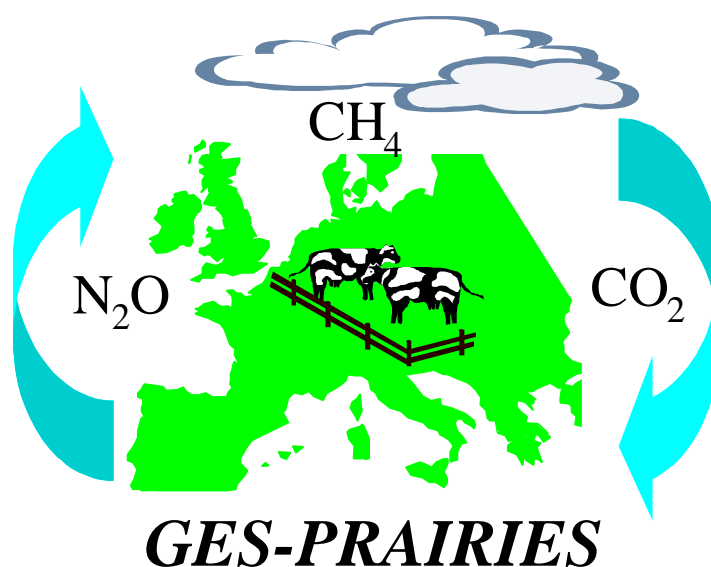


**PROGRAMME
GESTION DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

Bilan des émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O) en prairie pâturée et dans des exploitations d'élevage herbager



**Rapport de la première tranche du projet
Décembre 2002**

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
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 [CO₂ et CH₄](#) (par les ruminants au pâturage) et de N₂O (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⁻¹ an⁻¹ 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 CO₂) n'est pas connue à l'échelle nationale.

Le projet GES-Prairies a pour objectif d'établir un inventaire détaillé de la contribution nette des prairies françaises aux flux de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O) et d'évaluer les possibilités de réduction de ces émissions nettes par des adaptations des systèmes d'élevage.

Trois gaz à effet de serre interviennent dans les échanges avec l'atmosphère dans une prairie pâturée : CO₂ (échangé avec [les animaux](#), le sol et la végétation), N₂O (émis par le sol), CH₄ (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.

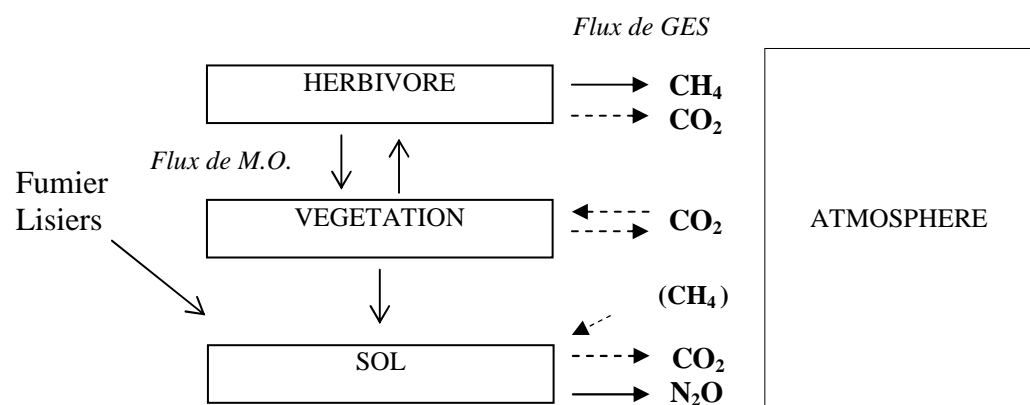


Figure 1. Représentation schématique des flux de gaz à effet de serre (GES) et des principaux flux de matière organique (MO) dans une prairie pâturée.

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). Les variations des stocks de carbone du sol, et non les flux de CO₂, sont inventoriées dans le cadre de l'Article 3.4. Les flux de CH₄ échangés avec le sol sont habituellement faibles en prairie.

2. Résumé & équipes participantes

2.1. - Résumé

Le projet GES-Prairies a donc pour premier objectif de réduire les incertitudes concernant les estimations des flux de CO₂, CH₄ et N₂O de prairies soumises à différentes gestions et de déterminer la résultante de ces flux en termes de pouvoir de réchauffement global.

Le second objectif du projet est de construire et d'évaluer des scénarios de gestion permettant de réduire les émissions nettes des fermes d'élevage à l'herbe. Pour le site étudié expérimentalement, des scénarios permettant de comparer entre eux des systèmes d'élevage plus ou moins intensifs et utilisant plus ou moins la prairie pâturée sont construits.

Grâce à des simulations avec le modèle PASIM, on estime le bilan de GES de différents systèmes d'élevage, en tenant compte des émissions (CH₄, CO₂) des vaches en stabulation et de celles (CH₄, N₂O) provenant des effluents d'élevage. Il devrait ainsi être possible de fournir de premières indications concernant les effets d'une plus grande autonomie fourragère (réduction des achats de concentrés et de fourrages) et/ou d'une extensification (diminution du chargement moyen à l'hectare) sur le bilan de GES d'élevages laitiers ou allaitants. *La démarche de modélisation* est entreprise à trois échelles complémentaires (parcelle, exploitation d'élevage, région) afin d'obtenir des cartes dynamiques des émissions nettes de GES des prairies françaises à une maille de 60 x 60 kms.

Le calendrier d'exécution suivant avait été défini (cf. réponse à l'appel d'offres 1999) et a été suivi :

- **1999.** Choix des parcelles. Mise au point des protocoles de mesure CO₂, CH₄, N₂O. Fabrication du matériel pour les prélèvements CH₄, acquisition des équipements pour les mesures micrométéorologiques, équipement des sites de mesure. [Caractérisation du site de mesure.](#)
- **2000.** Installation des capteurs micrométéorologiques CO₂ et premières mesures. Premières mesures sur animaux au pâturage. Mise au point (protocole d'échantillonnage) des mesures en chambre au sol de N₂O. Mise au point des modèles CO₂ et N₂O. Réunion annuelle du projet et rapport d'étape.

Ce projet de la première tranche GICC a permis de préparer un projet de seconde tranche qui a démarré fin 2001. Les financements de première tranche correspondaient seulement à de l'équipement et à des missions. Nous ne présentons donc que peu de résultats pour cette première période.

- 2001. Premières mesures de flux de CO₂ sur une parcelle unique et des émissions de CH₄ et CO₂ par les ruminants.
- 2002. Campagne complète de mesures des flux de CO₂, N₂O et CH₄. Comparaison de deux modes de gestion des prairies (Intensive et Extensive) et calcul du bilan des émissions en terme de pouvoir de réchauffement global. Suivi des productions de fourrage en relation avec les émissions de GESs. Caractérisation des sous-parcelles de mesure et établissement des protocoles de prélèvement d'échantillons de sol et de végétation.

2.2. - Equipes participantes

Le projet de premièreans ses deux phases (1999-2001 et 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).

- INRA Clermont-Ferrand – Unité Agronomie
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)
 - Ing. Pascal d'Hour (gestion animalière sur le site)
 - Dr. Eric Ceschia (suivi des mesures, traitement des données de flux et de production fourragères)
 - Ing Sloan Saletes (assistant coordinateur)
- INRA Bordeaux – Bioclimatologie
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
17, rue Sully BV 86510 - 21065 Dijon cedex, France
 - Dr. Catherine Hénault (Suivi des variations saisonnières des flux de N₂O et étude de la microbiologie des sols).
- INRA Grignon – Environnement et Grandes Cultures
78850 Thiverval - Grignon – France
 - Dr. Pierre Cellier (étude de la variabilité spatiale des flux de N₂O par l'utilisation de TDL)
 - Dr. Patricia Laville (mesure des flux de N₂O par l'utilisation de TDL)

- INRA Theix – Herbivores Unit
63122 Saint-Genès-Champanelle, France
 - Dr. Cécile Martin (étude des émissions de CH₄ et CO₂ par les ruminants en fonction de la digestibilité du fourrage)
 - Dr. César Pinares (étude des émissions de CH₄ et CO₂ par les ruminants en fonction de la digestibilité du fourrage)

- INRA Mirecourt – Systèmes Agraires et Développement
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)

- 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)
 - Nicolas Vuichard (Doctorant)

- Institut de l'élevage
Theix, 63122 Saint-Genès Champanelle, France
 - Ing. Anne Farruggia (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 CO₂, CH₄ et N₂O ont été prévues-effectuées dans des prairies pâturées par des troupeaux bovins :

- mesure continue des flux de CO₂ par la méthode des corrélations turbulentes,
- mesure des émissions de méthane et de CO₂ par les vaches au pâturage,
- campagnes ponctuelles de mesure des flux de N₂O par la méthode des fluctuations turbulentes et suivi régulier des flux de N₂O à l'échelle du mètre carré.

Ces mesures avaient initialement été proposées dans deux sites, correspondant à des domaines expérimentaux de l'INRA (Laqueuille, 63; Mirecourt, 88). Suite aux recommandations du Conseil Scientifique de GICC, et aux moyens alloués en 1999 (224 kF H.T. à mettre en rapport avec une demande de 580 kF), nous avons choisi de concentrer les mesures sur un seul site, correspondant au Domaine INRA de Laqueuille (63).

Une parcelle («Les Percières»), de 7 ha environ ([Fig. 3](#)), 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).

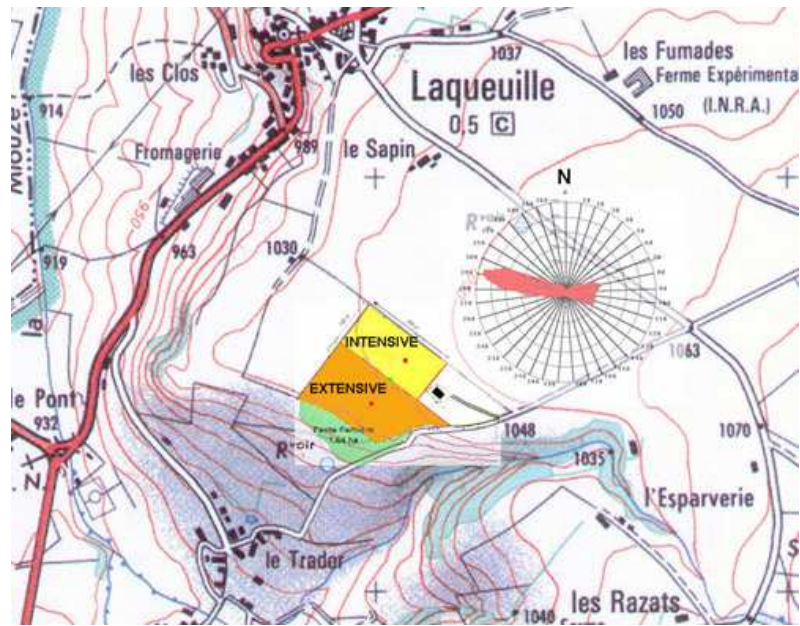


Figure 2. *Plan de la parcelle des Percières* (7,68 ha, domaine expérimental de Laqueuille, 63). Rose des vents, localisation approximative des deux mâts micrométéorologiques (en rouge, hauteur de 2,7 m) et de la station météorologique (en vert) à partir de 2002. Les traitements de pâturage continu mis 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.

Cette parcelle, de par sa dimension et son homogénéité, permettra à 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. Le mode de pâturage retenu correspond à un pâturage rotatif continu (durée de repousse de 20-30 jours), avec un chargement annuel de 1,2 UGB par hectare. La comparaison de eAu cours de la deuxième phase expérimentale, le chargement témoin et d'a été comparé à un chargement réduit à 0,7 – 0,8 UGB par hectare (extensification) apporterait en 2002. La parcelle initiale à été séparée en deux sous-parcelles de 3.8 ha (pâturage extensif) et 2.8 ha (pâturage intensif). des références intéressantes et sera entreprise, si les moyens le permettent, dans une seconde phase.

La mise au point des différentes techniques de mesure est en cours cette année a été effectuée en 2000 sur eetela parcelle principale, après une phase de mise en route consacrée à l'instrumentation du site (mise en place d'un mât de mesure micro-météorologique).

3.1.1. - Mesure des flux de CO₂

La parcelle des « Percières » a été instrumentée en plusieurs étapes, de manière à obtenir les données nécessaires au calcul des échanges de CO₂ 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 CO₂ à 3-4.5 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.



Figure 3. Instrumentation d'un des mâts de mesures micrométéorologiques en 2002

L'équipement suivant a été mis en place (Figure 2):

- ~~- mat de 4 m 50 de hauteur,~~
- ~~- complément d'acquisition des données micro-météorologiques : rayonnement, vitesse et direction du vent,~~
- ~~- mesure de la concentration en CO₂ par un analyseur infra-rouge rapide (LI-COR 6262),~~
- ~~- anémomètre sonique. Ce matériel nous a finalement été prêté, pour cette année, par un autre service de l'INRA,~~
- ~~- 2 micro-ordinateurs avec disque dur amovible, l'un pour le terrain, l'autre pour décharger les données au labo.~~

3.1.2. - Mesure des émissions digestives de méthane par des ruminants

Les émissions digestives de méthane par des ruminants sont mesurées par Cécile Martin *via* la technique d'ingestion d'un traceur SF₆ (hexafluorure de soufre, Johnson *et al* 1994, Environ. Sci. Technol., 28, 359-362) (Fig.4). Le SF₆ relâché progressivement par la capsule ingérée par l'animal se combine au CH₄ produit dans le rumen. Ces deux molécules combinées sont collectées au niveau des naseaux de l'animal grâce à un collier de prélèvement 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. La quantité de SF₆ total ingéré par l'animal étant connue, il est possible d'estimer la production de méthane par l'animal. Un collier témoin permet de mesurer le CH₄ ambiant sur la parcelle. Les échantillons de gaz sont analysés par chromatographie en phase gazeuse. Ce dispositif permet aussi de mesurer le CO₂ respiré par les ruminants.

La technique a été adaptée aux bovins et utilisée en grandeur réelle sur un lot de 6 génisses en 2001, pâturant au fil d'une prairie à des stades phénologiques successifs (végétatif, montaison, début d'épiaison, épiaison, voir Annexe 1). Les méthodes employées pour l'étude de la digestibilité du fourrage, effectuée en parallèle avec les mesures d'émissions de méthane, sont détaillées dans l'Annexe 1.

En 2002, ces mesures ont été réalisées toutes les trois semaines sur 14 génisses (7 sur chaque traitement) pâturant en continu.

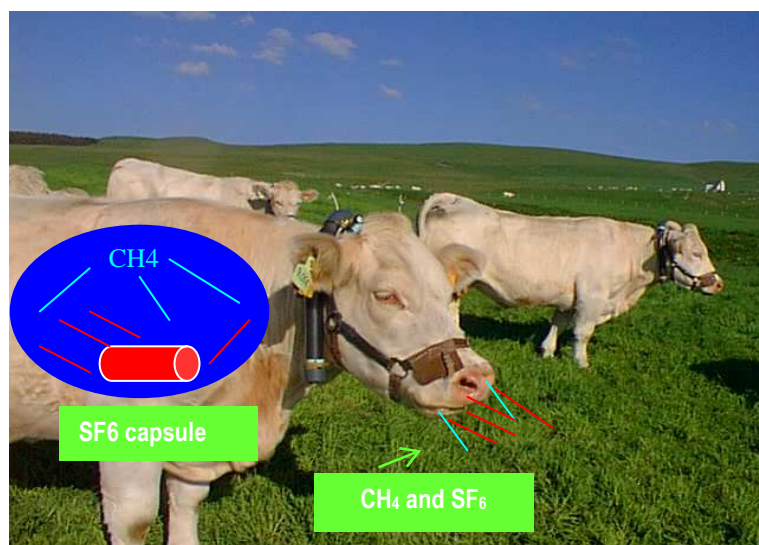


Figure 4. Méthode de mesure des émissions entériques de méthane chez une vache par la technique SF₆

3.1.3. - Mesure des émissions de N₂O par les sols prairiaux

Les premières mesures de flux de N₂O 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 5. Chambres de mesure des émissions de N₂O à Laqueuille en 2002

Ainsi, en 2002, l'étude des variations saisonnières des émissions de N₂O 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 (Fig. 5). Des échantillons de gaz étaient prélevés dans des tubes de verre sous vide. Les gaz récoltés (CO₂ et N₂O) 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, une campagne ponctuelle (2 semaines) d'étude de la variabilité spatiale des flux de N₂O a été entreprise en Septembre 2002. Des mesures des flux ont été effectuées grâce à un système de détection par diode laser ajustable (Fig. 6) couplées 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 N₂O.



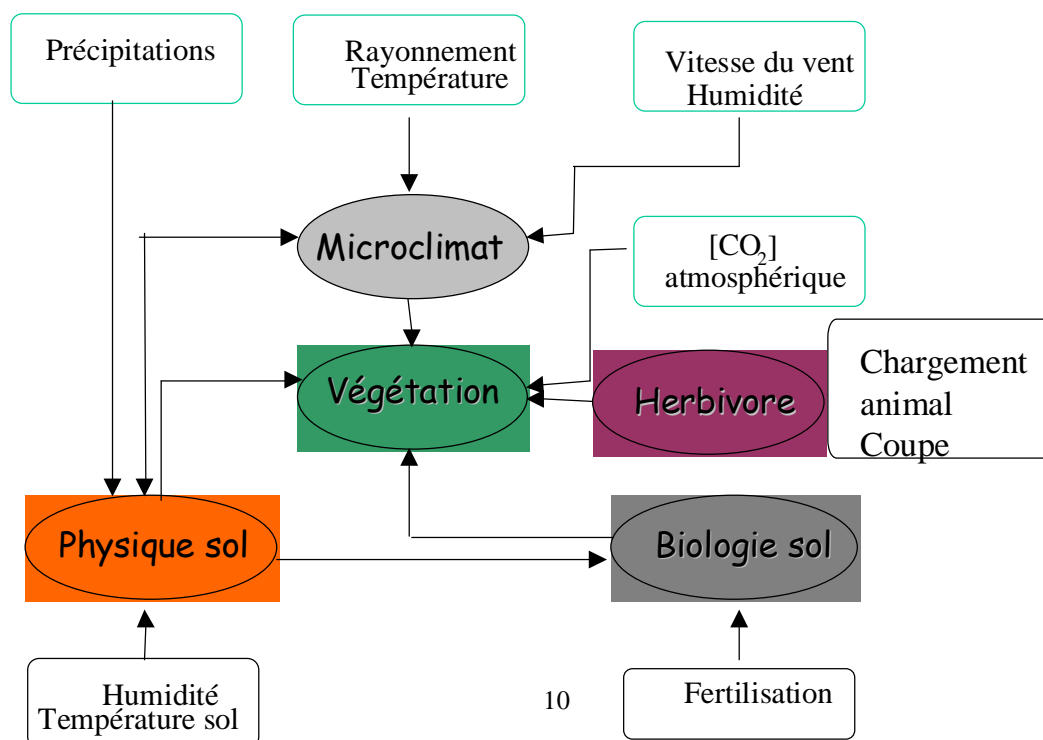
Figure 6. Caravane abritant le système TDL et chambre de mesure utilisée pour étudier les variations spatiales des émissions de N₂O lors de la campagne de mesure à Laqueuille en Septembre 2002

Une nouvelle campagne de mesure de la variabilité spatiale des émissions de N₂O aura lieu au printemps 2003. Lors de cette campagne, la variabilité des émissions sera comparée à la variabilité des teneurs en nitrate ou en ammonium dans le sol (teneurs déterminées grâce à des résines anioniques et cationiques), correspondant à des déjections animales. La variabilité spatiale observée conduira dans la suite de ce programme à réaliser un échantillonnage stratifié de la parcelle. Les zones du sol à forte teneur en nitrate ou en ammonium seront échantillonnées ainsi que des zones témoin à faible teneur de manière à étudier leurs émissions de N₂O en distinguant les contributions respectives de ces deux types de zones dans la parcelle ainsi que leurs dynamique saisonnière (collaboration avec Jean-Claude Germon et Catherine Hénault).

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) (Fig. 7).



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).

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 $230 \text{ kgN ha}^{-1}\text{an}^{-1}$ 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.

3.2.3 Echelle des exploitations d'élevage

Il s'agit d'estimer le bilan des émissions nettes de GES pour les exploitations d'élevage type, correspondant au site étudié. Une première étape consiste à déterminer le calendrier moyen de pâturage des exploitations d'élevage de la région (Fig. 7). Ces données moyennes, dont on trouvera un exemple simplifié ci-dessous, sont issues du suivi par l'Institut de l'Élevage de réseaux d'élevages de bovins allaitants.

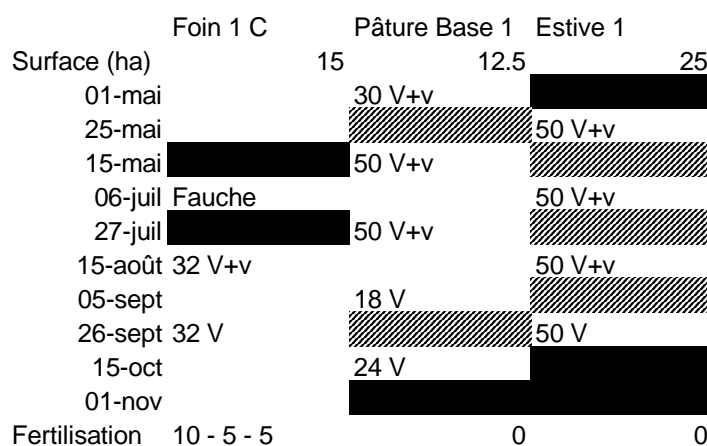


Figure 7. *Calendrier type d'exploitation* (V, vache ; v, veau ; race Limousine)

La construction de bilan de GES à l'échelle de l'exploitation n'a pas été réalisée au cours de la première phase du projet. Elle sera réalisée dans le cadre du projet de seconde phase, ainsi que le passage à l'échelle régionale en collaboration notamment avec le LSCE (Nicolas Viovy et Philippe Ciaï) et avec l'Institut de l'Élevage (Anne Farrugia).

Dans le cadre du projet de seconde phase, Nicolas Vuichard entame une thèse co-encadrée par Nicolas Viovy et Jean-François Soussana et qui aura pour objectif de coupler une version améliorée et simplifiée du modèle PASIM avec le modèle ORCHIDEE et d'effectuer des simulations sur une maille de 60*60 kms, en utilisant les données de climat, de sol et de végétation disponibles au LSCE et en utilisant des données sur les systèmes d'élevage recueillies dans différents réseaux (Institut de l'Élevage et INRA) de suivi de fermes d'élevage de bovins et d'ovins.

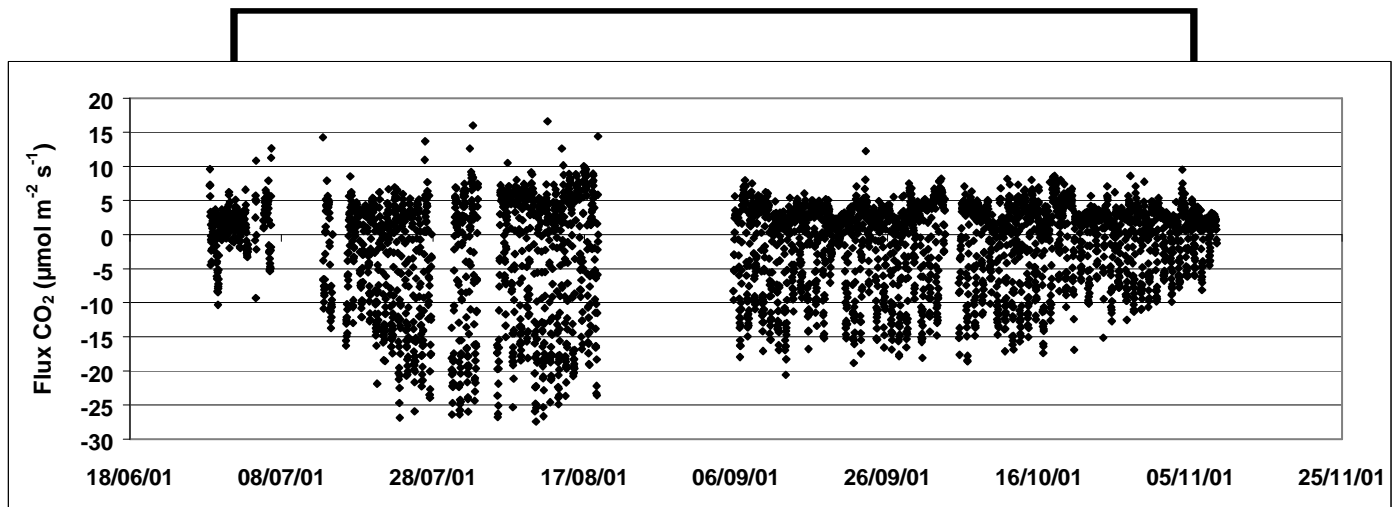
D. Résultats

5.1. - Mesure des flux de CO₂

Une [La](#) première campagne de mesures ([2000](#)) a été entamée avec la collaboration de l'UR de Bioclimatologie (INRA Bordeaux). Elle [avait](#) pour objectif d'optimiser plusieurs paramètres de la mesure :

- distance du point de prélèvement par rapport aux bords de la parcelle,
- hauteur de l'anémomètre et du point de prélèvement de l'IRGA,
- analyse de l'hétérogénéité du signal selon la direction du vent (sans, puis avec un troupeau).

La campagne 2001 a permis d'étudier la dynamique saisonnière des flux de CO₂ sur une parcelle unique (Fig. 8). En général, le site semble agir comme un puits de CO₂ durant la période estivale. L'étude des directions et vitesses de vent ont aussi permis d'optimiser l'orientation des sous-parcelles lors de la mise en place des traitements intensifs et extensifs



L'analyse par [Paul Berbigier \(INRA Bordeaux\)](#) des spectres de vent indique une forme quasi-parfaite. Cette analyse a permis de confirmer la forme spectrale. En bas de parcelle. Les données manquantes (liées à des pannes d'ordinateur suite à des orages) doivent être extrapolées afin d'estimer le bilan annuel de carbone pour la parcelle.

L'analyse par Paul Berbigier (INRA Bordeaux) des spectres de vent indique une forme quasi-parfaite. Après dépouillement des résultats de l'automne 2000, il apparaît que le système fermé de mesure de la concentration en CO₂ induit une sous-estimation des flux de l'ordre de 25%. Cette sous-estimation assez faible (du même ordre que celle obtenue sur forêt au site du Bray) peut être facilement corrigée.

Lors de la saison 2002, la parcelle principale fut scindée en 2 sous-parcelles sur lesquelles ont été appliqués des pâturage intensifs (1.6 UGB ha⁻¹ an⁻¹) et extensifs (0.7 UGB ha⁻¹ an⁻¹). D'une manière générale, on a pu observer que les flux de CO₂ étaient sensiblement identiques sur les deux parcelles. Dans le but de maximiser la part des flux mesurés au niveau des mâts qui proviennent de l'intérieur des parcelles, la hauteur des mâts fut abaissée de 4.5 m à 2.7 m. Une étude des empreintes de mesure (via un modèle théorique développé par Schmid et Lloyd, 1999 et modifié par Aubinet et al., 2001) a mis en évidence que sur les parcelles Extensives et Intensives, 63 et 50% des flux mesurés par les mâts proviennent de l'intérieur de ces mêmes parcelles. Une nouvelle diminution de la hauteur de mesure des mâts permettra d'accroître le pourcentage de flux mesurés qui sont effectivement émis à l'intérieur des parcelles et facilitera la comparaison des flux entre traitements.

En 2002, 21 et 50% des données furent perdues sur les parcelles d'exploitation Extensive et Intensive entre Mai et Septembre suite à de violents orages (Fig. 9). La mise en place d'alimentations sur batteries rechargées en continu, dès Septembre, a permis de réduire considérablement les pertes de données de flux. Par ailleurs, un système d'alarme téléphonique en cas de coupure de l'alimentation permet à présent de réduire les risques de pertes de données. Ainsi le système de mesure s'avère maintenant suffisamment fiable pour effectuer un bilan annuel d'émissions de CO₂.

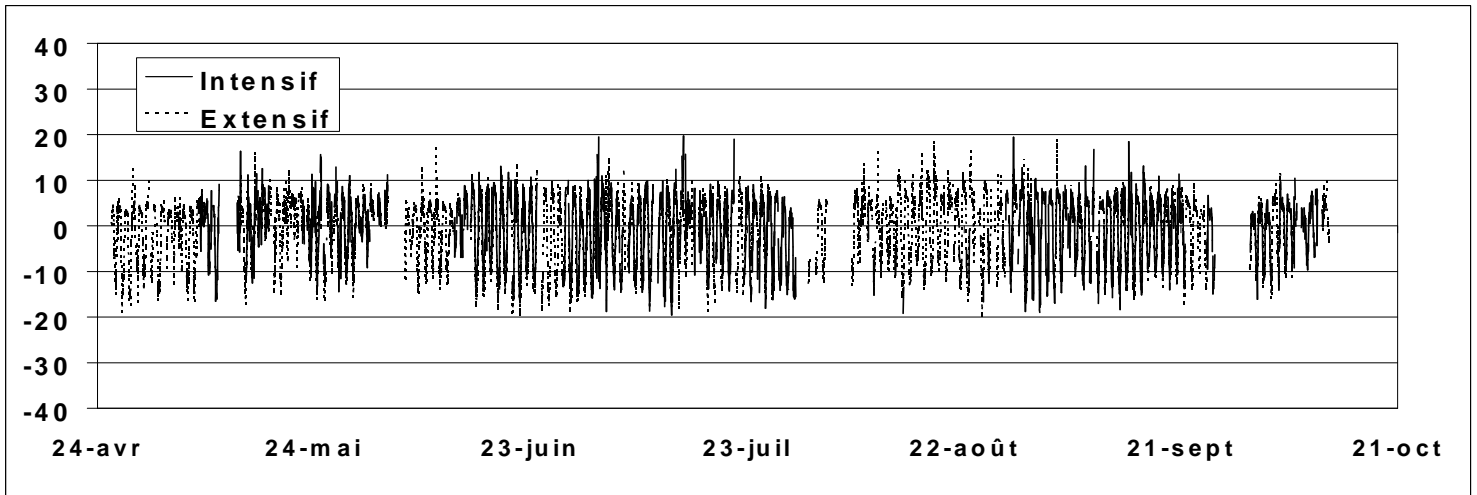


Figure 9. *Variation saisonnière des flux de CO₂ (en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) à Laqueuille en 2002*

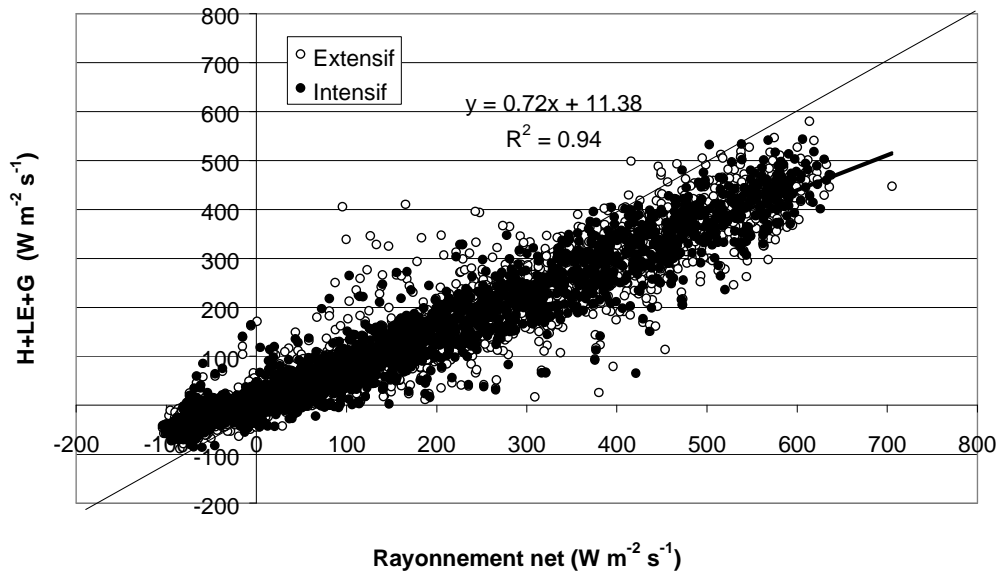


Figure 10. *Analyse de la fermeture du bilan d'énergie sur les parcelles Intensive et Extensive à Laqueuille en 2002: H représente le flux de chaleur sensible, LE, le flux de chaleur latente d'évaporation et G le stockage de chaleur dans le sol. La somme de ces trois termes est théoriquement égale à l'énergie solaire reçue par la parcelle (Rayonnement net).*

Après dépouillement des résultats de l'automne 2000 et de la saison 2002, il apparaît que les systèmes de mesure de la concentration en CO₂ fermé et ouvert, pourraient induire une sous-estimation des flux de l'ordre de 25 et 28% (Fig. 4), respectivement. Ces sous-estimations sont assez faibles (du même ordre que celle obtenue sur forêt au site du Bray près de Bordeaux) et peuvent être facilement corrigées.

5.2. - Mesure des émissions digestives de méthane et de CO₂ respiré par des ruminants

Les premières mesures ont été réalisées par Cécile Martin chez des ovins et les bovins par la technique d'ingestion d'un traceur SF₆ (hexafluorure de soufre, Johnson *et al* 1994, Environ. Sci. Technol., 28, 359-362). Chez les ovins, les mesures ont été conduites durant une période de 12 h et ont été répétées pendant 5 jours consécutifs sur 4 brebis en 2000. Les émissions mesurées de méthane atteignent de 39 ± 16 l/j à 46 ± 8 l/j selon le régime alimentaire des brebis. Ces émissions correspondent à des pertes de 6,3 à 7,9 % de l'énergie brute digestive.

Ces mesures préliminaires ont permis de valider la technique utilisée, puisqu'elle a donné des résultats comparables à ceux obtenus par une technique de référence, qui n'est toutefois pas applicable pour des animaux au pâturage (chambres de mesure de la respiration). Ces premiers résultats ont fait l'objet d'une communication courte (voir section F).

Les émissions de méthane par des bovins au pâturage ont aussi été mesurées en 2001 sur une graminée prairiale (dactyle) en culture pure dont la teneur en fibres variait au cours du temps selon son stade de développement. A l'auge les émissions de méthane augmentent avec la teneur en fibres (NDF, Neutral Detergent Fibers) dans la ration (Kirchgessner *et al.*, 1994), qui est elle même modifiée par le stade de développement des graminées.

Les résultats de cette expérience préliminaire ont permis de montrer :

- que le coefficient de variation entre animaux de l'émission journalière de méthane mesurée avec la technique SF₆ est de 10 % environ,
- que la production de CH₄ varie avec le stade de développement (Fig. 11), atteignant un maximum en fin de montaison.

L'étude des quantités ingérées par les herbivores (traceur Yterbium) et de la digestibilité de l'herbe pâturée (méthode azote fécal, cf. Annexe 1) devrait permettre de comparer ces résultats d'émission de méthane avec ceux qui sont obtenus à l'auge lorsque l'on fournit le même type de ration à un bovin en chambre respiratoire.

En 2002, les émissions de méthane de génisses furent mesurées au pâturage dans les deux traitements (Intensif et Extensif) comparés sur le site de Laqueuille, par périodes de 10 jours environ en Juin, Juillet, Août et Septembre 2002 (période correspondant au pâturage). Les émissions de CH₄ et de CO₂ ne différaient pas d'un mois à l'autre et elles n'étaient pas significativement différentes pour les deux traitements, excepté en Juin, où les émissions étaient supérieures pour le traitement de pâturage continu intensif (Fig. 12).

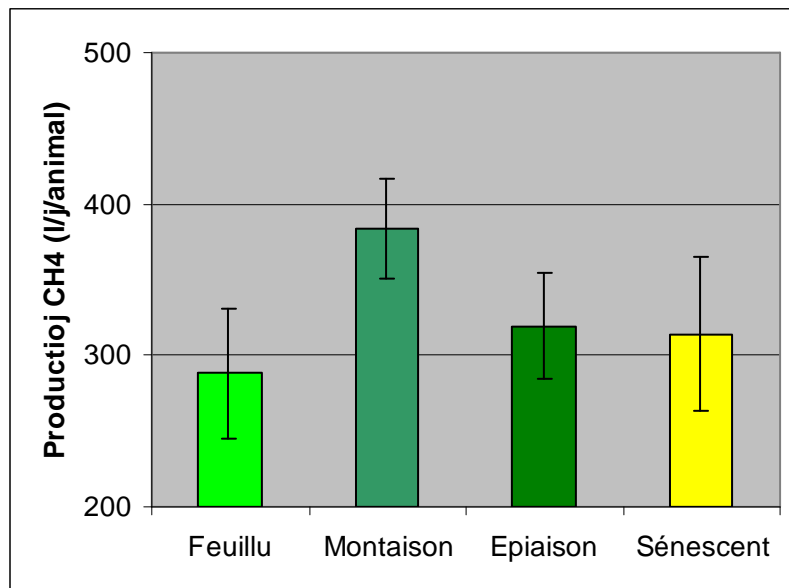


Figure 11. Evolution des émissions de CH₄ en fonction du stade de développement d'une graminée prairiale

Les résultats des analyses de la quantité ingérée et de la digestibilité de l'herbe pâturée permettront d'interpréter plus précisément ces résultats. Il faut souligner qu'ils sont particulièrement intéressants, car ils montrent pour la première fois que le pâturage extensif ne s'accompagne pas nécessairement d'émissions de méthane par animal accrues.

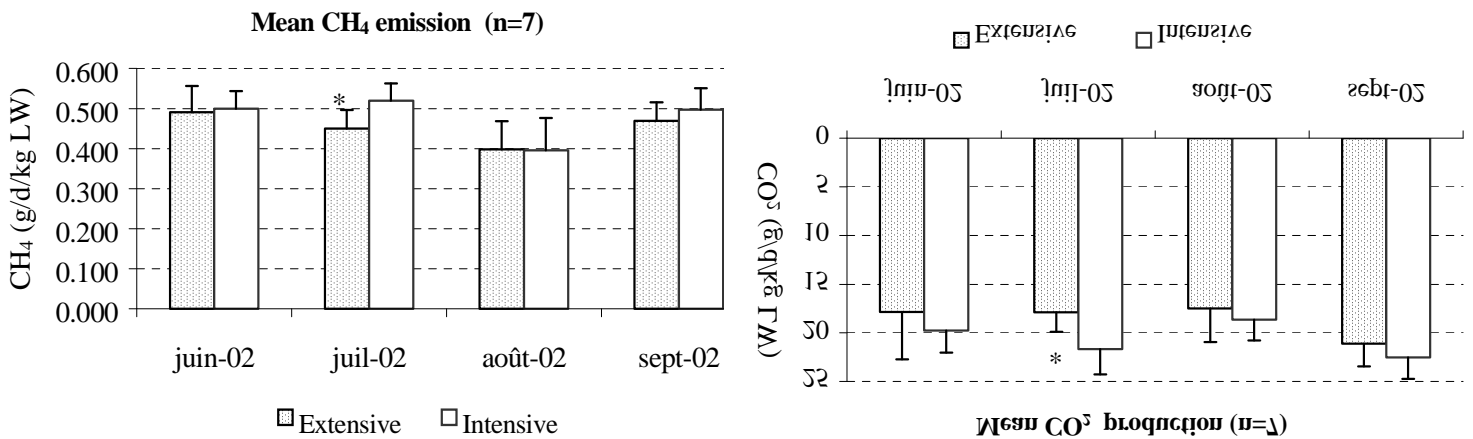


Figure 12. Emissions de CH₄ et CO₂ par des bovins au cours de la saison 2002 à Laqueuille exprimées en g par jour et par Kg de poids vif.

5.3. - Mesure des émissions de N₂O en 2002

Les mesures de flux de N₂O en 2002 ont permis de mettre en évidence une forte variabilité saisonnière des flux avec des valeurs maximales obtenues en fin de saison végétative (Fig. 13). Un apport d'engrais (80 kg d'azote) sur la parcelle intensive fin Juin a provoqué un autre pic d'émission sur la parcelle intensive en Juillet. D'une manière générale les émissions de N₂O étaient supérieures sur la parcelle Intensive mais elles restent faibles en comparaison avec d'autres types de sols.

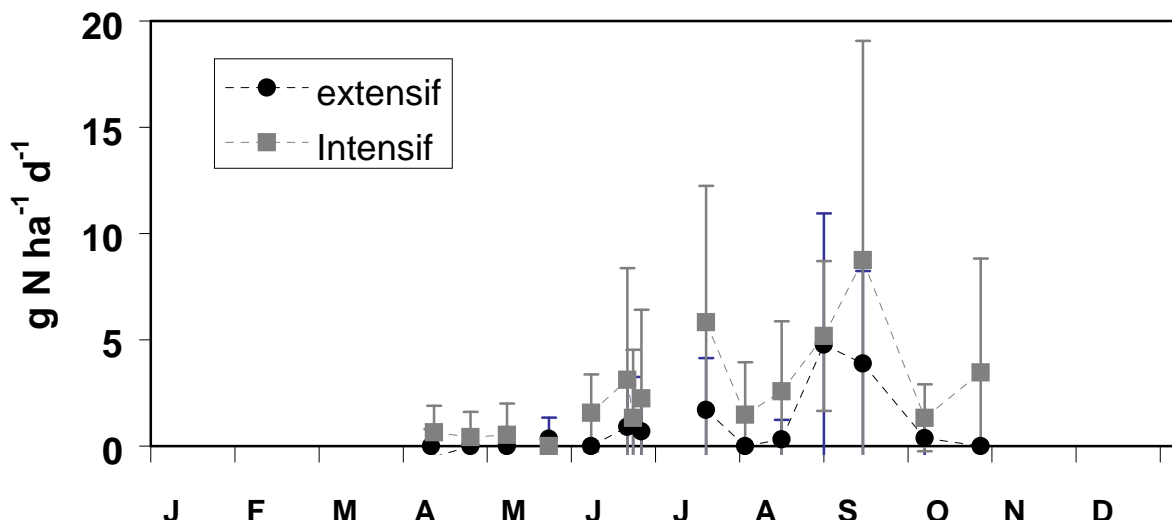


Figure13. Evolution saisonnière des émissions de N₂O sur les parcelles Intensives et Extensives à Laqueuille en 2002.

La variabilité des mesures entre chambres d'un même traitement pour une même date était très importante (coefficient de variation compris entre 150 et 200 %) et montre la nécessité d'avoir recours à d'autres techniques de mesure des flux pour prendre en compte la variabilité spatiale au sein de chaque parcelle.

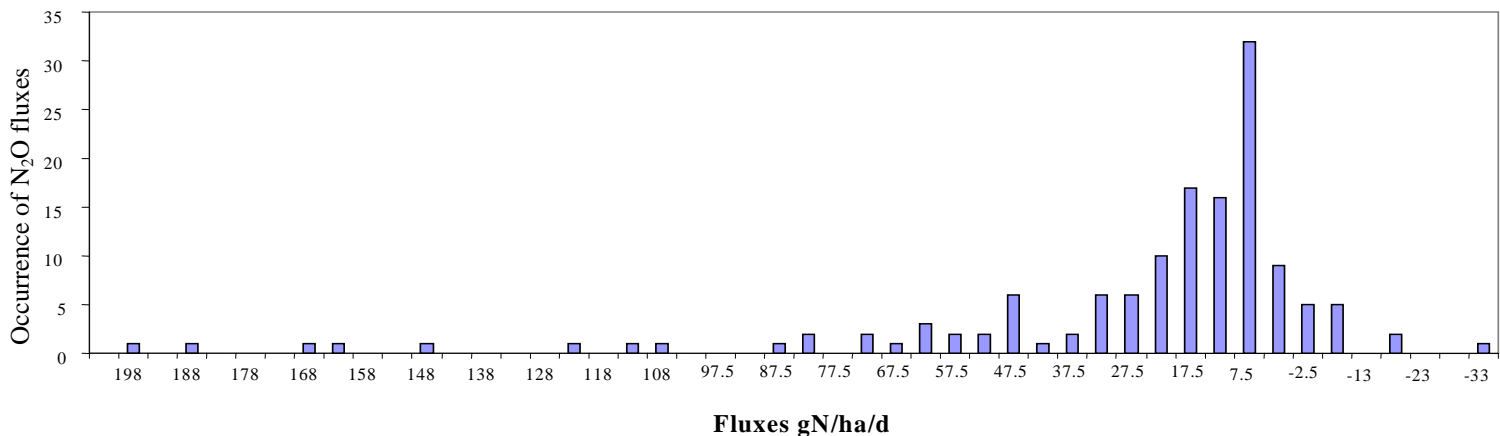


Figure14. Distribution des flux de N₂O mesurés par la technique des chambres à réponse rapide couplées à la TDL sur la parcelle extensive en Septembre 2002

L'utilisation des chambres de mesure à réponse rapide couplées à une TDL a permis de rendre compte de cette variabilité des flux de N₂O (Fig. 14). Les résultats obtenus avec cette méthode sont tout à fait comparables aux gammes de flux mesurées avec les chambres au sol classique.

La TDL fut aussi couplée à l'anémomètre sonique pour effectuer des mesures par corrélations turbulentes mais ces données sont en cours d'analyse. Quel que soit le résultat de cet essai, la sensibilité et la complexité d'utilisation de la TDL ne permettra pas, au moins dans l'immédiat, d'effectuer des mesures par corrélation turbulente des flux de N₂O en continu.

5.4. – Premiers bilans d'émissions de GES

Après extrapolation des données de flux de CO₂ manquantes, un premier bilan des émissions de GES a été effectué pour les mois de Juin et Septembre 2002 pour les deux traitements. Les émissions sont exprimées en terme de potentiel de réchauffement global (PRG) en équivalent CO₂ (kg ha⁻¹ mois⁻¹).

Source	Juin		Septembre	
	Extensif	Intensif	Extensif	Intensif
CO ₂ net*	316	268	-141	-85
CO ₂ Animal	119	224	123	173
CH ₄	77	153	93	125
N ₂ O	3.1	12.6	11.5	19.3
PRG**	-236 et -118	-103 et 121	-36 et 87	59 et 232

*Echange net de CO₂ entre la prairie pâturée et l'atmosphère. Ce chiffre contient deux incertitudes, l'une lié à l'origine des émissions (ici on considère que 100% des flux sont émis à l'intérieur de la parcelle) et l'autre liée à la contribution des bovins aux échanges de CO₂.

**Les deux estimations correspondent à des situation dans lesquelles, 100% des émissions de CO₂ liées à la respiration des bovins est prise en compte par les mâts de corrélation turbulente, et 0% des émissions de CO₂ liées à la respiration des bovins est prise en compte par les mâts.

Au vu de ces résultats, il semble évident qu'une attention particulière doit être apportée à l'estimation de la contribution des bovins aux échanges nets de CO₂ mesurés par la technique des corrélations turbulentes entre les prairies pâturées et l'atmosphère. Pour ce faire, différentes solutions sont envisagées:

- Alternier les périodes de présence et absence des bovins sur les parcelles et comparer les mesure de flux de CO₂ par la technique des corrélations turbulentes entre ces 2 périodes.
- Utiliser un collier témoin pour les mesures d'émissions de CH₄/CO₂. En effet, nous avons pu observer que le ratio d'émission par les bovins de ces 2 gaz était constant. La mise en place d'un collier témoin à proximité de l'analyseur CO₂ (au sommet du mât) nous permettrait de mesurer la quantité de CH₄ qui à transité près de l'analyseur, et donc d'estimer la quantité de CO₂ émis par les vaches qui a été pris en compte dans le calcul des flux de CO₂.
- La mise en place d'un système de télédétection des bovins en temps réel nous permettrait de connaître le nombre de bovins qui se situe dans la zone d'empreinte des mâts.

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

Avant d'obtenir des résultats définitifs issus de mesures directes en prairie (site de Laqueuille), une première version du modèle PaSim a été utilisée pour estimer les variations des variables du système prairial en fonction de la gestion. Ce modèle sera ensuite calibré et évalué grâce aux mesures entreprises sur le site. A titre d'exemple, nous présentons les résultats de premières simulations effectuées afin d'évaluer les effets du chargement animal sur les bilans de C et N et sur le pouvoir de réchauffement global (PRG) de prairies pâturées en continu durant 6 mois. D'autres simulations concernant la réponse à la fertilisation azotée de la prairie ont également été effectuées.

5.5.1 Bilan de Carbone

Avec le modèle PASIM, les réponses à un chargement variant entre 0,4 et 2,4 UGB/ha par pas de 0,4 sur une durée de trois ans ont été simulés sans apport d'engrais (Fig. 15, UGB, Unité Gros Bétail). A titre de comparaison, sur le site de Laqueuille, deux traitements expérimentaux sont comparés correspondant à des chargements de 1,67 UGB/ha en Intensif et 0,84 UGB/ha en Extensif.

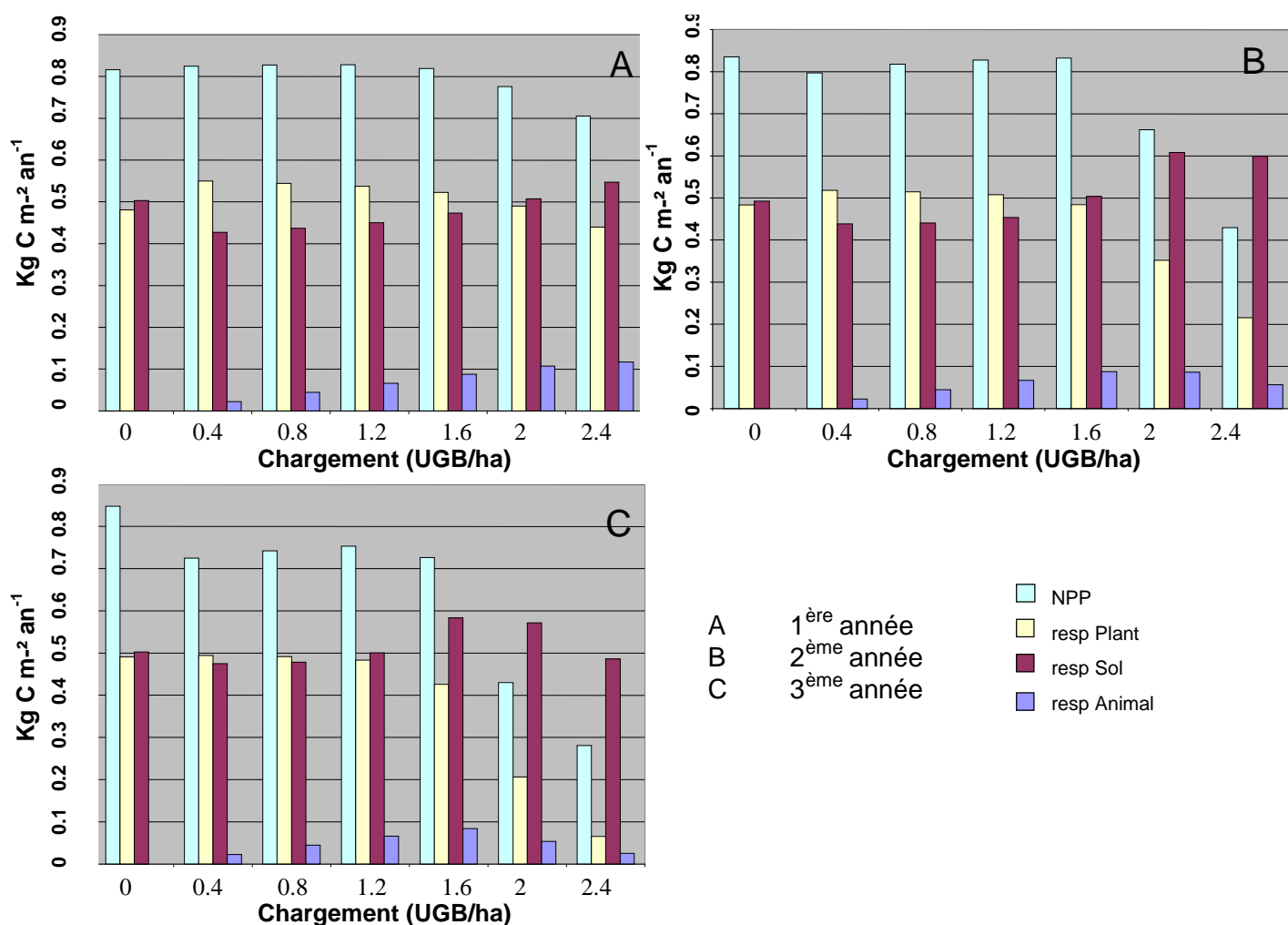


Figure 15a. Variation des respirations et de la NPP en fonction du chargement pour trois années successives

A partir d'un chargement de 2 UGB/ha, la parcelle ne supporte plus le pâturage dès la deuxième saison (Fig. 14, $NPP < respSol + respAnimal$). La photosynthèse et la biomasse aérienne diminuent alors fortement. La photosynthèse diminue aussi avec le temps quelque soit le niveau de chargement à cause d'un accroissement de la pression de pâturage qui induit une dégradation du couvert. Cette chute de photosynthèse est accompagnée d'une diminution de la respiration des plantes et d'une augmentation de la respiration du sol. Lorsque la végétation ne peut plus supporter le chargement, se produit alors une chute de la respiration des animaux, signe qu'ils ne peuvent plus se nourrir normalement.

La productivité nette du biome (NBP) (fig. 15b, $tC\ ha^{-1}\ an^{-1}$) est un indicateur de l'état d'un écosystème. La NBP est égale à : Photosynthèse nette + CFèces – RespirationAnimal - RespirationSol. On observe que la NBP est positive durant les trois années jusqu'à 1,6 UGB par ha, mais qu'elle devient négative au delà de ce seuil. De plus la NBP simulée diminue d'une année à l'autre, ce qui indique que la prairie n'a pas atteint un équilibre.

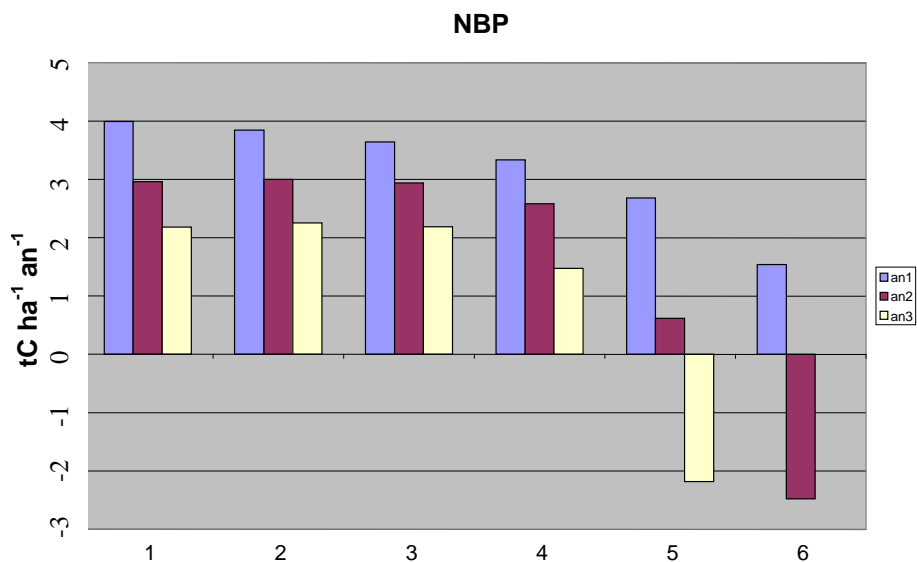


Fig 15b – Productivité nette du biome en fonction du chargement animal

5.5.2 Bilan d'Azote

Au cours du temps (sur les 3 ans) et pour des valeurs de chargement comprises entre 0,4 et 1,6 UGB/ha, les émissions de N_2O ne cesse de diminuer (Fig. 16). Ceci est probablement dû à la différence de gestion entre le scénario de mise à l'équilibre et les scénarios réalisés après mise à l'équilibre : le site réagit en fonction des gestions précédentes. En revanche pour des valeurs de chargement plus élevées (2 et 2,4), les émissions augmentent sur les 3 ans. En terme d'entrée dans le système, on suppose une déposition atmosphérique d'azote de $2,5\ g\ N\ m^{-2}\ an^{-1}$). A partir de la seconde année, les émissions de N_2O augmentent nettement au dessus d'un chargement de 1,6 UGB/ha.

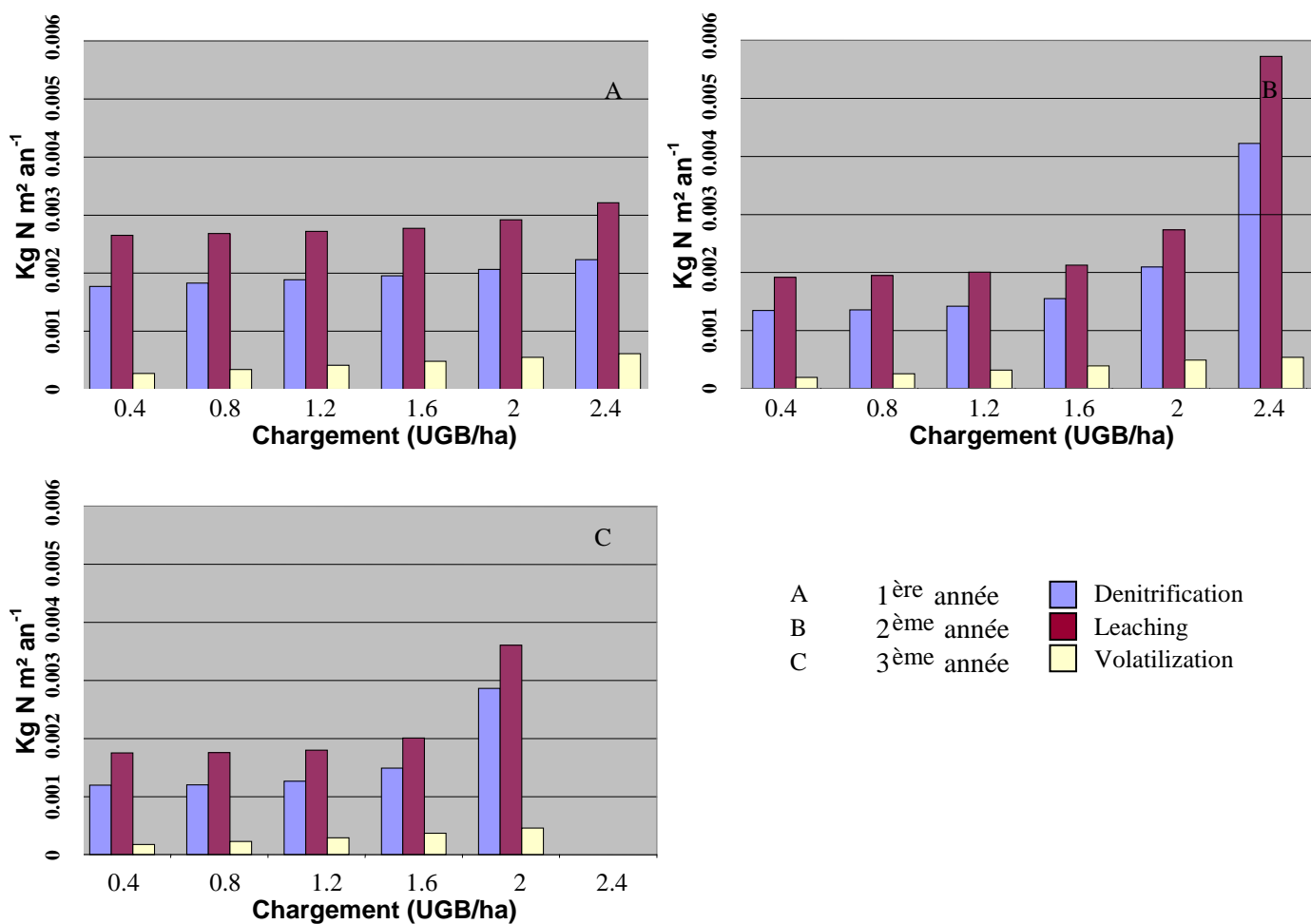


Figure 16. Variation de l'azote perdu par dénitrification, lessivage et volatilisation en fonction du chargement pour trois années successives

5.5.3 Potentiel de réchauffement global

Le potentiel de réchauffement global (PRG) permet de faire un bilan englobant les différents GES en jeu sur une échelle définie en équivalent tonne de carbone par hectare et par an. Les conversions permettant de passer de masse de N₂O à masse de CO₂ et de masse de CH₄ à masse de CO₂ utilisent le potentiel radiatif de ces différents gaz et sont définies comme telles : une quantité (masse) de N₂O a un potentiel de réchauffement 296 fois plus important qu'une même masse de CO₂. Une quantité de CH₄ a un potentiel de réchauffement 23 fois plus important qu'une même masse de CO₂. De manière plus directe et en utilisant ces valeurs de potentiel de réchauffement, 1 kgN-N₂O équivaut à 127 kgC-CO₂ et 1 kgC-CH₄ équivaut à environ 8,4 kg C-CO₂. Voici alors les valeurs de PRG obtenues pour les différents chargements simulés (Fig. 17):

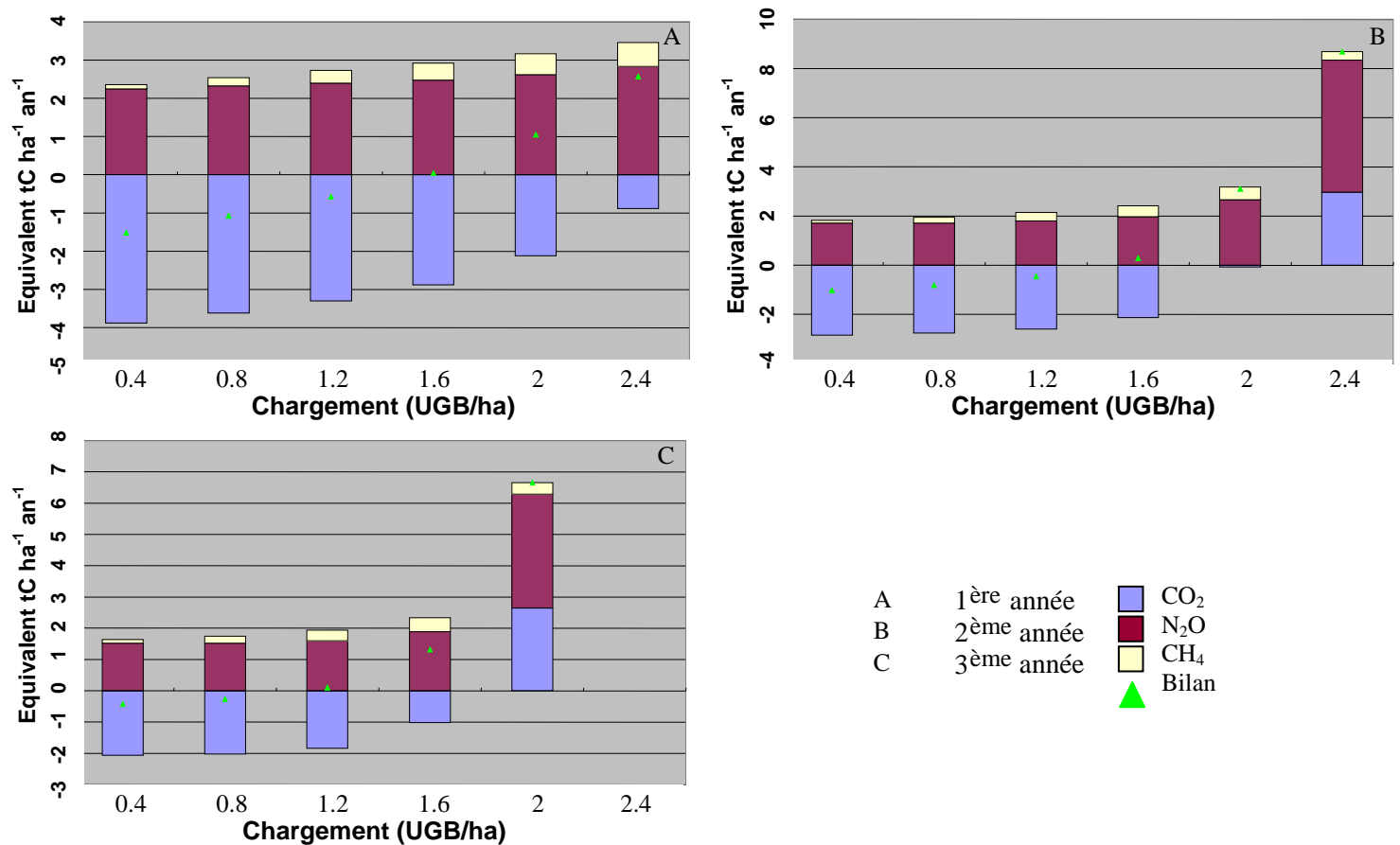


Figure 17. Potential de réchauffement global simulé par PaSim en fonction du chargement pour trois années successives

Remarque : $\text{CO}_2 = \text{RespirationAnimal} + \text{respirationSol} - \text{Photosynthèse Nette}$
 $\text{N}_2\text{O} = \text{Dénitrification}$
 $\text{CH}_4 = \text{Emission de CH}_4 \text{ par les animaux}$

Pour la 3^{ème} année, le PRG pour un chargement de 2,4UGB/ha n'apparaît pas, la simulation s'arrêtant avant la fin de l'année suite à un problème d'exécution du modèle (probablement lié à la faible biomasse disponible pour le pâturage).

Pour de faibles chargements, le PRG est plus élevé la première année que les 2 années suivantes, cependant il reste négatif. C'est pourtant sur la première année que l'on observe la séquestration de carbone la plus importante mais les émissions azotés (résultantes du scénario de mise à l'équilibre) sont elles aussi plus importantes sur la première année. Dès la deuxième année, la séquestration de carbone est plus faible. Les émissions azotées diminuent elle aussi, la prairie n'étant plus fertilisée. Le bilan tend alors à une diminution du PRG. A chargement plus élevé, la séquestration de carbone diminue très fortement et on observe même une émission de carbone pour des chargements de 2 UGB/ha et au-delà. Les émissions azotées ne cessent quant à elles d'augmenter probablement du fait d'une faible utilisation relative par la végétation des nutriments azotés du sol. Le bilan est une augmentation du pouvoir de réchauffement global (PRG) sur les trois ans.

Ces premières simulations n'ont pas encore été validées par comparaison à des données expérimentales. Dans le cadre du projet, plusieurs améliorations sont apportées au modèle PASIM, concernant notamment le calcul des émissions de méthane (en fonction de la composition de la ration pâturée et des choix alimentaires des herbivores) et celui des émissions de [N₂O](#) (amélioration du module de physique du sol pour rendre compte des effets du compactage sur l'hypoxie). Ce modèle va être ensuite utilisé de manière intensive à partir de 2003 afin :

- d'évaluer le modèle grâce aux données de flux obtenues sur le site de Laqueuille, ainsi que sur les 8 autres sites du projet européen GreenGrass.
- de tester, à l'échelle de la parcelle, plusieurs options de gestion visant à réduire les émissions de GES et ce pour plusieurs sites européens.
- de construire des systèmes d'élevage incluant des options de réduction des émissions de GES et d'évaluer les effets de ces options sur les émissions nettes à l'échelle de la ferme.

Enfin, l'objectif de ce travail est d'obtenir de premières estimations des flux de CO₂ mais aussi de CH₄ et de N₂O échangés entre l'atmosphère et l'écosystème prairial à l'échelle de la France (programme GICC) et de l'Europe (projet GreenGrass). Ces estimations seront obtenues grâce au couplage de PASIM avec le modèle ORCHIDEE, qui simule le cycle du carbone continental et possède une architecture spatialisée de manière à fonctionner à l'échelle globale. Le couplage de ces deux modèles permettra de conjuguer l'échelle globale d'ORCHIDEE avec les processus détaillés de PaSim. Il sera également nécessaire de définir les paramètres les plus variables spatialement (comme ceux liés à la gestion des prairies), et de quantifier l'erreur engendrée par l'incertitude sur ces paramètres.

E. Conclusion

Ce financement de première tranche GICC aura permis le démarrage du projet GES-Prairies. Les principales méthodes de mesure à l'échelle de la parcelle ont été mises au point (mesure des fluctuations turbulentes, émissions entériques de méthane, respiration des bovins, émissions de N₂O).

Les premiers résultats ont montré que les systèmes de mesure du CO₂ étaient fiables mais nécessitaient des protections contre les coupures d'alimentation électrique pour limiter les pertes de données. Des bilans mensuels d'émissions de GES sont déjà envisageables mais une partie importante du traitement des données reste à effectuer avant de pouvoir fournir des résultats fiables sur une base annuelle. Par ailleurs, les estimations de flux seront affinées après une réduction de la hauteur de mâts qui devrait permettre de mieux limiter l'origine des flux aux parcelles expérimentales. Cette démarche facilitera aussi la comparaison des flux pour les pâturages extensifs et intensifs.

Les mesures de CH₄ émis par les bovins nous semblent fiables, mais un effort doit encore être fait pour évaluer la part de la respiration des bovins dans les mesures de flux par fluctuations turbulentes. Il faut noter que les mesures de respiration des bovins par la méthode SF₆ sont probablement surestimées.

Concernant les mesures de flux de N₂O, une meilleure prise en compte de la contribution des différentes zones de flux et de leur force respective dans le suivi saisonnier des flux améliorera nos estimations annuelles des émissions de N₂O.

Ces différentes améliorations des protocoles de mesure devraient nous permettre de réduire les incertitudes concernant les émissions annuelles de GES pour les deux traitements expérimentaux du site de Laqueuille.

Concernant la modélisation, les simulations effectuées avec le modèle PASIM fournissent des ordres de grandeur comparables aux mesures, mais l'évaluation de ce modèle ne sera réalisée de manière détaillée qu'en 2003, après avoir terminé l'amélioration des modules concernant les émissions de méthane et de [N₂O](#).

Ces bases nous ont également permis de définir les collaborations nécessaires et la démarche à entreprendre pour parvenir à un modèle spatialisé à l'échelle nationale des flux de CO₂, de N₂O et de CH₄ des prairies françaises.

Cet objectif est repris dans le projet GES-Prairie qui a été retenu lors de l'appel d'offres 2001 du programme GICC. Il correspond également au programme européen GREENGRASS (2002-2004; 18 équipes de recherche en Europe) qui est également coordonné par l'INRA, sous la responsabilité de J-F Soussana.

6. Publications - Communications

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. *Reproduction Nutrition Development*, 40 (2), 211

Soussana, JF. Greenhouse gas sinks and sources in European grasslands. COST 629 meeting, Ghent, November 24th 2001.

Soussana JF, Loiseau P, Arrouays D 2002. "Carbon cycling and sequestration opportunities in grasslands." Soils as Carbon Sinks Session, British Society of Soil Science. London, 28 June 2002.

7. Disponibilité des données

Les données seront mises à disposition après publication. Leur archivage a été entrepris sous la forme d'une base de données commune aux équipes du projet européen GreenGrass.

8. Résultats valorisables dans le site internet GICC

De premiers résultats synthétiques pourraient être proposés pour le site WEB de GICC :

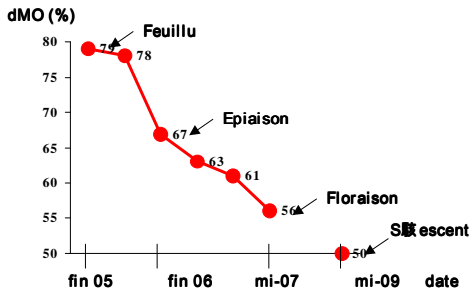
- Pouvoir de réchauffement global sur les deux traitements expérimentaux du site de Laqueuille (cf. section 5.4)

- Pouvoir de réchauffement global simulé à l'aide du modèle PASIM (cf. section 5.5.3).

Annexe 1: Etude de la digestibilité du fourrage.

PRODUCTION CH4 PAR DES BOVINS AU PATURAGE Stade vernal

Evolution de la digestibilité de la MO d'une prairie homogène (Fleury) en fonction du stade vernal (INRA, 1988, p371)



Feuille (F) avec EB = 4.3 Mcal/ kg MS; dE = 76
Epiaison (E) avec EB = 4.3 Mcal/ kg MS; dE = 64
Floraison (F) avec EB = 4.3 Mcal/ kg MS; dE = 53
Sénescent (S) avec EB = 4.3 Mcal/ kg MS; dE = 48??

Production CH4 (% EBI) = 3.67 + 0.062 dE (Blaxter and Clapperton, 1965)

Feuille: EBI = 20 kg MSI x 4.3 = 86 Mcal
 PCH4 = 8.38 % EBI = 7208 kcal = 34.3 mol = 769 l/j

Epiaison: EBI = 18 kg MSI x 4.3 = 77.4 Mcal
 PCH4 = 7.64 % EBI = 5913 kcal = 28.1 mol = 628 l/j

Floraison: EBI = 16 kg MSI x 4.3 = 68.8 Mcal
 PCH4 = 6.96 % EBI = 4788 kcal = 22.7 mol = 509 l/j

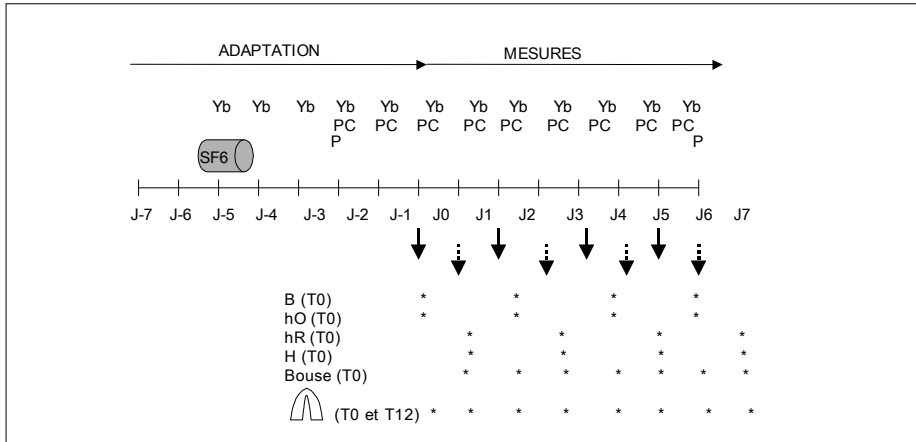
Sénescent: EBI = 16 kg MSI x 4.3 = 68.8 Mcal
 PCH4 = 6.65 % EBI = 4575 kcal = 21.7 mol = 486 l/j


1 mol CH4 = 210.8 Kcal et 22.4 l

Expression des résultats de production CH4

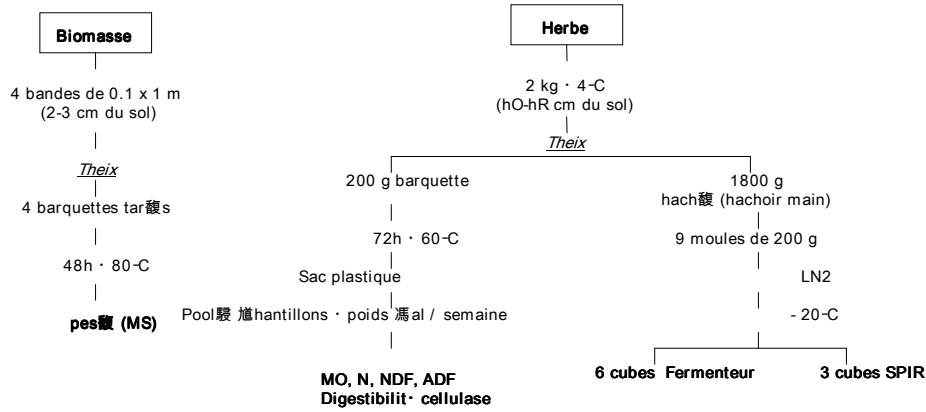
CH4 (% EBI) avec EBI = QI x EB et EB = f(MO, N) bulletin de Theix p 66
 CH4 (% EDI) avec EDI = QI x ED et ED = EB x dE [dE = f(dMO) et dMO = f(cellulase) ou f(Nfédal)]

ORGANISATION D'UNE PERIODE EXPERIMENTALE



Yb = distribution des capsules Yb (T0 et T12)
 PC = 70 g particules colorées (T0)
 P = pesée des animaux
 B = Biomasse vésiculaire · TO de J0, J2, J4, J6 (4 bandes de 0.1 x 1 m)
 hO = hauteur herbe offerte · TO de J0, J2, J4, J6 (50 mesures)
 hR = hauteur herbe résiduelle · TO de J1, J3, J5, J7 (50 mesures)
 H = 2 kg herbe fraîche · TO
 Bouse = récolte · TO de J1 · J7
 = récolte biquotidienne des gaz de J0 TO · J7 TO (2 fois par jour T0 et T12)

TRAITEMENTS DES ECHANTILLONS D'HERBE



TRAITEMENTS DES ECHANTILLONS DE FECES

