mode d'exploitation ne s'accompagnant pas d'exportations de fourrages. Le NEE des prairies pâturées (0,3 à 2 tC ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) est donc plus faible que celui des prairies fauchées, mais ce flux est dans ce cas directement assimilable à un stockage dans les matières organiques du sol (MOS).

#### 4.4.7. Bilan net des échanges de gaz à effet de serre

Après pondération de chaque GES par son pouvoir de réchauffement global (sur un horizon de 100 ans), les échanges nets de GES de la prairie avec l'atmosphère peuvent être calculés en équivalents carbone. Les simulations indiquent que les prairies fauchées constituent un important puits net pour les GES étudiés, l'amplitude de ce puits varie en France de 2,5 à 6 t équivalent C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. En revanche, les prairies pâturées à leur chargement animal potentiel constitueraient une source nette de GES, avec des flux variant en France de 0,5 à 2 t équivalent C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. Les simulations associant prairies fauchées et pâturées, au prorata des besoins créés par l'alimentation hivernale des troupeaux, indiquent pour la France un puits nets de GES avec des flux annuels de 2 à 3 t équivalent C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>.

A l'échelle de l'Europe, on peut remarquer que les flux nets de GES associés à une utilisation mixte des prairies par la fauche et par la pâture sont nettement moins variables que ceux obtenus avec un seul mode d'utilisation. En effet, les conditions les moins favorables à la productivité végétale annuelle (et donc au stockage de carbone en fauche) sont également celles pour lesquelles le chargement animal sera le plus faible et la durée de la saison de pâturage la plus courte. Une part importante de la superficie des prairies les moins productives (aux latitude élevées, en montagne, ou en climat plus continental) doit être gérée en fauche pour créer des stocks fourragers suffisants, ce qui améliore d'autant la fonction puits de GES de ces régions. A l'inverse, les régions potentiellement les plus productives (climat tempéré et influence océanique) présentent un bilan de GES d'autant moins favorable qu'il est possible de les pâturer plus longtemps, avec un chargement animal plus élevé et des apports d'azotes plus forts.

## 5. Discussion et conclusions

Les résultats obtenus dans ce projet soulignent l'intérêt d'une approche à plusieurs échelles spatiales du bilan de gaz à effet de serre des prairies et des fermes d'élevage, qui prenne en compte simultanément les trois gaz concernés.

### 5.1. - Flux de GES à l'échelle de la parcelle

#### 5.1.1. - Flux et stocks de carbone

Le bilan de carbone d'une prairie pâturée correspond à la résultante d'un ensemble de flux qui sont résumés dans la figure 49. La productivité nette du biome prairial (qui correspond à l'échange net de l'écosystème pâturé avec l'atmosphère, ou NEE) ne constitue qu'une faible fraction de la productivité primaire brute (0,5 contre 19 t C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> dans l'exemple considéré). Un tel flux net est difficile à déterminer par la méthode des fluctuations turbulentes, d'autant qu'il varie selon la saison et selon l'année. De plus, l'ampleur des flux associés au pâturage (ou à la fauche) est considérable. Une baisse de la pression de pâturage entraînera une accumulation d'herbe sur pied qui sera comptabilisée comme un stockage supplémentaire de carbone. De même, une conversion de la pâture à la fauche donnera lieu à une valeur plus négative de NEE, qui ne doit toutefois pas être interprétée comme un stockage, puisqu'il s'agit d'une exportation de carbone sous forme de fourrages. L'acquisition de références sur le bilan de carbone des prairies doit donc être faite en conservant une gestion expérimentale soigneusement contrôlée pendant suffisamment d'années pour que la résultante des flux soit connue sans ambiguïté.

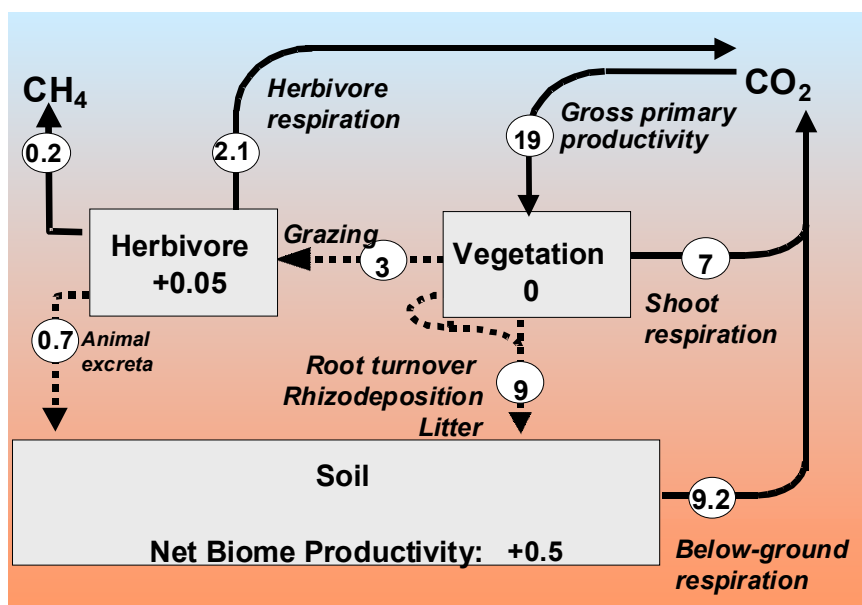
La gestion en pâturage continu réalisée sur le site de Laqueuille permet de construire un bilan de GES dans des conditions sensiblement constantes de surface foliaire et de biomasse aérienne de la végétation prairiale. Ces conditions permettent ainsi de mieux analyser les effets des fluctuations saisonnières du climat sur les flux de GES. De plus, l'absence de fauche et l'absence d'apports d'engrais organiques permettent de boucler le bilan de carbone de la parcelle, sans avoir à tenir compte d'entrées ou de sorties de carbone organique.

En accord avec les prédictions du modèle PASIM, les données obtenues sur le site de Laqueuille montrent qu'une extensification (réduction du chargement animal et arrêt de la fertilisation azotée) permet de stocker plus de carbone dans la prairie (NEE de -0,38 et -1,40 t CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup> dans les traitements intensifs et extensifs durant la première année de mesure après début des traitements). Mais le carbone a-t-il été accumulé seulement dans la biomasse aérienne, ou une partie de ce carbone a-t-elle également été stockée dans les matières organiques du sol ? Il est trop tôt pour pouvoir conclure sur ce point.

Un flux majeur, mais habituellement négligé, du bilan de carbone d'une prairie est la respiration des herbivores. Après la respiration des décomposeurs du sol, la respiration hétérotrophe des ruminants constitue la seconde source majeure d'émission de CO<sub>2</sub> à partir d'une prairie. Nos résultats indiquent une respiration annuelle des ruminants atteignant 1,0 et 1,9 t C-CO<sub>2</sub> par hectare et par an, respectivement dans les traitements extensifs et intensifs.

Les mesures sur ce site se poursuivront jusqu'en 2008 dans le cadre du projet CarboEurope. De plus, la matière organique des sols a été échantillonnée avec précision dans la parcelle extensive (100 carottes, sept profondeurs) ce qui permettra d'analyser son évolution d'ici à 5 ans. Des mesures complémentaires portant sur la respiration du sol et sur la croissance racinaire sont

également prévues, afin de mieux comprendre la dynamique des flux de carbone en prairie pâturée. Enfin, les flux de carbone organique ou inorganique dissous (DOC et DIC) seront analysés dans le cadre du projet, afin d'évaluer leur contribution au bilan de carbone de la prairie permanente.



**Figure 49** - Flux et bilan de carbone dans une prairie fertile pâturée à un chargement animal élevé (d'après Soussana et al., SUM, 2004).

### 5.1.2. - Emissions de méthane, de N<sub>2</sub>O et bilan de GES

Dans le cycle du carbone, les flux de méthane n'occupent qu'une place mineure, les émissions de méthane au pâturage par les ruminants ne représentant selon nos résultats qu'un quarantième de leur émission respiratoire de CO<sub>2</sub>. Toutefois, du fait d'un pouvoir de réchauffement global élevé, les pertes de méthane affectent le bilan de GES de la prairie pâturée.

A l'auge les émissions de méthane sont fortement affectées par la qualité des aliments offerts. Au pâturage, les herbivores par leur aptitude au tri parviennent à ingérer des tissus végétaux de forte digestibilité, y compris dans une végétation extensive dont la digestibilité moyenne est plus faible. L'extensification n'entraîne donc pas d'augmentation significative des émissions de méthane par kilo de poids vif. Les émissions sont en première approximation proportionnelles au chargement animal et donc réduites de moitié par hectare en pâturage extensif comparé au pâturage intensif.

Les mesures réalisées sur le site de Laqueuille indiquent de faibles émissions moyennes de N<sub>2</sub>O (généralement inférieures à 1 gN ha<sup>-1</sup> jour<sup>-1</sup>). Cumulées sur un an, les émissions mesurées constituent une faible composante du bilan de GES : elles représentent seulement 20 et 130 kg équivalent C-CO<sub>2</sub> dans les traitements extensif et intensif, respectivement. Sur le traitement intensif, qui reçoit un apport de 170 kg N-N<sub>2</sub>O, le facteur d'émission de N<sub>2</sub>O peut être estimé selon la méthodologie IPCC Tier 2 à seulement 0,5 % de la dose d'azote apportée. Ces mesures s'accompagnent d'une forte variabilité, tant spatiale que temporelle. Le caractère log-normal de la distribution spatiale des émissions de N<sub>2</sub>O peut s'interpréter en considérant que les déjections animales, qui constituent une importante source d'azote, sont distribuées aléatoirement. Seules quelques zones ont reçu un, ou plusieurs, apports d'urine dans les jours précédant les mesures. L'application d'une méthode de Monte-Carlo à la distribution log-normale des émissions montre que les flux estimés avec 8 chambres au sol sont, en moyenne, peu différents de ceux qui seraient obtenus en utilisant un plus grand nombre de répétitions.

Le modèle PASIM néglige l'hétérogénéité spatiale des émissions de N<sub>2</sub>O. Une modélisation plus réaliste des émissions de N<sub>2</sub>O au pâturage nécessiterait par conséquent de tenir compte de cette hétérogénéité en divisant la surface de la parcelle en n classes, chacune ayant reçu un apport d'urine depuis k semaines. Par exemple, en 10 classes correspondant à des apports d'urine datant de moins d'une semaine à plus de 9 semaines. On pourrait alors simuler les émissions de chacune de ces classes, puis les émissions de la parcelle. Une analyse mathématique du problème serait également intéressante pour envisager une solution analytique à ce problème.

Les fluctuations temporelles des flux de N<sub>2</sub>O posent un autre problème qui n'a pas été résolu. La méthode des chambres statiques employée en routine ne permet pas de réaliser des mesures suffisamment fréquentes pour prendre en compte des pics d'émission qui ont une faible durée (quelques heures à quelques jours). De plus, comme l'ont montré les campagnes réalisées à deux reprises, les émissions sur ce site sont trop faibles pour être détectables avec une TDL ('Tunable Diode Laser') par la méthode des fluctuations turbulentes. Une méthode nouvelle devra donc être mise au point pour connaître la valeur moyenne des flux de N<sub>2</sub>O. Des chambres statiques automatisées (se fermant plusieurs fois par jour) pourraient être associées à un dispositif d'échantillonnage (capillaire prélevant dans un sac étanche l'atmosphère de la chambre lorsque celle-ci est fermée) permettant de moyenniser les flux sur une à deux semaines. Nous pensons tester prochainement cette méthode dans le cadre du projet européen 'GreenGrass'.

Les écarts entre les deux traitements étudiés sur le site de Laqueuille sont renforcés lorsque l'on considère le bilan des trois GES, ce qui permet de calculer la séquestration de carbone au sens du protocole de Kyoto. Au bout d'un an de mesures, le traitement intensif constitue une source nette de GES (+0,64 t équivalent C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>), alors que le traitement extensif a une activité de puits (-0,92 t équivalent C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>) du fait de moindres émissions de N<sub>2</sub>O et de CH<sub>4</sub> et d'une absorption de CO<sub>2</sub>. Ces tendances ont également été simulées par le modèle PASIM, qui indique une activité de puits de GES durant la première année après extensification par réduction du chargement animal. L'évolution à plus long terme du bilan de GES n'est toutefois pas connue, même si le modèle PASIM indique que le stockage de carbone obtenu dans le traitement extensif serait difficile à maintenir dans la durée sans apport d'engrais azoté.

Enfin, il faut noter que l'expression du bilan de GES par animal (par UGB) ne modifierait pas pour l'instant la conclusion d'un bilan plus favorable de la parcelle extensive, même si l'écart entre traitements serait réduit, le chargement animal étant deux fois plus élevé dans la parcelle intensive.

## **5.2. - Flux et bilan de GES à l'échelle d'une ferme d'élevage**

Le modèle FARMSIM développé dans le cadre du projet nous a permis de calculer un bilan de GES à l'échelle d'une ferme d'élevage. Ce bilan ne comprend que les échanges directs de GES entre la ferme et l'atmosphère, sans inclure les émissions de GES qui interviennent en amont pour la fabrication et le transport des intrants achetés par la ferme. De même, l'émission de GES en aval n'est pas prise en compte. Pour une ferme d'élevage bovin mixte (lait et viande) de 100 ha en climat continental, une émission nette de 1,75 t équivalent C-CO<sub>2</sub> par hectare et par an a été calculée.

Le bilan annuel de GES s'élève à 1,34 t équivalent C-CO<sub>2</sub> par UGB (Unité Gros Bétail), ou encore à 0,54 kg C-CO<sub>2</sub> par kg de lait produit. Cette dernière estimation est calculée comme le ratio des émissions nettes de GES de la ferme par la production annuelle de lait ; elle ne tient pas compte de la viande produite. Il serait utile d'affiner cette estimation en considérant la part des GES émis par la ferme qui provient du troupeau laitier et celle qui provient du troupeau allaitant (destiné à la production de viande). A titre de comparaison, des collègues danois ont estimé les émissions totales à 1,6 kg équivalent CO<sub>2</sub> pour produire un kg de lait (Randi Dalgard, DIAS, DK, communication personnelle), en incluant les émissions liées à la fabrication et au transport des intrants.

Le stockage de carbone par les prairies (simulé par le modèle PASIM) constitue le seul puits de carbone de l'exploitation. Sans ce puits de 56 t équivalent C-CO<sub>2</sub>, le bilan de GES de la ferme simulée serait alourdi de près de 30 %. Les simulations réalisées avec PASIM supposent que les prairies sont à l'équilibre, les compartiments du sol accumulent donc peu de carbone organique. Pour affiner les simulations, il serait utile de disposer de l'historique d'utilisation des parcelles de la ferme sur une période de 20 à 40 ans. Toutefois, ces données sont difficiles à obtenir pour des fermes réelles. Les scénarios de modification de la gestion des prairies intégreront les changements réalisés.

Il faut remarquer que les émissions directes du bétail (méthane éructé et CO<sub>2</sub> respiré) constituent le poste le plus lourd des émissions de la ferme (142 t équivalent C-CO<sub>2</sub>), le méthane représentant un peu plus de la moitié de ce total.

Nous ne disposons pas encore de simulations complètes pour les scénarios de réduction des émissions de GES pour la ferme étudiée. Une réduction de 30 % du chargement animal, avec arrêt de la fertilisation azotée et abandon de l'atelier d'engraissement des bovins sera simulée, puisqu'elle permettrait à la fois de réduire les émissions de méthane (moins de bovins), celles de N<sub>2</sub>O (pas d'engrais azotés) et qu'elle favoriserait un stockage de carbone dans le sol (réduction du chargement animal). Toutefois, aucun calcul économique n'a été prévu dans le présent projet, puisqu'il était tout d'abord nécessaire de progresser sur les bilans de GES et sur leurs méthodes de mesure.

Deux autres fermes (Bretagne et Pays de la Loire) seront prochainement simulées, de manière à pouvoir un peu généraliser les résultats obtenus sur la ferme Lorraine. De plus, dans le cadre du projet 'GreenGrass' des simulations sont prévues ou en cours pour des fermes de plusieurs pays européens (Danemark, Pays-Bas, Ecosse, Suisse et Hongrie). Cette démarche est facilitée par l'outil de simulation FARMSIM, qui permet de systématiser les données recueillies dans les exploitations agricoles.

### **5.3. - Flux et bilan de GES à l'échelle régionale**

Puisqu'une gestion théorique a été supposée pour le chargement animal et les apports d'azote minéral, les simulations régionales à l'aide du modèle PASIM s'apparentent à une analyse de sensibilité réalisée dans l'espace pédo-climatique européen. L'utilisation d'un modèle complexe, mettant en jeu un grand nombre de paramètres, à une échelle régionale soulève un certain nombre de questions, puisqu'il n'est pas possible de renseigner la valeur de chaque paramètre pour chacune des mailles. Quatre arguments complémentaires peuvent être donnés pour justifier ce choix :

- dans un modèle mécaniste, certains paramètres sont constants (constantes physiques ou biochimiques) ;
- les valeurs d'autres paramètres ont été adaptées, comme dans le cas de paramètres du sol, via des fonctions de pédo-transfert (par exemple, les propriétés hydriques des sols en fonction de leur texture) ;
- le modèle est peu sensible à certains paramètres, les erreurs commises sur leur valeur ne se propagent donc pas dans les résultats des simulations ;
- enfin, l'avantage d'un modèle complexe comme PASIM est d'intégrer les interactions entre de nombreux processus, interactions qui peuvent difficilement être simplifiées si l'on souhaite prédire la résultante (bilan de GES) des flux de carbone et d'azote d'un écosystème.

Ces simulations ont d'autres limites, qui tiennent essentiellement aux données d'entrée disponibles.

En particulier, le mode d'utilisation et la gestion passée des surfaces actuellement occupées par les prairies ne sont pas connues à l'échelle régionale. On suppose donc que les prairies sont actuellement à l'équilibre (stocks de C et de N des sols) avec leur gestion par l'élevage. Des scénarios hors équilibre pourraient être utilisés à l'avenir, en tenant compte de la phase d'intensification (« révolution fourragère ») à partir des années 1960, qui s'est traduite par une utilisation accrue d'engrais azotés et par la conversion d'une partie des prairies permanentes en prairies temporaires.

Un réalisme accru serait également obtenu en tenant compte des spécificités des systèmes d'élevage français. Les données des réseaux animés par l'Institut de l'Élevage sont en train d'être mises en forme afin de pouvoir renseigner sur une base régionale les paramètres d'entrée suivant :

- 1° Carte des régions utilisées
- 2° Nombre d'exploitations par type et par région,
- 3° Type d'élevage : laitier, allaitant, mixte. Performances (l de lait par vache, poids des animaux à la vente),
- 3° Surface fourragère principale moyenne en hectares par exploitation,
- 4° Chargement animal moyen annuel par hectare de surface fourragère principale,
- 5° Durée annuelle des périodes de pâturage et nombre de coupes par an (en moyenne par exploitation, ou par type de prairie)
- 6° Fertilisation azotée moyenne (en détaillant azoté minéral et azote organique) par hectare de prairie : a) permanente ; b) temporaire.
- 7° Type de stabulation (fumier, lisier, fumier de raclage...)
- 8° Cultures fourragères autres que les prairies : type (ex ensilage de maïs) et superficie par exploitation (ha),
- 9° Alimentation de complément auto-consommée sur la ferme (superficie des cultures ex. blé, quantités de concentrés).

A l'échelle européenne, une collaboration avec le projet ELPEN ('European Livestock Typology') a été entamée afin de disposer de données analogues sur les principaux systèmes d'élevage en Europe. A terme, des simulations régionales des fermes d'élevage, de leur bilan de GES et de leurs résultats économiques pourraient être entreprises. On disposerait alors de bases solides pour raisonner des scénarios d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre de ce secteur agricole.

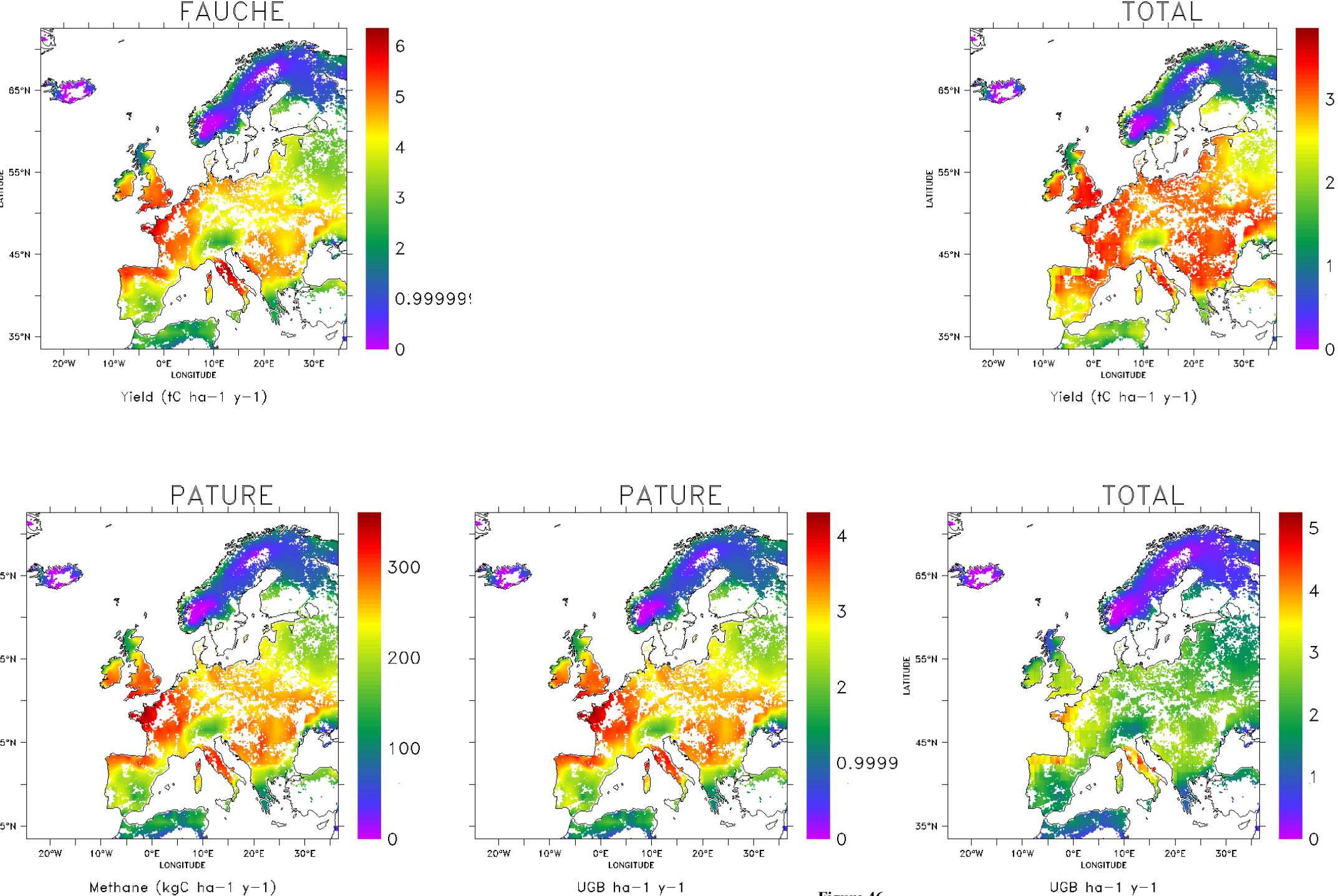
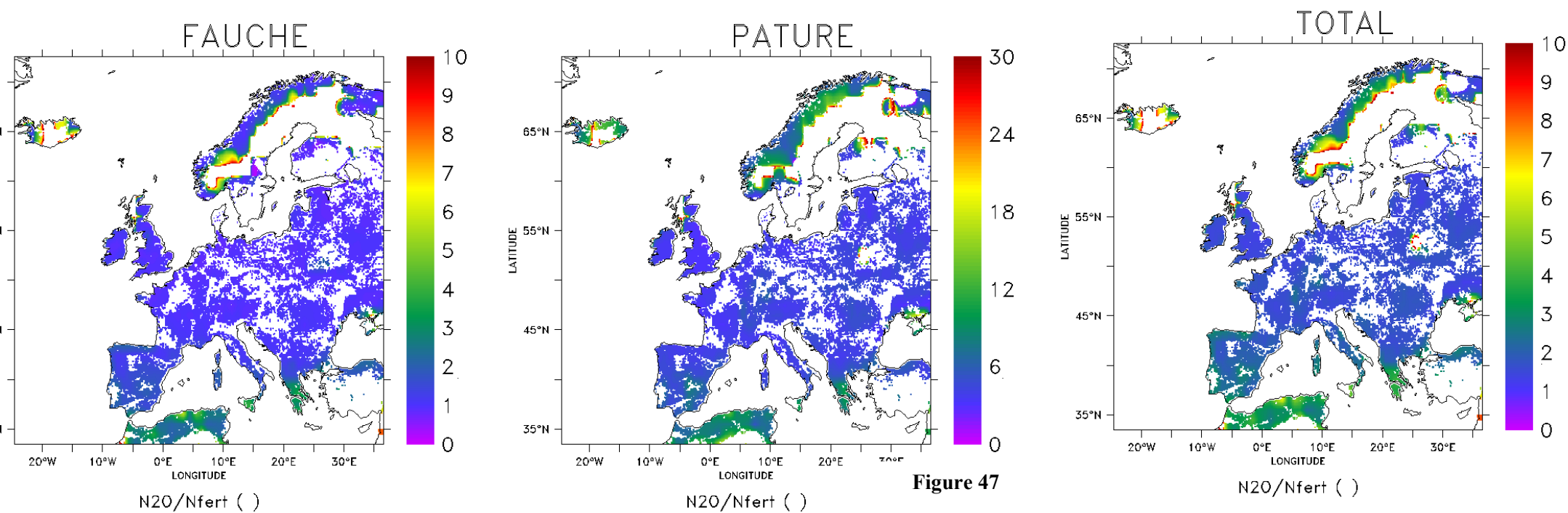
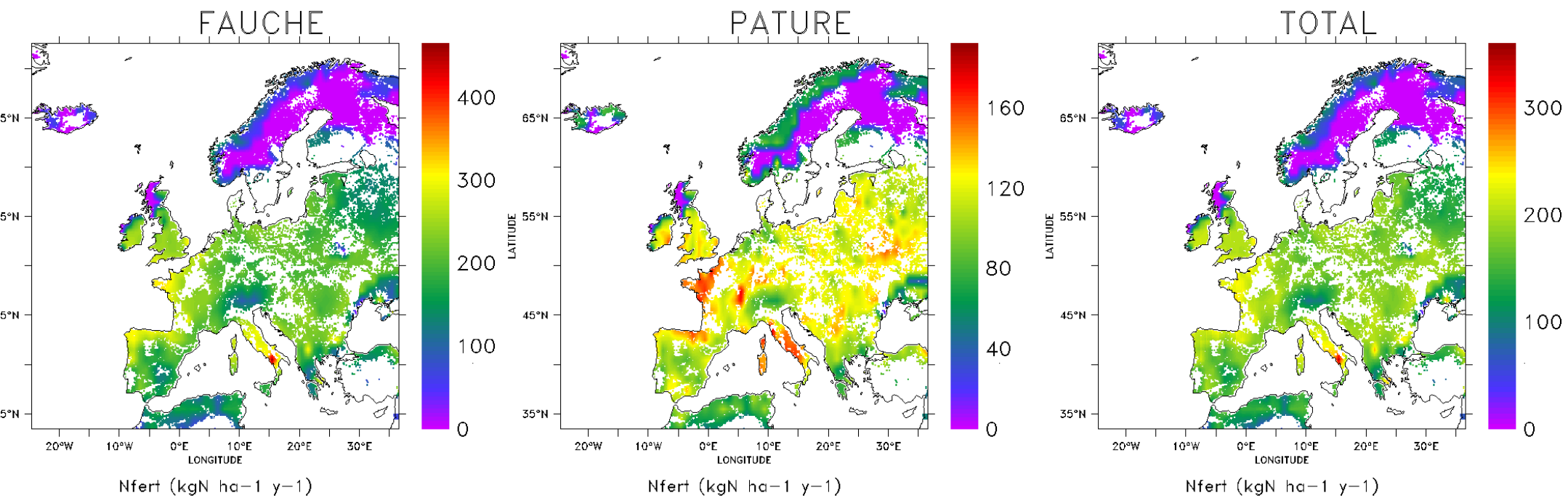
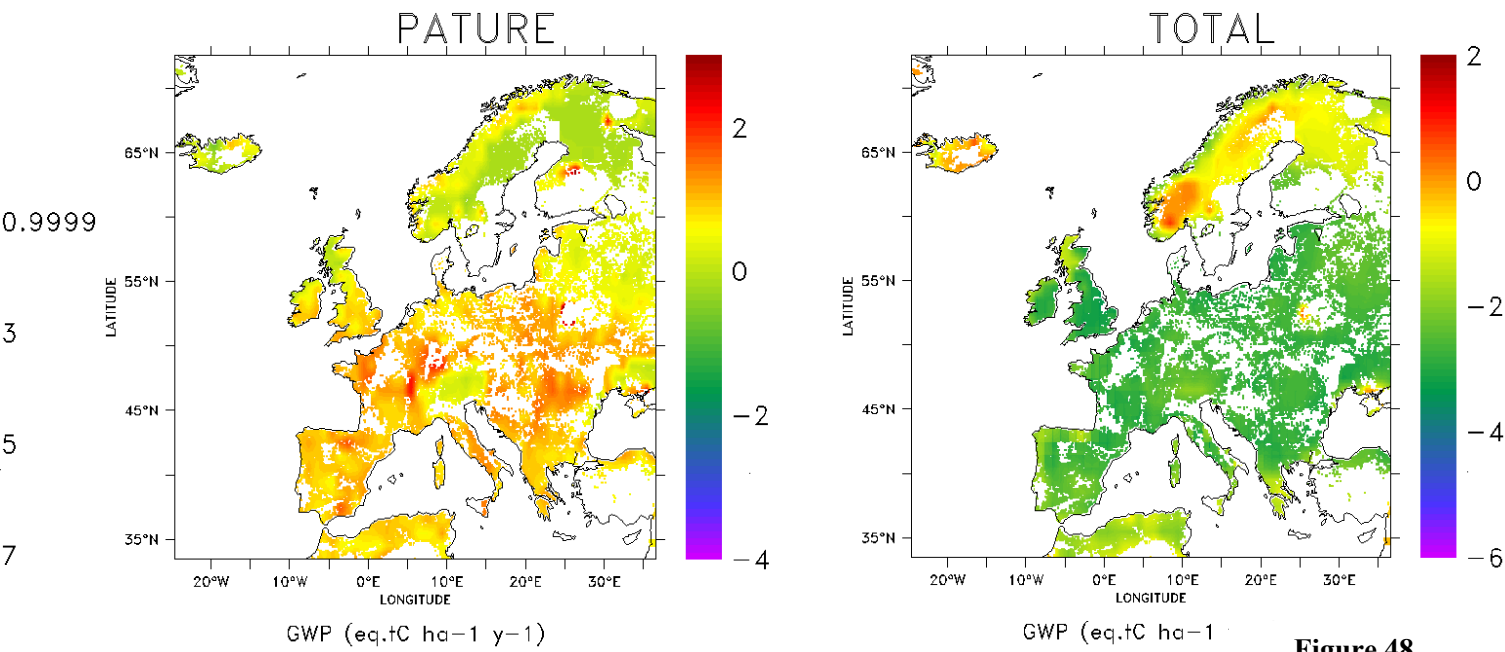
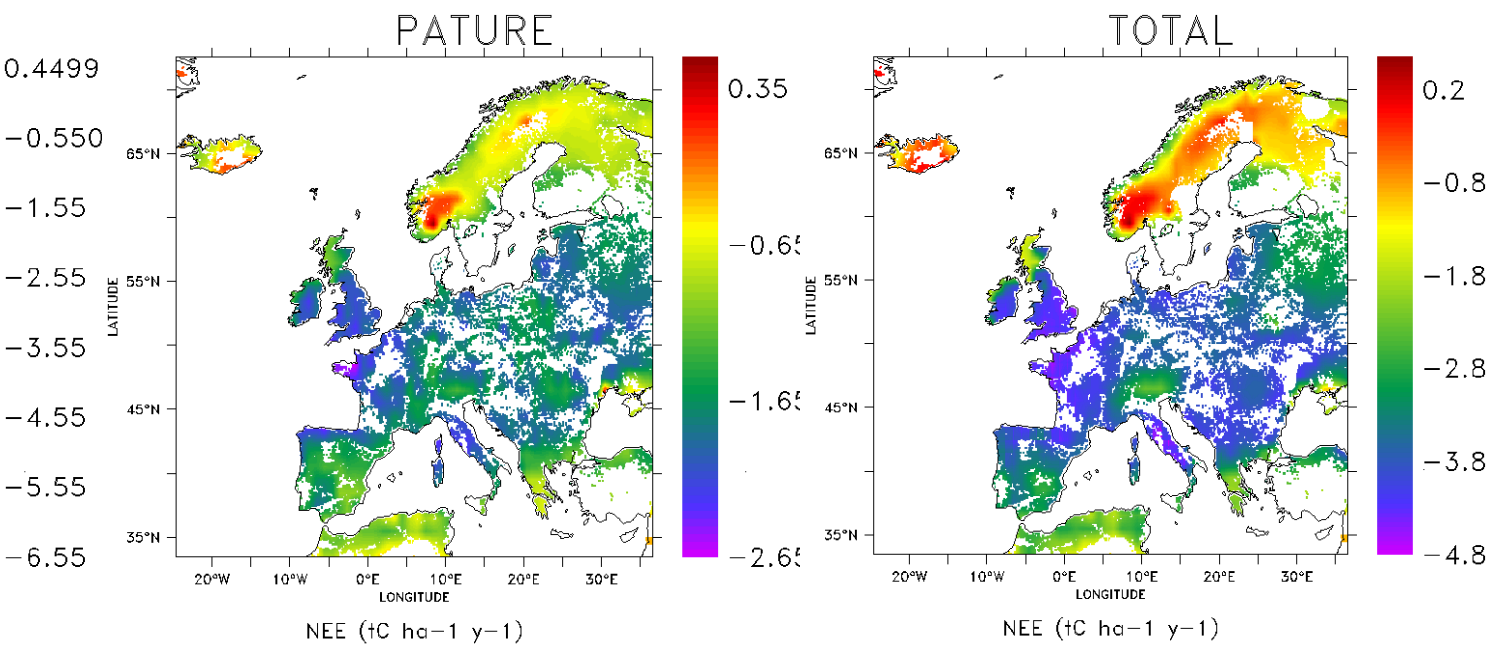


Figure 46





**Figure 47**



**Figure 48**

## 6. Publications & Communications

### 6.1. - Publications

Auteurs	Date	Titre de la publication	Journal	Reference
C. Martin, Y. Rochette, M. Fabre, J.P. Jouany	2000	Influence of cereal supplementation on methane production by sheep measured by the SF6 tracer method	<i>Reproduction Nutrition Development</i>	40 (2), 211
Pinarès-Patino C., Baumont R., Martin C.	2003	Methane emissions by charolais cows grazing a monospecific pasture of timothy at four stages of maturity	<i>Canadian Journal of Animal Sciences</i>	Sous-presse
Pinarès-Patino C., D'hour P., Martin C.	2004	Effects of grazing intensity on methane and carbon dioxide production by cattle	<i>Agriculture Ecosystems and Environment</i>	Sous-presse
Soussana JF., Loiseau P., Vuichard N., Ceschia E., Balesdent J., Chevallier C., Arrouays D.	2004	Carbon cycling and sequestration opportunities in grasslands	<i>Soil Use and Management</i>	Sous-presse
Salètes S., Fiorelli JL., Vuichard N., Olesen J., Soussana JF.	2004	Greenhouse gas balance of cattle farms using the FARMSIM model	<i>Agriculture, Ecosystems &amp; Environment</i>	En préparation

### 6.2. - Communications orales et posters

Auteurs	Date	Titre de la communication	Evénement	Type
Soussana, JF.	24 Novembre 2001	Greenhouse gas sinks and sources in European grasslands	COST 629 meeting, Ghent, Belgique	Présentation orale
Soussana JF., Loiseau P., Arrouays D.	28 Juin 2002	"Carbon cycling and sequestration opportunities in grasslands."	Soils as Carbon Sinks Session, British Society of Soil Science. Londres, Grande-Bretagne	Présentation orale
Soussana J-F, Berbigier P, Ceschia E, Falcimagne R, Martin C., Hénault C, Viovy N, Vuichard N, Farrugia A.	2002	Le projet GES Prairies. Sources et puits de gaz à effet de serre (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O) en prairie pâturée et stratégies de réduction.	Séminaire de restitution du programme GICC - Toulouse 2002	Présentation orale
Pinarès-Patino C.	11 Janvier 2003	Grazing intensity effect on methane and carbon dioxide production by cattle – Presentation of 2002 results relating to the GREENGRASS project	Conférence INRA-URH PhD et Post-doc	Présentation orale
Soussana JF, Loiseau P, Ceschia E, Teyssonneyre F, Falcimagne R	13 Mars 2003	Cycle du carbone en prairie, diversité fonctionnelle et environnement global	V <sup>èmes</sup> Journées d'Ecologie Fonctionnelle, Nancy, 12-14 Mars 2003.	Présentation orale et poster
Soussana JF. et al. *	20 mars 2003	Uncertainties in the greenhouse gas balance of temperate grasslands	CarboEurope 2 <sup>nd</sup> conference on the C Cycle, Lisbonne, Portugal	Présentation orale
Nicolas Vuichard	19-21 March 2003	Sensitivity analysis of simulated NEP of a grassland to management parameters and meteorological data	CarboEurope 2 <sup>nd</sup> conference on the C Cycle, Lisbonne, Portugal	Poster
Jouany J.P., Martin C.	5 Sept. 2003	Enteric methane (and CO <sub>2</sub> ) emissions by ruminants	Conférence CarboEurope-GHG, Clermont-Ferrand, France	Présentation orale
Nicolas Viovy	5 Sept. 2003	Modelling the greenhouse gases of croplands/grasslands at the european scale	Conférence CarboEurope-GHG, Clermont-Ferrand, France	Présentation orale
Ceschia E. et al.	7 Sept. 2003	Greenhouse gas fluxes from intensive vs. extensive grassland	COST 627 workshop in Clermont-Ferrand, France	Présentation orale

Fiorelli J.L., Hacala S. Salètes S., Gensac C	8 Sept. 2003	FARMSIM, a tool to collect and calculate the Ghg balance of a livestock far and evaluate mitigation options.	COST 627 workshop in Clermont-Ferrand, France	Présentation orale
Nicolas Vuichard	7-8 Sept. 2003	Sensitivity analysis of simulated NPP and NEP of European grasslands to management parameters and climate	COST Action 627	Poster
Pinarès-Patino C., Johnson K.A., Martin C.	15 Sept. 2003	Methane emission by charolais cows under minimised condition for selective grazing	Symposium on Energy and Protein Metabolism and Nutrition, Rostock, Allemagne	Présentation orale
Pinarès -Patino C., Martin C.	October 2003	Grazing intensity effect on methane and carbon dioxide production by cattle	Vith International Symposium on the Nutrition of Herbivores, Merida, Ycatan, Mexique	Poster
Soussana J.F. et al. *	5 November 2003	Carbon fluxes in grassland ecosystems	Symposium Biologische Senken für CO <sub>2</sub> in Deutschland, 4-5 November 2003, Braunschweig, Allemagne	Présentation orale
Soussana J.F. et al. *	29 Janvier 2004	First estimates of the greenhouse gas balance of European grasslands	FP6 CarboEurope-IP kick-off meeting, Speloto, Italie	Présentation orale
Salètes S. et al. *	12 Février 2004	Greenhouse gas balance of cattle farms using the FARMSIM model	International Conference on GHG emission from Agriculture, Leipzig, Allemagne	Présentation orale
Soussana J.F. et al. *	10 Février 2004	Annual greenhouse gas balance of European grasslands. First results from the 'GreenGrass' project	International Conference on GHG emission from Agriculture, Leipzig, Allemagne	Présentation orale
Soussana J-F, K Klumpp, F Teyssonneyre, R Falcimagne and P Loiseau, 2004.	25 Mars 2004	C Fluxes in Model Grassland Ecosystems Using <sup>13</sup> C Labelling Approaches	SIBAE-BASIN Conference, Interlaken, Suisse	Présentation orale

\* Soussana J.F., Pilegaard K., Ambus P., Berbigier P., Ceschia E., Clifton-Brown J., Czóbel S., de Groot T., Falcimagne R., Fuhrer J., Horváth L., Hensen A., Jones M., Kasper G., Martin C., Milford C., Nagy Z., Nefel A., Raschi A., Skiba U., Stefani P., Saletes S., Sutton M., Tuba Z., Weidinger T

### 6.3. - Rapports

Auteurs	Date	Titre de rapport	Reference
Soussana J-F, Berbigier P, Martin C, Falcimagne R, J-M Bonnefond, Jouany J-P, Germon J-C, J Lassalas	2000	Bilan des émissions de gaz à effet de serre (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O) en prairie pâturée et dans des exploitations d'élevage herbager	Rapport intermédiaire du programme GICC, Décembre 2000, 5 p.
Soussana J-F, Berbigier P, Ceschia E, Falcimagne R, Martin C., Hénault C, Viovy N, Vuichard N, Farrugia A	2002	Bilan des émissions de gaz à effet de serre (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O) en prairie pâturée et dans des exploitations d'élevage herbager	Rapport intermédiaire du programme GICC, Décembre 2002, 24 pp.
Soussana J-F, Berbigier P, Ceschia E, Falcimagne R, Martin C., Hénault C, Viovy N, Vuichard N, Farrugia A.	2003	Sources et puits de gaz à effet de serre (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O) en prairie pâturée et stratégies de réduction	Rapport intermédiaire de la seconde tranche du programme GICC, Mai 2003, 27 pp
Soussana et al. *	2002	Contrat européen EVK2-CT2001-00105 'GreenGrass', Sources and Sinks of greenhouse gases from managed European grasslands and mitigation strategies	First year project report, 125 pp

Soussana J-F et al. 2003*	2003	Contrat européen EVK2-CT2001-00105 'GreenGrass', Sources and Sinks of greenhouse gases from managed European grasslands and mitigation strategies	Second year project report. 112 pp.
---------------------------	------	--	-------------------------------------

\* Soussana J.F., Pilegaard K., Ambus P., Berbigier P., Ceschia E., Clifton-Brown J., Czobel S., de Groot T., Falcimagne R., Fuhrer J., Horváth L., Hensen A., Jones M., Kasper G., Martin C., Milford C., Nagy Z., Neftel A., Raschi A., Skiba U., Stefani P., Saletes S., Sutton M., Tuba Z., Weidinger T

## 6.4. - Presse & Salons

Auteurs	Date	Titre	Journal / Télévision / Radio / Evénement	Type *
S. Salètes	Février 2002	Prairies et flux de gaz à effet de serre	Le Paysan d'Auvergne	Article
E. Ceschia, R. Falcimagne, C. Pinares, S. Salètes	Juin 2002	Mesures de flux de gaz à effet de serre sur une prairie auvergnate	France 3 Auvergne	Reportage 3'
E. Ceschia, R. Falcimagne, F. Teyssonneyre, S. Salètes	Decembre 2002	Sequestration de carbone en prairies pâturées: le point sur les recherches en cours	France 2 - Edition nationale	Reportage 2'30 journal de 20h00
Collectif GICC INRA et Service de Communication INRA	Février 2002	"Le Climat change, la nature et l'agriculture aussi !" Quels impacts ? Quelles adaptations ?	Salon de l'Agriculture 2003	Brochure destinée au grand public
S. Salètes, E. Ceschia, R. Falcimagne, F. Teyssonneyre	Février 2003	Prairies et flux de gaz à effet de serre	Animation du stand INRA "Le Climat change, la nature et l'agriculture aussi !" au Salon de l'Agriculture 2003	Animation de stand
S. Salètes	Mars 2003	Prairies et flux de gaz à effet de serre	France 3 Poitou-Charente	Reportage 2'
JF. Soussana, S. Salètes	Août 2003	Les prairies, frein ou accélérateur de l'effet de serre ?	La Montagne	Article
E. Ceschia, R. Falcimagne, S. Salètes	Septembre 2003	Sequestration de carbone en prairies pâturées: bilan des mesures 2002-2003	France 3 Auvergne	Reportage 3'30
JF. Soussana	Septembre 2003	L'INRA scrute les prairies	L'Auvergne Agricole	Article
C. Martin	Octobre 2003	La vache n'a pas mauvaise haleine	La Montagne	Article
R. Falcimagne, S. Salètes, Soussana JF.	Octobre 2003	Sequestration de carbone en prairies pâturées: bilan du projet GICC Ges-Prairies	Clermont Auvergne	Reportage 2'00
JC. Germon	Octobre 2003	18ù des gaz à effet de serre sont dus à l'agriculture	Réussir Bovins Viande	Article
C. Martin	Novembre 2003	Une conduite extensive au pâturage produit plus de méthane qu'une conduite intensive avec concentrés	Le Paysan d'Auvergne	Article
R. Falcimagne	Février 2004	Sequestration de carbone en prairies pâturées: le point sur les recherches en cours à l'INRA	France Bleu Auvergne	Reportage 6'00
Collectif GICC-Ges Prairie en collaboration avec le projet GREENGRASS	En préparation	Rôle des prairies dans les flux de gaz à effet de serre et scénarios agricoles possible de réduction des émissions - Brochure couleur destinés aux intervenants du monde agricole		Brochure traduite en plusieurs langues

## 6.5 - Site web

[www.clermont.inra.fr/greengrass](http://www.clermont.inra.fr/greengrass)

Le site web du projet GREENGRASS contient une section publique qui présente les activités, objectifs et plan de travail du projet. Le site inclus également une section restreinte contenant l'ensemble des rapports, comptes-rendus de réunion, protocoles, présentation et documents contractuels.

## 7. Disponibilité des données

Les données seront mises à disposition après les dernières publications. Leur archivage a été entrepris sous la forme d'une base de données commune aux équipes du projet européen GreenGrass et accessible sur le site web du projet européen GREENGRASS :

[www.clermont.inra.fr/greengrass](http://www.clermont.inra.fr/greengrass)

Les données du site expérimental de Laqueuille sont classées dans 8 dossiers en fonction du type de données :

- **Site-Description** (information générale sur le site de Laqueuille, incluant carte du site et profil de sol)
- **Flux-Chamber-TDL** (flux de N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> du sol)
- **Flux-Mast-EC** (flux de CO<sub>2</sub> par la méthode des corrélations turbulentes)
- **Management** (gestion et pratiques agricoles effectuées sur les parcelles extensives et intensives du site expérimental)
- **Meteo** (données climatiques)
- **Sward** (caractéristiques chimiques du couvert végétal, compositions botaniques, et ingérés au pâturage)
- **Soil-one-off** (données sur le sol - analyses effectuées au début des mesures et non suivies: texture, densité...)
- **Soil-regular** (données sur le sol - analyses effectuées en continue)
- **Pollution** (déposition NH<sub>3</sub> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)

## 8. Résultats valorisables dans le site internet GICC

Les résultats synthétiques présentés ci-dessous pourraient être proposés pour le site WEB de GICC :

- Bilan de GES sur les parcelles pâturées du site de Laqueuille : figure 26
- Bilan de GES d'une ferme d'élevage : figures 44 et 45
- Bilan de GES des prairies européennes fauchées et pâturées simulé à l'aide du modèle PASIM (cf. Section 4.4.6)

## 9. Références bibliographiques

Aubinet M., Grelle A., Ibrom A. *et al.* (2000). Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research*, **30**, 113-175.

Falge E., Baldocchi D., Olson R. *et al.* (2001) Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, **107**, 43-69.

Garcia F., Carrère P., Soussana J.F., Baumont R. (2003) The ability of sheep at different stocking rates to maintain the quantity and quality of their diet during the grazing season. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, **140**, 113-124.

Johnson K., Huyler M., Westberg H., Lamb B., Zimmerman P. (1994) Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF<sub>6</sub> tracer technique. *Environmental Science and Technology*, **28**, 359-362.

Lemaire G., Gastal F. (1997) N uptake and distribution in plant canopies. In : Lemaire G. ed. *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, (3-44).

Riedo M., Grub A., Rosset M., Fuhrer, J. (1998): A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy. *Ecological Modeling*, **105**, 141-183

Schmid H.P., Lloyd C.R. (1999) Location bias of flux measurements over inhomogeneous areas, *Agricultural and Forest Meteorology*, **93**, 195-209.

Soussana J.F., Loiseau P., Vuichard N., Ceschia E., Balesdent J., Chevallier T., Arrouays D. (2004) Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management*, in press

Thornley JHM (1998) *Grassland Dynamics: An Ecosystem Simulation Model*. CAB International, Wallingford.