

# Les pratiques agricoles ont-elles plus d'impact que la variabilité climatique sur le potentiel des prairies pâturées à stocker du carbone ?

T. Tallec<sup>1</sup>, K. Klumpp<sup>1</sup>, N. Guix<sup>2</sup>, J.-F. Soussana<sup>1</sup>

**Pour optimiser le potentiel des agro-écosystèmes à stocker du carbone et lutter ainsi contre l'effet de serre, il est nécessaire d'analyser leur réponse à la variabilité climatique en interaction avec les pratiques agricoles. Le bilan de 6 années de mesures de flux de CO<sub>2</sub> sur prairies permanentes dans un contexte de moyenne montagne apporte des éléments de réponse.**

## RÉSUMÉ

Depuis 2003, les échanges de CO<sub>2</sub> entre prairies pâturées et atmosphère sont mesurés en continu sur 2 parcelles de moyenne montagne, l'une à gestion intensive et l'autre à gestion extensive. La prairie extensive a séquestré en moyenne plus de carbone que la prairie intensive (respectivement 1,4 et 1,25 t C/ha). Les résultats indiquent qu'au cours des années présentant une saison de croissance sèche, la parcelle extensive séquestre moins de carbone que la parcelle intensive et vice versa en saisons humides. Ainsi, il est nécessaire de considérer l'interaction des facteurs climatiques et des pratiques agricoles pour évaluer le potentiel de stockage du carbone d'une prairie. L'importance des propriétés du sol (teneur en eau, ressources azotées, flore microbienne...) est identifiée.

## SUMMARY

**Do agricultural practices have a higher impact than climatic variability on the soil carbon storage potential of grassland?**

In order to optimize the carbon storage potential of agro-systems, and thereby reduce greenhouse effect, the response of these systems to climatic variability needs to be examined in connection with agricultural practices. A list of CO<sub>2</sub> flow measurements over a period of 6 years on 2 mid-altitude permanent grassland plots (one plot under intensive grazing conditions and the other, under extensive grazing conditions) provided some useful data. Soil carbon sequestration was higher for extensively grazed grassland compared to intensively grazed grassland (respectively 1.4 and 1.25 t C/ha). During years with a dry growing season, soil carbon sequestration was lower for the extensively grazed plot compared to the intensively grazed plot, whereas the opposite was true for years with a humid growing season: this data shows that interaction between climatic conditions and agricultural practices must be taken into consideration when evaluating grassland soil carbon storage potential. The relevance of soil characteristics (water content, nitrogen supply, microbial flora...) is determined.

**A**u niveau national, les émissions de gaz à effet de serre liées à l'agriculture (107 millions de Teq CO<sub>2</sub>), hors émissions dues à la fabrication des intrants et à leur transport, représentent environ 20 % des émissions brutes de gaz à effet de serre (source : CITEPA, format UNFCC, inventaire année 2006). Le secteur de l'agriculture occupe le second rang parmi les secteurs identifiés comme responsables de l'accroissement de l'effet de serre. Parmi les différents secteurs d'activités, celui de l'agriculture est très souvent invoqué comme l'un des principaux responsables de l'accélération du changement climatique ; il pré-

sente en effet un triple enjeu : i) environnemental, car il présente un fort potentiel dans la capture du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), ii) social, car il doit maintenir voire augmenter ses productions face à une démographie toujours croissante dans un contexte de changements globaux et iii) économique, pour le gain des producteurs et des filières associées. **Dans un contexte économique et environnemental changeant, l'agriculture devra adapter ses modes de production pour faire face à l'accroissement de la fréquence des extrêmes climatiques, maintenir ses rendements et réduire son impact environnemental**

## AUTEURS

1 : INRA, UR874 Ecosystème Prairial, Site de Crouël, 234, avenue du Brézet, F-63100 Clermont-Ferrand : tiphaine.tallec@cesbio.cnrs.fr ; katja.klumpp@clermont.inra.fr

2 : Clermont Université, VetAgro Sup, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand

**MOTS CLÉS** : Changement climatique, chargement animal, dioxyde de carbone, eau du sol, expérimentation longue durée, facteur climat, gaz à effet de serre, pâturage, prairie permanente, pratiques de gestion des prairies, sol, stockage, structure de la végétation, variations saisonnières.

**KEY-WORDS** : Carbon dioxide, climatic change, climatic factor, grazing, greenhouse - effect gas, long-duration experiment, pasture management practices, permanent pasture, seasonal variations, soil, soil water, stocking rate, storage, sward structure.

**RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE** : Tallec T., Klumpp K., Guix N., Soussana J.-F. (2012) : "Les pratiques agricoles ont-elles plus d'impact que la variabilité climatique sur le potentiel des prairies pâturées à stocker du carbone ?", *Fourrages*, 210, 99-107.

**dans une logique de gestion durable.** En plus d'une augmentation des températures de 1 à 2,5°C environ prévue à l'horizon 2030, la répartition spatiale et temporelle des précipitations ainsi que la fréquence des événements extrêmes devraient être modifiées (augmentation des vagues de chaleur, des sécheresses ou des inondations). Le changement et la variabilité climatiques affecteront la durée de la saison de végétation, le cycle des cultures ainsi que le rendement des productions agricoles. La canicule de l'été 2003 a d'ailleurs préfiguré les risques encourus face à la variabilité climatique (CIAIS *et al.*, 2005) : les productions agricoles ont, en moyenne, chuté de 25 % à l'échelle de l'Europe. L'impact négatif de cette canicule a également été retrouvé sur **le bilan de gaz à effet de serre** (GES) : le carbone stocké par les écosystèmes terrestres européens a été réduit de 500 millions de tonnes (CIAIS *et al.*, 2005) soit l'équivalent de 4 années de séquestration nette.

Cette forte contribution de l'agriculture aux émissions de GES résulte de la production de deux principaux gaz à effet de serre : le méthane (CH<sub>4</sub>), issu majoritairement de la fermentation entérique des ruminants et des effluents, puis le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) émanant naturellement des sols agricoles, des engrais minéraux et organiques, puis du fumier et du lisier épandus. Ces flux de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O de la biosphère vers l'atmosphère représentent la plupart du temps des émissions nettes, qui peuvent être en partie compensées par la capture de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) par les agro-écosystèmes. Les agro-écosystèmes génèrent deux types de flux de CO<sub>2</sub>, *via* la photosynthèse du couvert végétal et *via* la respiration de l'écosystème. Pour les prairies permanentes, l'entrée de carbone dans le système (par activité photosynthétique) plus importante que sa sortie (par respiration de l'écosystème) leur confère ainsi la capacité de séquestrer durablement du carbone (SCHULZE *et al.*, 2009). Un flux net de CO<sub>2</sub> négatif (entrées de CO<sub>2</sub> > sorties de CO<sub>2</sub>) traduit un stockage de carbone ; inversement, un flux net de CO<sub>2</sub> positif (entrées de CO<sub>2</sub> < sorties de CO<sub>2</sub>) traduit un déstockage de carbone. Toutefois, le stockage de carbone évoqué dans cette étude est considéré comme « potentiel » et non comme réel. Pour l'évaluation d'un bilan carbone complet, d'autres entrées et sorties de carbone (flux latéraux, émissions de GES associées aux opérations techniques), dépendantes du choix des pratiques de gestion de la prairie, doivent être prises en compte. L'importation de carbone sur la parcelle comprend la fertilisation organique. L'exportation de carbone peut comprendre la fauche de la biomasse, la production de CH<sub>4</sub> *via* la fermentation entérique, la lixiviation... (SOUSSANA *et al.*, 2010). Dans cette étude, seul le flux net de CO<sub>2</sub> est pris en compte. Le stockage potentiel de carbone, pouvant représenter 0,5 à 1 tonne de carbone par hectare et par an (SOUSSANA *et al.*, 2007), permettrait de compenser 75 % du méthane émis lors de la rumination (Institut de l'Élevage). Il varie selon l'âge des prairies et les modalités de conduite (fertilisation, mode de récolte, intensité du pâturage). Représentant 70 % des terres agricoles et couvrant 26 % de la surface de la terre (FAO, 2006), **les pâturages pourraient donc jouer un rôle important pour l'adaptation au changement climatique et à la stabilisation de ce dernier** (GIEC, 2007).

Aujourd'hui toutefois, des incertitudes résident dans la réponse de ces agro-écosystèmes au changement climatique et aux événements extrêmes associés (CIAIS *et al.*, 2005 ; REICHSTEIN *et al.*, 2005), en termes de bilan carbone et *in fine* dans leur potentiel à alimenter ou atténuer l'effet de serre. Peu d'études ont porté sur l'analyse de l'impact des pratiques agricoles seules ou en interaction avec le climat (SCHMITT *et al.*, 2010 ; JACOBS *et al.*, 2007 ; ALLARD *et al.*, 2007). Les acteurs du territoire (gestionnaires et décideurs) et de la recherche ont en commun l'objectif de comprendre comment la variabilité climatique, en interaction avec les pratiques agricoles, affecte les mécanismes impliqués dans les échanges nets de CO<sub>2</sub> (NEE) en prairie et de pouvoir les anticiper. À terme, ce type d'étude devrait permettre de répondre à un double objectif : adapter l'agriculture aux extrêmes climatiques et lutter contre l'accroissement de l'effet de serre.

**L'objectif de l'étude** présentée ici était de **mesurer et comprendre les effets des pratiques de gestion, en interaction avec la variabilité climatique inter- et intra-annuelle, sur les échanges nets de CO<sub>2</sub> et le potentiel de stockage de carbone annuel en prairies pâturées de moyenne montagne.** Cette étude a fait l'objet d'un suivi des flux de CO<sub>2</sub>, *via* la méthode des corrélations turbulentes, et du suivi de la dynamique des variables météorologiques pendant 6 années, contrastées par leurs régimes hydriques et températures saisonniers (années 2003 et 2005 sèches, années 2007 et 2008 humides, années 2004 et 2006 normales). Ces suivis ont été réalisés sur deux prairies pâturées adjacentes ne différant pas par leur contexte pédoclimatique, l'une gérée de manière extensive et l'autre de manière intensive, de façon à analyser le seul impact de pratiques contrastées de gestion de la prairie.

Nous avons testé les hypothèses suivantes :

- les flux de CO<sub>2</sub> augmentent avec les précipitations ;
- les périodes de sécheresse affectent négativement l'intensité de ces flux ainsi que le stockage potentiel du carbone ;
- une meilleure disponibilité en azote ainsi que la structure du couvert végétal modulent la réponse de ces flux aux précipitations.

## 1. Matériel et méthodes

### ■ Site expérimental

Cette étude a été réalisée dans le cadre du Système d'Observation et d'Expérimentation de Recherche Agro-écosystèmes, Cycles Biogéochimiques et Biologiques (SOERE ACBB), sur les parcelles expérimentales en **prairie permanente** du site de Laqueuille (Puy-de-Dôme ; 45°38'N, 2°44'E). Ce site expérimental (6,65 ha), converti en prairie permanente il y a plus de 50 ans, se situe sur un plateau **de moyenne montagne** à 1 040 m d'altitude. Son sol repose sur une roche basaltique, avec une profondeur qui varie entre 35 et 80 cm. Le sol est un andosol (argile : 16 %, limon : 56 %, sable : 28 %) constitué de 18 % de matière

organique dans les 10 premiers centimètres. La densité apparente de cet horizon est de 560 kg/m<sup>3</sup>, en 2002. Cette année-là, la parcelle a été divisée en deux parcelles adjacentes, pâturées en continu par des génisses de mai à octobre. Deux types de gestion sont appliqués depuis, **un traitement modérément intensif** (1 UGB/ha/an ; fertilisation azotée minérale de 210 kg N/ha/an en moyenne ; 2,8 ha) et **un autre plus extensif** (0,5 UGB/ha/an ; pas de fertilisation ; 3,6 ha). Nous parlerons d'extensification pour la parcelle extensive pour traduire à la fois la réduction du chargement animal et l'arrêt de la fertilisation azotée.

## ■ Analyse de la dynamique des communautés

Pendant la période de croissance, et à fréquence mensuelle, la production de biomasse aérienne a été mesurée à l'aide de 10 cages d'exclusion de 1 m<sup>2</sup> dans chacune des parcelles. Les mesures de production de biomasse à chaque fauche ont permis de calculer la productivité, c'est-à-dire la production de biomasse journalière.

## ■ Mesures météorologiques

Le site est équipé d'une station météorologique couplée à une centrale d'acquisition (Campbell Scientific Inc., modèle CR-10X) qui fournit toutes les 30 minutes les valeurs moyennées du rayonnement global, de la température de l'air, de la vitesse et la direction du vent et des précipitations.

## ■ Suivi de la température et de la teneur en eau du sol

La température du sol et sa teneur en eau (TES) sont mesurées en continu en surface et aux profondeurs de 5-10-30-50 cm et moyennées sur 30 minutes. Les teneurs en eau du sol ont été intégrées sur une profondeur de 0-40 cm (somme des stocks aux différentes profondeurs).

## ■ Caractérisation des propriétés hydrodynamiques du sol

La densité apparente a été mesurée aux profondeurs de 0-5 et 15-20 cm. Le point de flétrissement permanent (pFp) ainsi que la capacité au champ (CC) ont été déterminés pour chaque parcelle en 2010 dans l'horizon 0-30 cm du sol le long d'un transect de 30 m selon le protocole de RICHARD et WEAVER (1943).

## ■ Mesure du flux net de CO<sub>2</sub>

Chaque parcelle est équipée d'un système permettant la mesure des flux nets de CO<sub>2</sub> par la **méthode des fluctuations turbulentes** au pas de temps semi-horaire. Ce système comprend un analyseur infrarouge haute fréquence CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (LI-7500) et un anémomètre sonique (Gill Instruments, Lyvington, UK, modèle Solent R3), installés

à 2 m de hauteur. Le calcul et l'analyse des flux ont été réalisés suivant la méthodologie standardisée du réseau Carboeurope-IP (AUBINET *et al.*, 2000). Les données manquantes ainsi que celles de faible qualité ont été reconstruites selon la méthode de REICHSTEIN *et al.* (2005).

## ■ Analyses statistiques

L'étude de l'effet des pratiques agricoles (intensif *versus* extensif) a été réalisée par analyses factorielles de variance de type ANOVA sur les sommes annuelles, saisonnières et hebdomadaires des flux nets de CO<sub>2</sub> (NEE), de la photosynthèse (GPP pour *Gross Primary Production*) et de la respiration de l'écosystème (Reco) (facteurs dépendants) en lien avec les moyennes de températures de l'air et du sol, des teneurs en eau du sol puis du rayonnement global (facteurs catégoriques). Les différences ont ensuite été testées selon le test de Fisher. Nous avons utilisé le logiciel Statistica 6 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA). L'effet des traitements sur la GPP et la Reco cumulées sur la semaine en lien avec la teneur en eau du sol et la température de l'air a été analysé en comparant les régressions linéaires réalisées pour le traitement intensif avec celles réalisées pour le traitement extensif. Pour cette analyse, nous avons utilisé le logiciel Statgraphics Plus 4.1 (Statistical Graphics Corp., Rockville, MD, USA). Afin de répondre aux conditions de normalité requises (test de Shapiro-Wilk), certaines données ont été transformées selon une équation logarithmique.

## 2. Résultats

### ■ Conditions environnementales et dynamique des communautés végétales

#### • Conditions climatiques

**Conditions climatiques annuelles.** L'analyse annuelle des précipitations montre que 5 années sur 6 ont présenté une pluviométrie annuelle cumulée inférieure à la normale (1 227 mm). Les années **2003 et 2005** furent **les plus chaudes et les plus sèches**, avec des précipitations annuelles cumulées les plus faibles et les taux d'ensoleillement les plus élevés (tableau 1). **Les années 2007 et 2008 ont été des années froides et humides** présentant les précipitations annuelles cumulées les plus élevées puis les températures et le rayonnement global annuels cumulés les plus faibles. Les années **2004 et 2006** ont représenté **des années moyennes** avec des cumuls annuels de température et de précipitations moyens.

**Conditions climatiques saisonnières.** La figure 1 permet de rendre compte de la répartition saisonnière des précipitations, celles-ci étant rapportées aux valeurs saisonnières normales. Ainsi, si 2003 et 2005 présentent une pluviométrie annuelle proche et faible (755 mm *vs* 820 mm), ces deux années montrent de fortes différences dans la répartition temporelle de ces précipitations : en 2003, printemps très sec et été normal ; en 2005, printemps normal et été très sec.



Année	Rg (kW/m <sup>2</sup> )	P (mm)	T <sub>air</sub> (°C)	PB*		GPP		Reco		NEE	
				EXT	INT	EXT	INT	EXT	INT	EXT	INT
2003	5 688 <sup>A</sup>	755 <sup>AC</sup>	3 233 <sup>A</sup>	3,9 <sup>aA</sup>	2,4 <sup>bA</sup>	1 524	1 571	1 435	1 434	- 89	- 137
2004	4 042 <sup>B</sup>	988 <sup>A</sup>	2 711 <sup>B</sup>	2,9 <sup>aBC</sup>	2,0 <sup>bB</sup>	1 491	1 956	1 356	1 936	- 135	- 20
2005	4 503 <sup>AB</sup>	820 <sup>AC</sup>	2 656 <sup>B</sup>	2,1 <sup>aC</sup>	1,7 <sup>aB</sup>	1 393	1 575	1 344	1 371	- 49	- 204
2006	4 462 <sup>AB</sup>	1 026 <sup>BC</sup>	3 028 <sup>A</sup>	1,3 <sup>aB</sup>	1,5 <sup>aB</sup>	1 638	1 709	1 414	1 575	- 224	- 134
2007	4 214 <sup>B</sup>	1 363 <sup>B</sup>	2 698 <sup>A</sup>	2,8 <sup>aC</sup>	2,6 <sup>aA</sup>	1 719	2 047	1 232	1 692	- 486	- 354
2008	4 139 <sup>B</sup>	1 033 <sup>C</sup>	2 567 <sup>B</sup>	4,0 <sup>aA</sup>	3,3 <sup>bA</sup>	1 499	1 760	1 140	1 357	- 368	- 404
Total										- 1 350	- 1 253

Deux lettres différentes indiquent une différence significative ( $P < 0,05$ ) entre les 2 traitements (lettres minuscules) et/ou entre années (lettres majuscules).  
\* moyenne des 7 coupes par an

TABLEAU 1 : Résultats annuels du rayonnement global (Rg), des précipitations (P), de la température de l'air ( $T_{air}$ ), des productions de biomasse (PB) et primaire brute (GPP), de la respiration de l'écosystème (Reco) et des échanges nets de l'écosystème (NEE) des traitements intensif (INT) et extensif (EXT) de 2003 à 2008.

TABLE 1 : Annual totals for solar radiation (Rg), rainfall (P), air temperature ( $T_{air}$ ), standing biomass (PB), gross primary production (GPP), ecosystem respiration (Reco) and net ecosystem exchange (NEE) for intensively (INT) and extensively (EXT) grazed plots from 2003 to 2008.

### • Propriétés hydrodynamiques du sol

La densité apparente intégrée sur la profondeur 0-20 cm est plus forte en intensif (839 kg/m<sup>3</sup>) qu'en extensif (599 kg/m<sup>3</sup>). **Les différences de pratiques ont donc induit des différences au niveau du sol**, ce qui peut s'expliquer i) par un chargement différent et donc

par une compaction supérieure du fait du piétinement et ii) par une accumulation de débris organiques supérieure en extensif qu'en intensif.

Les valeurs de teneur en eau au point de flétrissement permanent (pFp) et à la capacité au champ (CC) diffèrent entre les 2 traitements. Pour intégrer la différence de structure entre les deux traitements, les valeurs de teneur en eau gravimétrique au pFp et à la CC ont été multipliées par la densité apparente. Ainsi, les valeurs de teneur en eau volumique au pFp et à la CC atteignent des valeurs de 31,7 % et 28,2 % et la CC des valeurs de 45,0 % et 42,3 % pour les parcelles extensive et intensive respectivement.

### • Evolution du stock en eau du sol

Les différences physiques du sol (mesurées en termes de pFp, CC et densité apparente) et les différences de couvert végétal se traduisent par des différences de cinétique de la teneur en eau du sol, pour des précipitations équivalentes : en moyenne, les deux parcelles présentaient un stock en eau plus important en 2005, 2007 et 2008 qu'en 2003, 2004 et 2006, assorti cependant d'une large disparité entre les saisons (figure 2). Durant les périodes de forte humidité du sol, le sol de la parcelle extensive s'est avéré plus humide que celui de la parcelle intensive (figure 2), conformément aux valeurs de capacité au champ.

C'est à partir des valeurs hebdomadaires moyennes des teneurs en eau du sol que nous avons identifié des semaines « sèches », au cours desquelles la teneur en eau moyenne est inférieure à la teneur en eau au point de flétrissement permanent ( $TES < pFp$ ), et des semaines « humides », avec une teneur du sol en eau supérieure à la teneur en eau au point de flétrissement permanent ( $pFp < TES < CC$ ). Les années ont ensuite été classées en années sèches et humides selon la somme des semaines sèches et humides respectivement. L'analyse a montré que 2003 (40 % de semaines sèches) et 2007 (presque 100 % de semaines humides) ont été respectivement plus sèche et

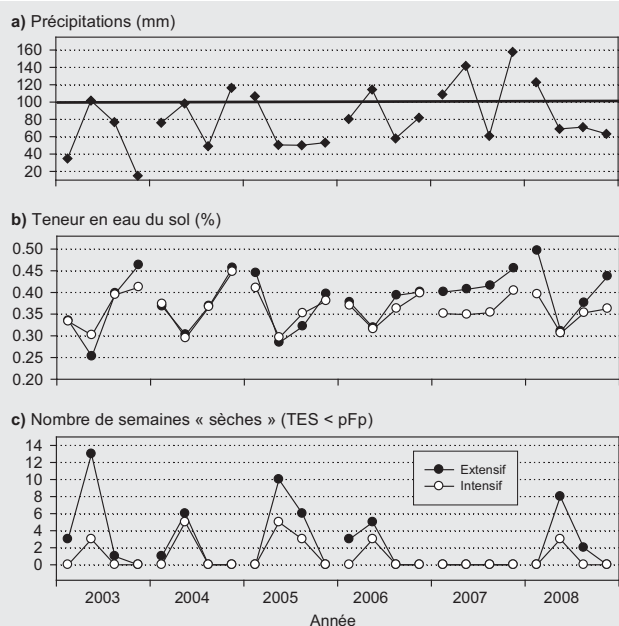


FIGURE 1 : Valeurs saisonnières (printemps, été, automne, hiver) entre 2003 et 2008 de 3 variables environnementales mesurées ou calculées : a) précipitations par rapport aux précipitations moyennes (calculées sur 28 ans - 1972-1984 et 1995-2000), b) teneurs moyennes en eau du sol (TES) sur 0-40 cm et c) nombre de semaines « sèches » par saison.

FIGURE 1 : Seasonal values (spring, summer, autumn and winter between 2003 and 2008) for 3 measured or calculated environmental variables : a) rainfall compared to mean rainfall (mean average over a period of 28 years: - 1972-1984 and 1995-2000), b) mean soil water content (TES, 0-40 cm) and c) number of « dry » weeks per season.

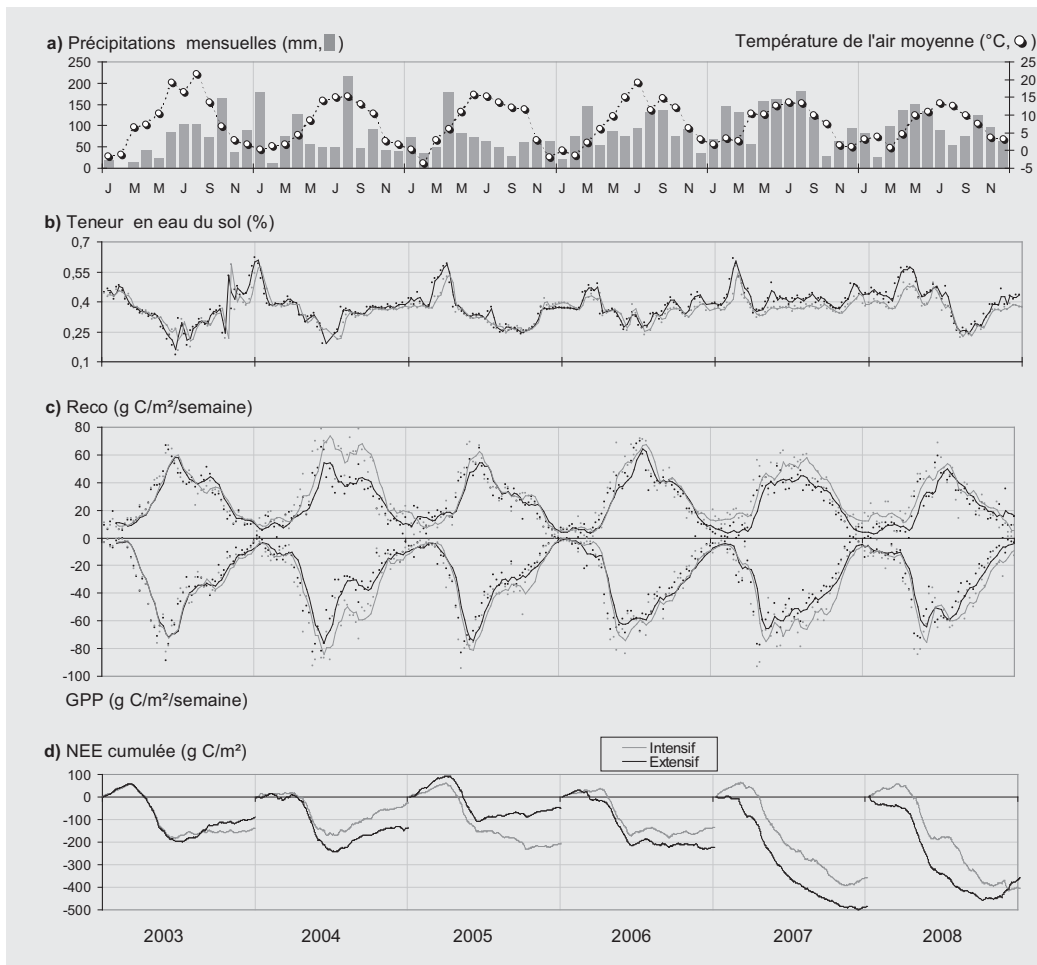


FIGURE 2 : Variations au cours des 6 années a) des précipitations mensuelles et de la température moyennes de l'air, b) de la teneur en eau des sols, c) de la respiration de l'écosystème (Reco) et de la production primaire brute (GPP), puis d) des échanges nets de l'écosystème cumulés sur l'année (NEE) pour les parcelles intensive et extensive.

FIGURE 2 : Changes over a period of 6 years a) in monthly rainfall and mean air temperature b) soil water content, c) ecosystem respiration (Reco) and gross primary production (GPP), and d) cumulated net ecosystem exchange over a period of a year (NEE) for intensively and extensively grazed plots.

plus humide ( $P < 0,01$ ) que les autres années (25 % de semaines sèches en moyenne). Au total, sur les 6 années, la parcelle extensive a présenté un nombre plus important de semaines sèches que la parcelle intensive (58 *versus* 22 ; données non présentées, cf. KLUMPP *et al.*, 2011).

### • Dynamique de la production des communautés végétales

Les deux traitements présentent une production moyenne de biomasse de 2,5 t de matière sèche/ha/an. Cette production varie selon les années et le traitement. Les plus fortes productions de biomasse sont observées en 2003 et 2008 pour la parcelle extensive, puis en 2007 et 2008 pour la parcelle intensive (tableau 1). **La production annuelle de biomasse s'avère généralement plus importante pour la parcelle extensive que pour la parcelle intensive. Cependant, la productivité de la parcelle intensive est supérieure à celle de la parcelle extensive, qui présente une proportion de biomasse sénescente plus importante (données non présentées). Ces résultats s'expliquent par une vitesse de croissance (par unité de temps) plus élevée chez les espèces végétales de la parcelle intensive particulièrement adaptées à la fertilisation azotée et à une pression de pâturage plus importante.**

## ■ Analyse de la dynamique temporelle du flux net de CO<sub>2</sub> et de ses déterminants

### • Éléments d'interprétation du flux net de CO<sub>2</sub>

La **NEE** (*Net Ecosystem carbon Exchange*) correspond au **flux net de CO<sub>2</sub>** qui résulte de la différence entre les flux de CO<sub>2</sub> associés à la respiration (libération CO<sub>2</sub>) de l'écosystème (Reco) et ceux associés à la photosynthèse (GPP, fixation CO<sub>2</sub>) du couvert végétal chlorophyllien. Dès lors, **une NEE cumulée négative** - la quantité de CO<sub>2</sub> fixée par le couvert végétal est supérieure à celle respirée par l'écosystème - indique une séquestration de CO<sub>2</sub> (ou retrait de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère). L'écosystème est alors qualifié de **puits de carbone**. Une **valeur positive de la NEE** indique une libération de CO<sub>2</sub> par l'écosystème (ou ajout de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère). Dès lors l'écosystème est qualifié de **source de carbone**.

### • Stockage annuel du carbone dans les prairies

À l'échelle pluriannuelle, plusieurs tendances se dégagent :

- Le bilan des 6 années de mesures montre que **les 2 parcelles représentent un puits net de carbone**.

- Le traitement extensif présente un flux net de CO<sub>2</sub> cumulé sur 6 ans supérieur à celui du traitement intensif (NEE absolue cumulée de 1,4 et 1,25 t C/ha, respectivement ; tableau 1).

- Il existe une **forte variabilité de la NEE cumulée entre années et/ou entre traitements** (tableau 1 et figure 2) : la NEE est significativement corrélée aux teneurs en eau du sol et aux précipitations, conduisant à des valeurs absolues plus élevées en années humides (2007 et 2008) quel que soit le traitement considéré ; en 2004, 2006 et 2007, le traitement extensif a stocké davantage de carbone que le traitement intensif ( $NEE_{ext} < NEE_{int}$ ) ; c'est le contraire en 2003, 2005 et 2008 ( $NEE_{ext} > NEE_{int}$ ).

Pour comprendre la variabilité temporelle de la NEE, les flux de CO<sub>2</sub> entrant (GPP) et sortant (Reco) ont été analysés à différentes échelles temporelles.

• **Analyse des composantes du flux net de CO<sub>2</sub> : photosynthèse et respiration de l'écosystème**

**Flux annuels.** Globalement, la parcelle intensive présente des valeurs cumulées de photosynthèse (GPP) et de respiration de l'écosystème (Reco) équivalentes, voire supérieures, à celles de la parcelle extensive, quelle que soit l'année considérée (tableau 1).

**L'intensité des flux GPP et Reco en parcelle intensive est d'autant plus forte que les précipitations printanières et estivales le sont** (cas de 2004, 2007 et 2008 ;  $P < 0,05$  ; figure 1 et tableau 1). En 2003 et 2005, années « sèches » caractérisées par de faibles précipitations printanières ou estivales, la Reco dans le traitement intensif est inférieure à celle des autres années, atteignant des valeurs similaires à celles du traitement extensif, et conduisant à un potentiel de stockage de carbone sur l'année supérieur en parcelle intensive.

Un effet du traitement est donc observé, mettant en exergue une différence de réponse des deux prairies aux variables climatiques (données non présentées, cf. KLUMPP et al., 2011).

**Flux hebdomadaires.** Afin d'analyser plus finement les rôles du climat et des pratiques agricoles sur la variabilité interannuelle des flux de carbone, les flux

hebdomadaires cumulés de GPP et Reco ont été analysés et classés selon les disponibilités en eau du sol, en périodes sèches ( $TES < pFp$ ) et périodes humides ( $TES > pFp$ ) (figure 3).

Au cours de la saison de croissance, en périodes sèches, la GPP se révèle plus élevée en traitement intensif qu'en extensif, alors que la Reco présente des valeurs similaires dans les 2 cas (figures 3a et 3c). Inversement, en périodes humides les valeurs de GPP ne diffèrent pas entre les 2 traitements, alors que la Reco est significativement plus élevée en parcelle intensive (figures 3b et 3d). Ainsi, **le traitement extensif présente un potentiel de stockage de carbone moindre que l'intensif pour les années où les périodes de croissance sont sèches** (figure 2 ; 2003, 2005 et 2008) en raison d'une plus grande fraction de carbone respirée. **Au contraire, les années où les périodes de croissance sont plus humides, c'est le traitement intensif qui présente un potentiel de stockage de carbone moindre** comparé à celui de l'extensif en raison d'une fraction de carbone respirée plus importante que celle observée au cours des années sèches.

**3. Discussion**

■ **Interaction des effets de la variabilité climatique et des pratiques de gestion de la prairie sur le stockage de carbone**

Une meilleure compréhension des effets croisés de la variabilité climatique et des pratiques agricoles sur les flux de carbone en prairie peut permettre d'anticiper les changements climatiques en cours et de déterminer des options d'atténuation des émissions de GES adaptées pour un stockage potentiel de carbone optimal. Nous avons démontré dans cette étude, en accord avec d'autres (ALLARD et al., 2007 ; AMMANN et al., 2007 ; JACOBS et al., 2007 ; SOUSSANA et al., 2007 ; ZEEMAN et al., 2010), que

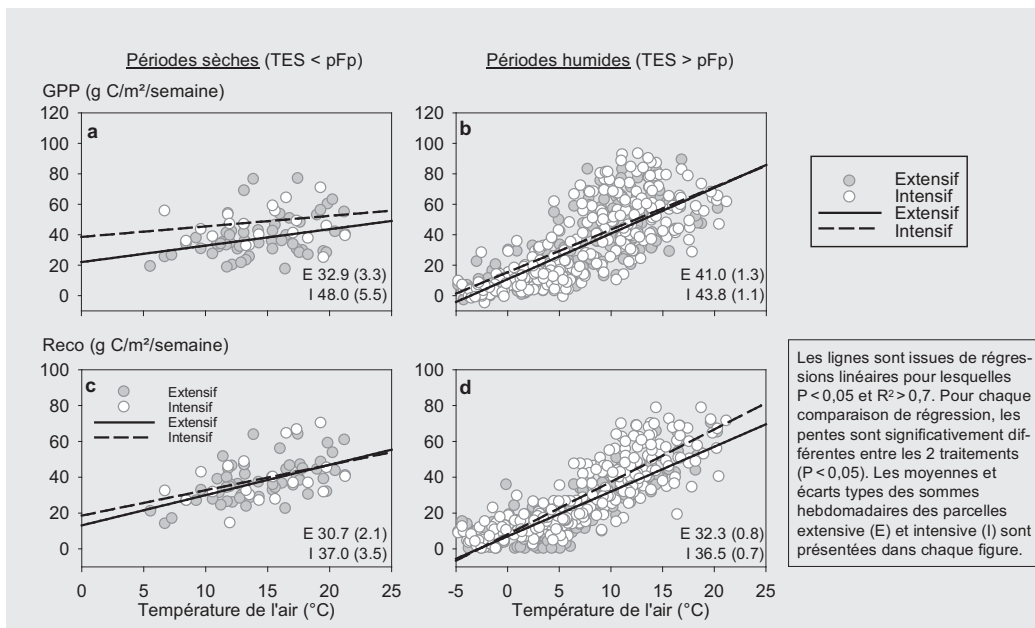


FIGURE 3 : **Relation entre production primaire brute (GPP), respiration de l'écosystème (Reco) et température moyenne de l'air en périodes sèches (a, c) et humides (b, d) pour les parcelles extensive et intensive entre 2003 et 2008.**

FIGURE 3 : **Correlation between gross primary production (GPP), ecosystem respiration (Reco) and mean air temperature during dry (a, c) and humid (b, d) periods for intensively and extensively grazed plots.**



**les prairies, quel que soit leur mode de gestion, se comportent comme des puits de carbone** (stockage moyen de 217 g C/m<sup>2</sup>/an), c'est-à-dire qu'elles fixent davantage de CO<sub>2</sub> (via la photosynthèse) qu'elles n'émettent dans l'atmosphère (via la respiration). Cette capacité à fixer du carbone dépend cependant de l'intensité de gestion. Des études ont montré qu'elle se trouve stimulée par un apport de fertilisation azotée mais réduite par une pression croissante de pâturage (SOUSSANA *et al.*, 2007 et 2010). AMMANN *et al.* (2007) et ALLARD *et al.* (2007) ont montré que la fonction de puits d'une prairie semble favorisée sous pression modérée de pâturage avec une fertilisation azotée, comme cela est couramment pratiqué en prairies de montagne. Cependant, l'analyse des flux nets de carbone en réponse aux pratiques de gestion à travers 6 années climatiques contrastées vient nuancer cette orientation, montrant qu'aucune préconisation de gestion ne peut être faite à partir des précédentes études.

**La capacité d'un écosystème à séquestrer du carbone dépend en effet des conditions météorologiques, de la gestion et des propriétés du couvert végétal** (KNAPP *et al.*, 2002 ; HARPER *et al.*, 2005 ; RISCH et FRANCK, 2007) **puis de leurs interactions**. Dans notre étude, les conditions météorologiques modulent fortement les effets des pratiques agricoles. La variabilité de la répartition des précipitations, indépendamment de leur somme annuelle, altère les processus de fixation et de respiration du CO<sub>2</sub> différemment selon la gestion. Par exemple, en 2008, alors que la somme annuelle des précipitations est similaire à celles de 2006 et 2007, les précipitations estivales et automnales sont plus faibles que les précédentes années. Des températures élevées associées à ces faibles précipitations ont conduit à une diminution de la teneur en eau du sol (TES), ceci particulièrement en période de forte croissance de la végétation, jusqu'à une valeur seuil (pFp) au-dessous de laquelle la NEE hebdomadaire absolue a été supérieure en parcelle intensive et au-delà de laquelle elle a été supérieure en parcelle extensive. Ces résultats montrent que **la parcelle extensive s'est avérée plus sensible aux périodes intermittentes de stress hydrique durant la saison de croissance que la parcelle intensive**, en raison notamment des propriétés de son sol (voir plus loin). Ces résultats suggèrent aussi que même une somme des précipitations annuelles élevée ne suffit pas à compenser les réductions occasionnées par des périodes de faibles précipitations si la majorité des événements de pluie n'ont pas lieu durant la saison de croissance.

*In fine*, sur une année, si la somme des périodes sèches est plus importante que celle des périodes humides, le potentiel de stockage de carbone sera plus faible pour le traitement extensif que pour le traitement intensif et *vice versa*. Ainsi le pâturage intensif et la fertilisation azotée ont conduit à un stockage de carbone plus élevé les années où la saison de croissance a été chaude et sèche (2003, 2005 et 2008). A l'inverse, les années où la saison de croissance s'est avérée plus pluvieuse (2004, 2006 et 2007), la parcelle extensive a présenté une plus forte activité de puits que la parcelle intensive.

Cette étude souligne donc l'**importance de considérer l'interaction des facteurs climatiques**, notamment au cours de la saison de croissance, et des pratiques agricoles, dans la prédiction des flux de carbone.

## ■ Les propriétés du couvert végétal et du sol contrôlent les flux de CO<sub>2</sub>

### • Deux sols aux propriétés différentes

Le sol de la parcelle extensive permet une rétention d'eau plus élevée que celle du sol de la parcelle intensive (capacité au champ de 45,0 % *versus* 42,3 %) et le point de flétrissement permanent apparaît aussi pour une humidité du sol plus importante en traitement extensif qu'intensif (31,7 % *versus* 28,2 %). Dans des conditions de faible disponibilité en eau, le point de flétrissement et en conséquence le niveau de stress hydrique sont plus vite atteints dans la parcelle extensive que dans la parcelle intensive. Au cours des étés et automnes 2003, 2005 et 2008, ceci a conduit à un plus grand nombre de semaines « sèches » consécutives en extensif qu'en intensif (environ 10 semaines, figure 1, *cf.* KLUMPP *et al.*, 2011). Ainsi **les propriétés du sol, contrôlées en partie par les pratiques agricoles, module les effets des précipitations sur les flux de carbone en conditionnant la teneur en eau du sol et son évolution temporelle, puis le statut trophique azoté et carboné**. Les deux communautés végétales répondent en effet différemment aux événements de pluie et d'assèchement du sol.

### • Impacts sur les processus de photosynthèse

Les résultats montrent en traitement intensif une photosynthèse invariante que ce soit en périodes sèches ou humides (figure 4), indiquant que l'apport de fertilisation azotée et une défoliation plus fréquente permettent indirectement de maintenir la productivité primaire à travers une demande en eau moins forte et une meilleure efficacité d'utilisation de l'azote en période de stress hydrique. En revanche, en traitement extensif où les stress hydriques se sont avérés plus prononcés, les résultats montrent une photosynthèse à la fois plus faible en périodes sèches que celle observée en périodes humides (figure 4) et que celle observée en traitement intensif dans les mêmes conditions de stress hydrique. Cette dernière observation souligne une **sensibilité à la disponibilité en eau du sol i) du couvert végétal et ii) de la sénescence associée plus importante en parcelle extensive qu'en parcelle intensive**. De plus, une faible disponibilité en eau a probablement **réduit l'accessibilité de l'azote minéral** ce qui, au regard de la diminution de l'activité photosynthétique, s'est avéré plus pénalisant pour la parcelle non fertilisée que pour la parcelle fertilisée en azote.

### • Impacts sur les processus de respiration de l'écosystème

La respiration de l'écosystème résulte de la combinaison des deux **respirations autotrophique** (respiration aérienne et souterraine des plantes) **et hétérotrophique**

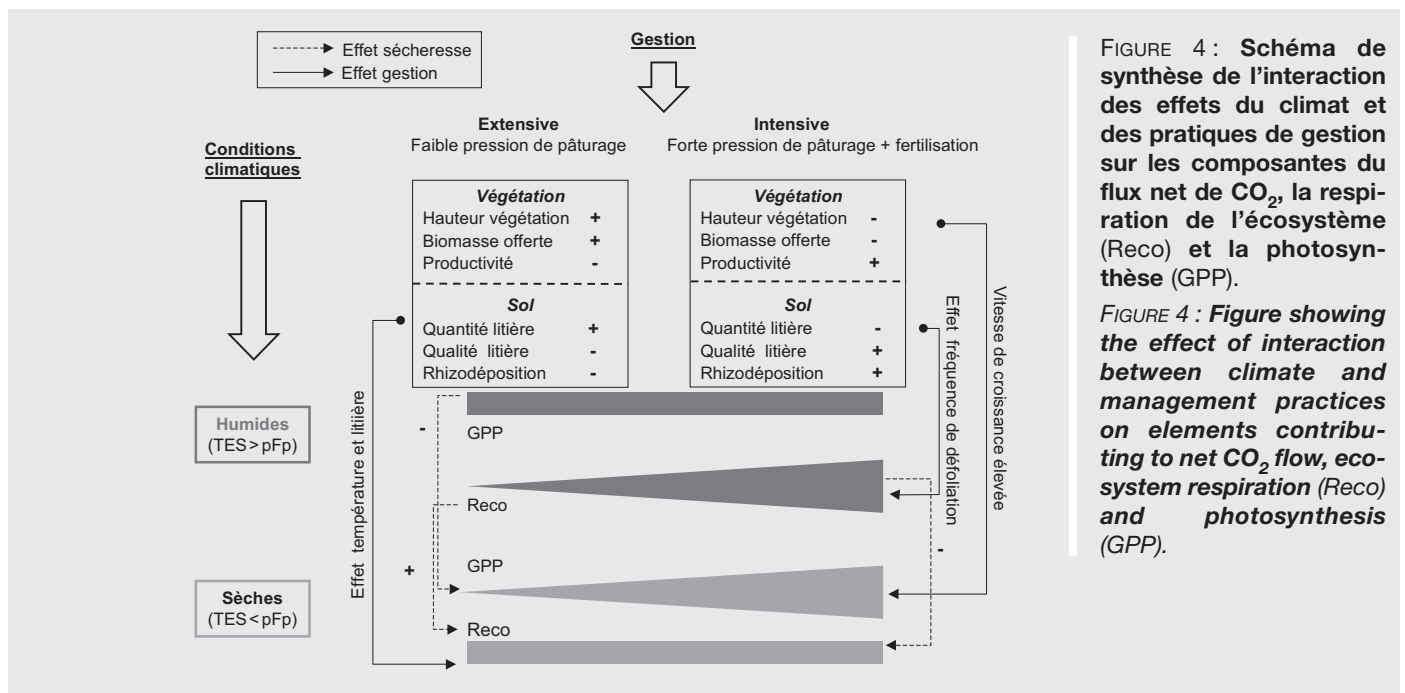


FIGURE 4 : Schéma de synthèse de l'interaction des effets du climat et des pratiques de gestion sur les composantes du flux net de CO<sub>2</sub>, la respiration de l'écosystème (Reco) et la photosynthèse (GPP).

FIGURE 4 : Figure showing the effect of interaction between climate and management practices on elements contributing to net CO<sub>2</sub> flow, ecosystem respiration (Reco) and photosynthesis (GPP).

(respiration microbienne du sol). Ces deux composantes, en partie **dépendantes de la disponibilité quantitative et qualitative en substrats du sol** (litière, matières organiques, biomasse, exsudats racinaires), sont par conséquent partiellement contrôlées par la GPP (BAHN *et al.*, 2008 ; KUTSCH *et al.*, 2009). **La température, ainsi que la teneur en eau du sol interviennent également** dans le contrôle de la respiration de l'écosystème. Or ces facteurs abiotiques peuvent être contraints par les pratiques agricoles. En effet, dans notre étude et après 6 années de gestion contrastée des deux parcelles en termes de fertilisation et de pression de pâturage, nous avons pu observer un changement dans les propriétés du sol (densité apparente, pFp, CC) conduisant à une modification des propriétés hydrodynamiques et chimiques du sol et, *in fine*, à une différence dans les flux de CO<sub>2</sub> observés (Reco). En périodes humides, la densité du couvert végétal et de la litière au sol en traitement extensif a permis de réduire les phénomènes d'évaporation (données non montrées) et, par conséquent, un meilleur maintien des conditions d'humidité du sol, réduisant alors les températures du sol et donc la respiration (figure 4). En périodes sèches, **la Reco de la parcelle extensive est plus importante que celle observée en périodes humides en raison de températures et d'une probable libération de carbone (via la respiration hétérotrophique) plus marquées** (MIGLIAVACCA *et al.*, 2011). **De ce fait, le stockage potentiel de carbone s'est avéré plus bas en extensif qu'en intensif durant les années sèches** (2003, 2005 et 2008).

A l'inverse, concernant la parcelle intensive, durant les périodes humides, en raison d'une meilleure disponibilité quantitative et qualitative de substrats pour la respiration hétérotrophique et donc d'une Reco plus élevée qu'en extensif (figure 4), le stockage potentiel de carbone s'est avéré plus réduit que celui du traitement extensif durant les années à saison de croissance plus humide. Ce résultat est attribuable à une rhizodéposition

plus importante, incluant en plus des exsudats racinaires la sénescence de racines plus fines et plus riches en azote (KLUMPP *et al.*, 2009) en intensif qu'en extensif, ce dernier traitement étant caractérisé par une végétation plus haute et à faible qualité de litière (BARDGETT *et al.*, 1998 ; KLUMPP *et al.*, 2009).

## Conclusion

Nous avons montré que les pratiques agricoles présentent des effets directs (piétinement, défoliation) et indirects (contrôlés par la structure du couvert végétal et son profil racinaire) sur les propriétés physiques du sol, ayant ainsi un effet sur la teneur en eau du sol et son évolution temporelle, conditionnant par là même l'accès à ses ressources azotées. Notre étude souligne ainsi, par une analyse des données à des résolutions temporelles différentes, l'importance des effets directs et indirects des facteurs biotiques et abiotiques régissant les activités de photosynthèse et de respiration de l'écosystème. L'échelle hebdomadaire, en période de croissance de la végétation, s'avère être la résolution temporelle la plus pertinente.

De plus, nous avons montré que les conditions environnementales (se traduisant par de faibles ou fortes teneurs en eau du sol) modulent les effets des pratiques agricoles sur les activités de photosynthèse et de respiration. L'application d'une fertilisation azotée et d'une pression de pâturage plus fortes maintiennent l'activité photosynthétique ainsi que le potentiel de la prairie à stocker du carbone durant les années où la saison de croissance est plus sèche que la normale. En revanche, les années où la saison de croissance est plus humide, le stockage potentiel de carbone est plus faible en intensif qu'en extensif, résultat probable d'une libération de CO<sub>2</sub> via la respiration hétérotrophique plus marquée en intensif (meilleure qualité de la litière).



Un des principaux leviers de l'agriculture pour contribuer à l'atténuation de l'effet de serre réside dans la capture du CO<sub>2</sub>. L'objectif est donc de maintenir, voire d'augmenter, le potentiel des agro-écosystèmes à capturer le CO<sub>2</sub> (améliorer la NEE). Nos travaux montrent ainsi qu'un **entretien des prairies de moyenne montagne en termes de chargement des animaux et de fertilisation azotée pourrait favoriser dans le temps le stockage du carbone et ce, dans une perspective de réchauffement climatique, avec une modification de la répartition des évènements pluvieux**. Ce type de préconisation reste cependant propre aux prairies de moyenne montagne et ne peut être généralisé à l'ensemble des prairies (de fauche, de plaine, etc.) compte tenu de contextes pédoclimatiques, de communautés végétales et de pratiques agricoles différents. Enfin, identifier et comprendre les mécanismes clés régissant l'activité des différentes communautés microbiennes (i. e. décomposeurs) en réponse aux variations de températures, de teneurs en eau du sol et de structure de la communauté végétale paraît fondamental en vue de quantifier et prédire la réponse des écosystèmes et du cycle global du carbone au changement climatique.

Accepté pour publication,  
le 13 avril 2012.

**Remerciements** : Cette étude a bénéficié du soutien des projets européens CarboEurope-IP, CarboExtreme, IMECC et ICOS. Nous remercions Robert Falcimagne ainsi qu'Olivier Darsonville pour leur précieuse aide technique.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLARD V., SOUSSANA J.F., FALCIMAGNE R. *et al.* (2007) : "The role of grazing management for the net biome productivity and greenhouse gas budget (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub>) of semi-natural grassland", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121, 47-58.
- AMMANN C., FLECHARD C.R., LEIFELD J., NEFTEL A., FUHRER J. (2007) : "The carbon budget of newly established temperate grassland depends on management intensity", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121, 5-20.
- AUBINET M., GRELE A., IBROM A., *et al.* (2000) : "Estimates of the annual net carbon and water exchange of forest: the EUROFLUX methodology", *Advances of Ecological Research*, 30, 113-175.
- BAHN M., RODEGHIERO M., ANDERSON-DUNN M. (2008) : "Soil respiration in european grasslands in relation to climate and assimilate supply", *Ecosystems*, 11, 1352-1367.
- BARDGETT R.D., WARDLE D.A., YEATES G.W. (1998) : "Linking above-ground and below-ground food webs: how plant responses to foliar herbivory influence soil organisms", *Soil Biology and Biochemistry*, 30, 1867-1878.
- CIAIS P., REICHSTEIN M., VIOVY N. *et al.* (2005) : "Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003", *Nature*, 437, 529-533.
- FAO (2006) : *Livestock's long shadows. Environmental issues and options*, 390 pp.
- GIEC (2007) : *Climate change 2007: The scientific basis* (Contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change), Cambridge University Press.
- HARPER C.W., BLAIR J.M., FAY P.A., KNAPP A.K., CARLISLE J.D. (2005) : "Increased rainfall variability and reduced rainfall amount decreases soil CO<sub>2</sub> flux in a grassland ecosystem", *Global Change Biology*, 11, 2, 322-334.
- JACOBS C.M.J., JACOBS A.F.G., BOSVELD F.C. (2007) : "Variability of annual CO<sub>2</sub> exchange from Dutch grasslands", *Biogeosciences*, 4, 803-816.
- KLUMPP K., FONTAINE S., ATTARD E., GLEIXNER G., LEROUX X., SOUSSANA J.F. (2009) : "How land use change shifts C-poor, productive ecosystems to C-rich, unproductive ecosystems and vice versa?", *J. of Ecology*, 91, 867-885
- KLUMPP K., TALLEC T., GUIX N., SOUSSANA J.F. (2011) : "Long-term impacts of agricultural practices and climatic variability on carbon storage in a permanent pasture", *Global Change Biology*, doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02490.x
- KNAPP A.K., FAY P.A., BLAIR J.M. *et al.* (2002) : "Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland", *Science*, 298, 2202-2205.
- KUTSCH W.L., BAHN M., HEINEMEYER A. (2009) : *Soil carbon dynamics*, Cambridge University Press.
- MIGLIAVACCA M., REICHSTEIN R., RICHARDSON A.D. *et al.* (2011) : "Semi empirical modeling of abiotic and biotic factors controlling ecosystem respiration across eddy covariance sites", *Global Change Biology*, 17, 390-409.
- REICHSTEIN M. *et al.* (2005) : "On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration review and improved algorithm", *Global Change Biology*, 11, 1-16.
- RICHARD L.A., WEAVER L.R. (1943) : "Fifteen-Atmosphere Percentage as Related to the Permanent Wilting Percentage", *Soil Science*, 56, 331-339.
- RISCH A.C., FRANCK D.A. (2007) : "Effects of increased soil water availability on grassland ecosystem carbon dioxide fluxes", *Biogeochemistry*, 86, 91-103.
- SCHMITT M., BAHN M., WOHLFAHRT G., TAPPEINER U., CERNUSCA A. (2010) : "Land use affects the net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange and its components in mountain grasslands", *Biogeoscience*, 8, 2297-2309.
- SCHULZE E.D., LUYSSAERT P., CIAIS P. *et al.* (2009) : "Importance of methane and nitrous oxide for europe's terrestrial greenhouse-gas balance", *Nature Geoscience*, 2, 842-850.
- SOUSSANA J.F., ALLARD V., PILEGAARD K. *et al.* (2007) : "Full accounting of the greenhouse gas (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) budget of nine European grassland sites", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121, 121-134.
- SOUSSANA J.F., TALLEC T., BLANFORT V. (2010) : "Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands", *Animal*, 4, 334-350.
- ZEEMAN M.J., HILLER R., GILGEN A.K., MICHNA P., PLUSS P., BUCHMANN N., EUGSTER W. (2010) : "Management and climate impacts on net CO<sub>2</sub> fluxes and carbon budgets of three grasslands along an elevational gradient in Switzerland", *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 519-530.



Association Française pour la Production Fourragère

---

La revue *Fourrages*

est éditée par l'Association Française pour la Production Fourragère

**[www.afpf-asso.org](http://www.afpf-asso.org)**



AFPF – Centre Inra – Bât 9 – RD 10 – 78026 Versailles Cedex – France

Tél. : +33 01 30 21 99 59 – Fax : +33 01 30 83 34 49 – Mail : [afpf.versailles@gmail.com](mailto:afpf.versailles@gmail.com)

Association Française pour la Production Fourragère