

Mesure des flux de CO₂ et bilan carboné de grandes cultures : état de la question et méthodologie

Christine Moureaux ⁽¹⁾, Bernard Bodson ⁽²⁾, Marc Aubinet ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Gembloux Agricultural University – FUSAGx. Unité de Physique des Biosystèmes. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique). E-mail : aubinet.m@fsagx.ac.be

⁽²⁾ Gembloux Agricultural University – FUSAGx. Unité de Phytotechnie des Régions tempérées. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique).

Reçu le 7 janvier 2008, accepté le 8 avril 2008.

L'augmentation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone (CO₂), gaz qui participe au renforcement de l'effet de serre, a mis en évidence la nécessité de mieux comprendre le cycle du carbone et sa dynamique. En particulier, de larges incertitudes sont actuellement associées aux échanges entre les écosystèmes et l'atmosphère. Des réseaux régionaux se sont constitués afin d'étudier ces flux de CO₂. En Europe, le réseau CarboEurope-IP étudie les échanges entre écosystèmes terrestres et atmosphère. Il regroupe plus de 100 sites forestiers, agricoles ou de prairie. Cet article décrit le projet " Mesure des flux de CO₂ et bilan carboné des grandes cultures " qui s'intègre dans ce réseau et dont l'objectif général est de quantifier et de comprendre l'évolution des flux de CO₂ d'une succession de cultures sur une parcelle agricole belge avec son environnement. Pour atteindre cet objectif, des mesures sont effectuées selon différentes techniques et à différentes échelles spatiales et temporelles. Des mesures de l'échange net de CO₂ sont effectuées à l'échelle spatiale de la parcelle et avec une fréquence semi-horaire. À la même fréquence, la respiration du sol est mesurée à l'échelle de la mini-parcelle de sol. À l'échelle de la feuille, des mesures de son assimilation nette sont effectuées chaque semaine. Enfin, des échantillonnages de plantes sont effectués dans le but de déterminer le contenu en carbone dans la culture. Après avoir décrit les objectifs du projet, cet article présente chacune des techniques de mesure effectuées et les informations qu'elles fournissent. Il expose également comment les résultats des différentes mesures peuvent être combinés afin de déduire un bilan carboné complet de la parcelle agricole.

Mots-clés. Bilan carboné, covariance de turbulence, cultures, CarboEurope-IP, photosynthèse, respiration autotrophe, respiration hétérotrophe.

CO₂ flux measurement and carbon balance of agricultural crops. The increase of carbon dioxide (CO₂) atmospheric concentration, which is a greenhouse gas, put in stress the need of a better understanding of the carbon cycle and its dynamic. In particular, the exchanges between ecosystems and atmosphere are characterized by large uncertainties. Regional networks were set up to study these CO₂ fluxes. In Europe, the CarboEurope-IP network studies the exchanges between terrestrial ecosystems and the atmosphere. It includes more than 100 sites of forests, croplands or grasslands. This article presents the project " CO₂ flux measurement and carbon balance of agricultural crops " which was developed in this frame. The main aim of this project is to quantify the CO₂ flux evolution of Belgian crops and understand its response to biotic and abiotic factors. In order to meet this goal, measurements are carried out at different spatial and temporal scales. Net ecosystem exchange measurements are carried out every half-hour at the parcel scale. Soil respiration is measured at the soil plot scale with the same frequency. At the leaf scale, net assimilation measurements are performed once a week. Moreover, plant samplings are carried out to determine the crop carbon content. After presenting the objectives of the project, this paper presents the measurement techniques and the fluxes they allow obtaining. The procedures used to combine the measurements in order to assess a complete crop carbon balance are also detailed.

Keywords. Carbon balance, eddy covariance, crops, CarboEurope-IP, photosynthesis, autotrophic respiration, heterotrophic respiration.

1. INTRODUCTION

Les concentrations atmosphériques en dioxyde de carbone (CO₂), en hémioxyde d'azote (N₂O) et en

méthane (CH₄), tous trois gaz à effet de serre, n'ont cessé d'augmenter depuis la révolution industrielle du fait des activités humaines. Le dioxyde de carbone est le gaz qui a l'impact le plus important

sur l'effet de serre. Sa concentration atmosphérique ($[\text{CO}_2]$) a augmenté de $280 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ en 1950 à $379 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ en 2005 (IPCC, 2007). Les mesures effectuées à partir de carottes glacières montrent que cette valeur est supérieure aux concentrations observées durant les 65000 dernières années, lesquelles auraient oscillé entre 180 et $300 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$. Durant les 10 dernières années, l'augmentation annuelle de la $[\text{CO}_2]$ a été plus importante que l'augmentation moyenne des 45 dernières années, c'est-à-dire la période couverte par des mesures directes de concentration atmosphérique.

La composition isotopique du CO_2 atmosphérique et la diminution observée de la concentration d'oxygène démontrent que la principale cause d'émission de CO_2 est liée à la consommation de carburant fossile. Celle-ci est estimée à $23,5 \pm 1,5 \text{ Gt CO}_2$ par an pour les années 1990 (valeur \pm intervalle de confiance à 90 %). La deuxième source anthropique par ordre d'importance résulte des changements d'utilisation des sols et en particulier de la déforestation. Elle représente le quart de la précédente, i.e. $5,9 \pm 4,1 \text{ Gt CO}_2$ par an pour les années 1990 (IPCC, 2007). Par ailleurs, le Groupe International d'Experts pour le Climat (IPCC) affirme, avec une certitude de 90 %, que ces émissions sont responsables du réchauffement climatique global.

Les émissions anthropiques de CO_2 constituent une des composantes du cycle global du carbone. Ce cycle comporte quatre grands compartiments : l'océan, l'atmosphère, les écosystèmes terrestres et les composés fossiles. Le carbone circule entre eux dans différentes proportions. Entre l'atmosphère et la biomasse terrestre se réalise un double flux : le carbone pénètre dans la biomasse par le processus de photosynthèse et retourne dans l'atmosphère par la respiration végétale et animale, par la décomposition et la respiration des microorganismes ainsi que par les activités humaines.

Durant les années 1990, les échanges nets entre l'atmosphère et les écosystèmes terrestres et les océans ont été estimés à, respectivement, $5,1 \pm 2,6 \text{ Gt CO}_2$ par an et $6,2 \pm 1,8 \text{ Gt CO}_2$ par an (Houghton et al., 2001), ces écosystèmes absorbant ainsi du CO_2 et ralentissant l'augmentation des concentrations atmosphériques. En effet, sur la même période, les émissions anthropiques résultant de la combustion de fuel fossile ont été estimées à $23,1 \pm 1,5 \text{ Gt CO}_2$ et l'augmentation de la $[\text{CO}_2]$ atmosphérique à seulement $11,7 \pm 0,4 \text{ Gt CO}_2$. Depuis la seconde partie des années 1990, d'énormes efforts ont été fournis pour quantifier l'ampleur de l'absorption de carbone par les écosystèmes terrestres et les localiser. Il est maintenant admis que les écosystèmes terrestres extratropicaux de l'hémisphère nord sont les plus actifs (Tans et al., 1990 ; Ciais et al., 1995 ; Brown, 1996 ; Houghton et al., 1999 ; Rayner et al., 1999 ; Baker, 2000 ; Bousquet et al., 2000 ; Schimel et al., 2000 ; Heimann, 2001 ; Houghton et al., 2001 ; McGuire et al., 2001 ; Pacala et al., 2001 ; Schimel et al., 2001 ; Peylin

et al., 2002). Cependant, les contributions respectives de l'Europe, de l'Amérique du Nord et de l'Asie sont très largement incertaines (Schimel et al., 2001). De la même façon, la compréhension des mécanismes mis en jeu et leur vulnérabilité aux changements climatiques et aux modes de gestion sont également incertains.

L'amplitude actuelle des puits de CO_2 pourrait ne pas être maintenue dans le futur (Schimel et al., 2001) car les processus principaux mis en jeu vont vraisemblablement diminuer. Par exemple, les effets de l'implantation d'une forêt sur une terre agricole peuvent décroître lorsque la forêt atteindra sa maturité (Gower et al., 1996). De la même façon, la séquestration accrue de carbone par les écosystèmes résultant des concentrations croissantes en CO_2 et en azote vont saturer lorsque de hautes concentrations seront atteintes ou qu'une autre ressource deviendra limitante (Falkowski et al., 2000 ; Houghton et al., 2001 ; Canadell et al., 2004).

Les effets du changement climatique sur les écosystèmes sont également très variables d'un écosystème à l'autre. Il semble que l'amplitude de la séquestration terrestre ait une grande variabilité annuelle en réponse aux variations climatiques (Bousquet et al., 2000 ; Rödenbeck et al., 2003) et par conséquent une grande sensibilité aux changements climatiques globaux. En 2003, une sécheresse exceptionnelle a été observée en Europe. Plusieurs études récentes en ont analysé les conséquences sur le bilan carboné d'écosystèmes terrestres européens (Ciais et al., 2005 ; Granier et al., 2007 ; Reichstein et al., 2007). Ce type d'étude permet en effet d'analyser la réponse des écosystèmes terrestres à des conditions climatiques extrêmes qui pourraient être représentatives de notre climat à venir (Lawlor, 1998 ; Houghton et al., 2001 ; Saxe et al., 2001 ; Meehl et al., 2004 ; Schär et al., 2004). Il en ressort que de tels événements climatiques peuvent significativement altérer le bilan carboné des écosystèmes européens. Ils peuvent contrebalancer les effets positifs d'une saison de croissance plus longue et plus chaude, altérer la bonne santé et la productivité des écosystèmes, voire inverser des puits en sources de CO_2 (Ciais et al., 2005 ; Granier et al., 2007 ; Reichstein et al., 2007). Dès lors, les échanges par les écosystèmes terrestres accélèreraient plutôt que ralentiraient l'augmentation des $[\text{CO}_2]$ atmosphériques.

Dans ces conditions apparaît clairement la nécessité de mieux comprendre la dynamique du cycle du carbone et d'estimer sa capacité à absorber une partie des émissions anthropiques de CO_2 . Face à ce défi, la communauté scientifique a mis sur pied une structure complexe visant à comprendre les multiples composantes du système carbone – climat – écosystèmes – humains et leurs interactions.

Dans cet article, nous décrirons tout d'abord le réseau européen CarboEurope-IP qui fédère la plupart

des groupes de recherche européens travaillant sur les échanges écosystèmes terrestres – atmosphère et dont le site agricole de Lonzée constitue un maillon. Ce réseau trouve ses origines en 1996 et s'intéressait alors exclusivement aux écosystèmes forestiers. L'intérêt d'étudier les interactions entre les écosystèmes agricoles et le climat n'a été reconnu que plus récemment. La justification de leur étude est discutée au paragraphe 3. Le paragraphe 4 définit les différents échanges de CO₂ pouvant se produire entre une parcelle agricole et l'atmosphère. Enfin, l'ensemble du projet de recherche "Mesure des flux de CO₂ et bilan carboné des grandes cultures" (Convention n°03/08-304, Communauté française de Belgique, Direction générale de l'Enseignement non obligatoire et de la Recherche scientifique, Projet "Action de Recherche Concertée") qui est mis en œuvre sur le site expérimental de Lonzée est décrit au paragraphe 5, suivi des conclusions et d'une série de perspectives de recherche.

2. LE PROJET CARBOEUROPE-IP

L'objectif fondamental du projet européen CarboEurope-IP (contrat n°GOCE-CT-2003-505572) est de comprendre et de quantifier, tant à l'échelle locale, régionale que continentale, le bilan carboné terrestre en Europe ainsi que les incertitudes qui y sont associées, comme indiqué notamment par Baldocchi et al. (2001), Baldocchi (2003) et (Valentini, 2003). Cela implique de :

- déterminer le bilan carboné européen, sa structure spatiale et son évolution temporelle,
- comprendre les mécanismes et les processus régissant le cycle du carbone des écosystèmes européens et la manière dont ils peuvent être affectés par la variabilité et les changements climatiques et par les interventions humaines,
- développer un système d'observation pour identifier les changements des [CO₂] atmosphériques et des stocks de carbone dans les écosystèmes en conformité avec les engagements européens envers le protocole de Kyoto de réduction des émissions de CO₂ et d'accroissement de la séquestration dans les écosystèmes.

Le réseau CarboEurope-IP est un projet intégré du 6^e Programme Cadre et a démarré en 2003. Il a émergé de la fusion de plusieurs projets européens et constitue par conséquent une communauté interdisciplinaire et cohérente de recherche dans les domaines de la mesure et de la modélisation du carbone dans les écosystèmes et dans l'atmosphère. Pour atteindre ses nombreux objectifs, le projet intégré s'est organisé en quatre composantes :

- mesures à l'échelle de l'écosystème,
- mesures atmosphériques à l'échelle continentale,
- expérimentation régionale dans le but de réduire les incertitudes lors des extrapolations spatiales,
- intégration européenne regroupant les différentes données en une estimation du bilan carboné européen.

Notre projet est développé dans le cadre de la première composante qui étudie plus spécifiquement les processus d'échange entre les écosystèmes et l'atmosphère et mesure ces échanges à une échelle spatiale de l'ordre du kilomètre carré. Au total, 103 sites en Europe (**Figure 1**) mesurent les échanges de CO₂ à cette échelle spatiale au moyen de la même technique de mesure appelée covariance de turbulence ou, en anglais, *eddy covariance*. Les sites étudiés sont des forêts (50 %), des prairies (29 %) et des cultures (21 %) et couvrent toute l'Europe : du sud de l'Espagne à la Laponie et de l'Irlande à la Hongrie.

Le principe des mesures d'*eddy covariance* est basé sur le fait que la couche limite atmosphérique est caractérisée par la présence de mouvements turbulents qui sont responsables du transport vertical

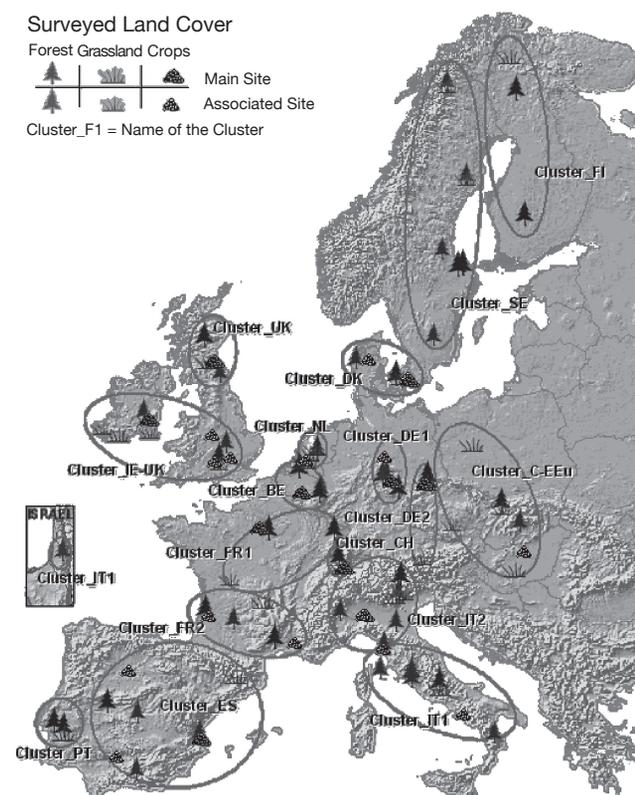


Figure 1. Carte des sites appartenant au réseau européen CarboEurope-IP — *Map of the sites included in the European network CarboEurope-IP.*

de traceurs comme, par exemple, le CO₂, la vapeur d'eau ou la chaleur sensible. La technique d'*eddy covariance* échantillonne ces tourbillons de manière à établir le taux d'échange de traceur entre l'écosystème et l'atmosphère. Cette mesure requiert la mesure simultanée et à haute fréquence de la concentration du traceur et de la vitesse verticale du vent. Les bases théoriques de cette mesure sont décrites par Aubinet et al. (2000), Massman et al. (2002), Baldocchi (2003), Lee et al. (2004).

La théorie de la technique d'*eddy covariance* est attribuée à Sir Osborne Reynolds (Reynolds, 1895). Toutefois, l'application de la méthode à des mesures de flux de CO₂ sur de longues périodes n'a été possible qu'à la suite du développement d'anémomètres soniques (Coppin et al., 1983), d'analyseurs ouverts de gaz par absorption infrarouge à réponse rapide (Bingham et al., 1978 ; Jones et al., 1978 ; Brach et al., 1981 ; Ohtaki et al., 1982) et de l'amélioration de la performance des systèmes d'acquisition. La première année de mesure en continu est accréditée à Wofsy et al. (1993). Ces mesures ayant démarré en 1990, sur une forêt décidue, se poursuivent encore aujourd'hui. Après 1993, plusieurs études mesurèrent les flux de CO₂ et de vapeur d'eau au-dessus de forêts nord-américaines (Goulden et al., 1996a ; 1996b ; Greco et al., 1996), japonaises (Yamamoto et al., 1999), amazoniennes (Grace, 1996), européennes (Grelle et al., 1996 ; Valentini et al., 1996) et boréales (Black et al., 1996 ; Jarvis et al., 1997). En 1996, le premier réseau européen de sites de mesures de flux de CO₂ s'est créé. Il comportait 16 sites, tous forestiers. Au début des années 2000, l'intérêt d'étudier les cultures et les prairies a conduit à la création de nouveaux sites. L'importance des interactions entre les cultures et le climat est présentée ci-après. À l'heure actuelle, des réseaux similaires se sont constitués à travers le globe (Amériflux en Amérique du Nord, Asiaflux en Asie du Sud-Est, Ozflux en Australie, LBA au Brésil, Chinaflux en Chine, CarboAfrica en Afrique sub-saharienne, etc.) Tous ces réseaux régionaux couvrent ainsi une très large variété d'écosystèmes et ils se sont fédérés en un réseau mondial dénommé FLUXNET qui comporte, au total, plus de 400 sites (FLUXNET, 2007).

3. INTERACTIONS ENTRE AGRICULTURE ET CLIMAT

Aujourd'hui, 36 % des territoires hors glaciers sont intensivement utilisés comme cultures et pâturages (Desjardins et al., 2007). En Europe, les terres arables couvrent environ un tiers du territoire. L'importance de l'agriculture en termes d'utilisation du territoire apparaît donc de manière évidente.

Les interactions entre climat et agriculture sont nombreuses. D'une part, le climat influence l'agriculture via la longueur de la saison de végétation, la température de l'air et du sol, l'humidité de l'air et du sol, le rayonnement photosynthétiquement actif disponible, l'absence ou la présence de situation de stress, etc. D'autre part, l'agriculture émet des gaz à effet de serre qui influencent le climat. En effet, l'agriculture émet vers l'atmosphère du CO₂ mais aussi du N₂O et du CH₄. Elle est reconnue comme la plus importante source biosphérique de CO₂ et contribue aux émissions anthropiques de CH₄ et N₂O à raison de 45-50 % et 20-70 %, respectivement (Cole, 1996 ; Mosier et al., 1998 ; Pattey et al., 2007). Les émissions de CO₂ des cultures vers l'atmosphère sont dues à la respiration des plantes et à la décomposition de la matière organique du sol. Le N₂O provient majoritairement (plus de 90 %) des sols cultivés à travers les processus de dénitrification et de nitrification de la matière organique. Les principales émissions de CH₄ sont dues aux cultures de riz irriguées ou résultent de la digestion des ruminants et des déjections animales (fumier, lisier, etc.) stockées de manière anaérobie. Les incertitudes associées aux émissions de N₂O et de CH₄ demeurent actuellement importantes.

La couverture du sol influence également largement le climat régional. En particulier, le type de végétation influence le climat local et régional du fait des variations de l'albédo, de l'humidité du sol, de la rugosité de la surface et de la surface de végétation à partir de laquelle des échanges de chaleur latente et sensible se produisent (Bonan, 2002). Des modifications dans la distribution et le fonctionnement des écosystèmes influencent les cycles biogéochimiques et les échanges d'énergie. La plupart des interactions surface - atmosphère se produisant par le biais de la végétation (Raddatz, 2007), ces modifications peuvent dès lors contribuer aux changements climatiques. Les techniques de gestion des cultures peuvent aussi influencer le climat local et régional. Par exemple, le surpâturage, la mise en culture et la déforestation peuvent contribuer à un affaiblissement des précipitations (Bonan, 2002). L'irrigation peut augmenter la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère et conduire à une augmentation de la nébulosité et des précipitations.

La possibilité de stocker du carbone dans les sols agricoles est proposée comme moyen d'atténuation dans le cadre du protocole de Kyoto. En effet, les accords de Marrakech (adoptés en 2005 lors de la Conférence des Parties de Montréal) autorisent que les puits et les sources biosphériques soient comptabilisés durant la première période 2008-2012 (Smith et al., 2004). De nombreuses études sont menées dans le but de déterminer le potentiel de stockage dans les sols agricoles et les pratiques culturales capables de favoriser ce stockage, notamment par Smith et al.

(2000), Vleeshouwers et al. (2002), Freibauer et al. (2004) et Smith (2004).

Le contenu en carbone organique d'un sol dépend de la différence entre les apports de carbone fixés par photosynthèse et les pertes via les processus de décomposition. À l'échelle locale, l'érosion peut provoquer une perte ou un gain de carbone estimable alors que pour de grandes superficies, l'effet net de l'érosion sur les émissions de CO₂ n'est pas facilement définissable (Smith et al., 2004). La qualité et la quantité des apports de matière organique dans les sols ainsi que le taux de décomposition de carbone organique du sol sont déterminés par les interactions entre le climat et le sol ainsi que par l'utilisation du sol et le régime de restitution des matières organiques. Dans les écosystèmes naturels, le climat et les conditions de sol sont les premiers facteurs déterminant le bilan carboné du sol car ils influencent à la fois la production de l'écosystème et le taux de décomposition. Par contre, dans les écosystèmes agricoles, l'utilisation du sol et la gestion culturale modifient d'une part les apports de matière organique via le choix des cultures, l'application de fertilisants, les modalités de récolte, la gestion des résidus et d'autre part, le taux de décomposition, les conditions du sol et son microclimat par la sélection de la culture, du travail du sol, d'une éventuelle pratique de mulching, de l'application de fertilisants, de l'irrigation, du chaulage (IPCC, 1997). Les exportations de la production agricole constituent également des pertes de carbone pour l'écosystème. Dans nos analyses, nous considérons que ce carbone est réémis très rapidement vers l'atmosphère sous forme de CO₂.

L'évaluation des pratiques agricoles en termes de stockage de carbone est réalisée en comparant les apports et les pertes de carbone organique dans le sol. Il ne faut cependant pas négliger le fait que ces pratiques peuvent modifier les émissions de CH₄ ou de N₂O qui ont aussi un rôle déterminant dans le bilan total des gaz à effet de serre. Par exemple, un travail simplifié du sol peut accroître la quantité de carbone séquestrée dans le sol mais il peut également augmenter les phénomènes de dénitrification et donc provoquer des émissions supplémentaires de N₂O (Six et al., 2004). Le travail du sol sans labour peut également générer ou aggraver des problèmes de compaction du sol, de prolifération d'adventices ou de nuisibles (Seguin et al., 2007). L'apport de matière organique peut augmenter l'émission d'N₂O. De la même manière, l'introduction de cultures intercalaires peut accroître la séquestration de carbone mais implique une utilisation accrue des réserves en eau du sol et nécessite pour leur installation une consommation supplémentaire de carburant (Seguin et al., 2007). Les impacts de ces différentes techniques sont nombreux et leurs effets à long terme doivent être analysés au cas par cas.

La séquestration de carbone est habituellement mesurée en terme de quantité totale de carbone stockée dans le sol. Toutefois, la manière dont ce carbone est stocké et la durée du stockage dépendent d'un grand nombre de paramètres (Balesdent et al., 2000 ; Six et al., 2001 ; Gleixner et al., 2002 ; Kaiser et al., 2002). Il faut savoir que la séquestration de carbone dans les sols n'évolue pas de manière linéaire au cours du temps : des expériences menées à long terme montrent que la teneur en carbone des sols augmente rapidement après la mise en place d'un changement d'utilisation du sol ou d'une pratique culturale (Smith et al., 1997a ; 1997b, notamment) mais que le taux d'accumulation diminue avec le temps. Après 20 à 100 ans, un nouvel équilibre est atteint ne permettant plus de nouvelles potentialités de séquestration (Freibauer et al., 2004). Ce phénomène est parfois décrit comme une saturation du puits de carbone (Watson et al., 2000). De plus, l'arrêt d'une pratique agricole permettant le stockage de carbone provoque une réémission de CO₂ plus rapide que son accumulation (Smith et al., 1996 ; Arrouays et al., 2002).

La stratégie consistant à séquestrer du carbone dans les sols dans le but d'atténuer l'augmentation des concentrations atmosphériques en CO₂ peut être efficace durant les premières décennies du 21^e siècle (Battelle, 2000 ; Freibauer et al., 2004). À long terme, elle n'est pas une solution pour réduire le taux d'enrichissement de l'atmosphère en gaz à effet de serre et donc, elle ne dispense pas de chercher des alternatives durables à l'utilisation d'énergie fossile et des approches permettant de diminuer la consommation d'énergie. En effet, 80 % de la production globale d'énergie viennent aujourd'hui des combustibles fossiles et de l'énergie nucléaire.

4. LES ÉCHANGES DE CO₂ À L'ÉCHELLE D'UNE CULTURE

Afin de mieux décrire le projet " Mesure des flux de CO₂ et bilan carboné des grandes cultures ", il est nécessaire de rappeler quelques définitions concernant les échanges de CO₂ entre les écosystèmes terrestres et, en particulier, les cultures et l'atmosphère. Une culture absorbe le CO₂ via le processus de photosynthèse. La quantité de carbone qu'elle peut ainsi assimiler est dénommée la productivité primaire brute (GPP : *Gross Primary Productivity*). Par ailleurs, cette culture réémet du CO₂ par la respiration des plantes et du sol. Ce flux est appelé la respiration totale de l'écosystème (TER : *Total Ecosystem Respiration*). La différence entre ces deux flux importants et opposés est nommée échange net de l'écosystème (NEE : *Net Ecosystem Exchange*). Ces flux sont schématisés à la **figure 2**.

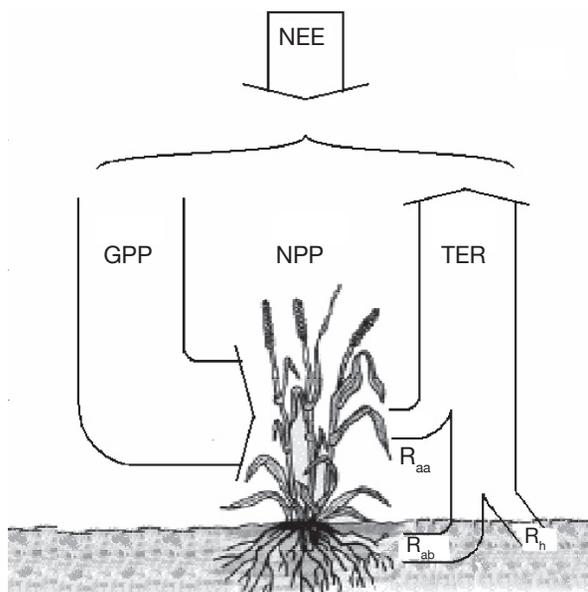


Figure 2. Représentation des flux de CO_2 échangés entre une culture et l'atmosphère — CO_2 fluxes exchanged between a cropland and the atmosphere.

NEE : Échange Net de l'Écosystème — *Net Ecosystem Exchange* ; GPP : Productivité Primaire Brute — *Gross Primary Productivity* ; NPP : Productivité Primaire Nette — *Net Primary Productivity* ; TER : Respiration Totale de l'Écosystème — *Total Ecosystem Respiration* ; R_{aa} : respiration autotrophe des parties aériennes — *above ground autotrophic respiration* ; R_{ab} : respiration autotrophe du sol — *below ground autotrophic respiration* ; R_h : respiration hétérotrophe — *heterotrophic respiration*.

La TER résulte d'une part de l'activité de la plante et des mycorhizes qui sont associées à ses racines (respiration couramment qualifiée dans la littérature de respiration autotrophe, R_a), d'autre part de la décomposition de la matière organique du sol par les microorganismes (respiration hétérotrophe, R_h). La TER peut aussi être décomposée en une partie résultant des parties aériennes de la plante (R_{aa}) et une partie résultant de la respiration du sol (SR) qui est la somme de la respiration autotrophe souterraine (R_{ab}) et de la respiration hétérotrophe (R_h) (**Figure 2**).

Seule une partie du carbone assimilé par la culture est réémise vers l'atmosphère via les processus de respiration autotrophe. Du carbone est en effet stocké dans les tissus de la plante, c'est la productivité primaire nette (NPP : *Net Primary Productivity*).

En comparant l'échange net de la culture (NEE) à la quantité de carbone qui est exportée lors de la récolte, on peut déterminer si une culture, sur un intervalle de temps donné, se comporte comme une source ou un puits de carbone. Cette différence est la NBP (*Net Biome Productivity*).

5. PROJET "MESURE DES FLUX DE CO_2 ET BILAN CARBONÉ DES GRANDES CULTURES"

5.1 Description générale du projet

L'objectif général de ce projet est de quantifier et de comprendre l'évolution des échanges de CO_2 d'une succession de cultures avec son environnement. Plus particulièrement, les objectifs sont :

- de mesurer les flux nets de CO_2 échangés par une culture avec l'atmosphère et d'estimer la séquestration ou l'émission nette de carbone par la culture,
- d'analyser les effets des variations climatiques inter- et intra- annuelles sur les flux de CO_2 échangés par la culture et en déduire les mécanismes qui les régissent,
- d'identifier les rôles respectifs du sol et de la plante dans ces flux et mettre en évidence les variables et les processus physiologiques qui contrôlent les mécanismes de réponse des flux au climat,
- d'étudier l'impact des interventions culturales sur les flux de CO_2 en liaison avec les mécanismes biologiques du sol,
- d'établir un bilan carboné complet de la culture et de déterminer la répartition du carbone séquestré / émis entre le sol et les parties récoltées et non récoltées de la végétation.

Dans ce but, de nombreuses mesures sont effectuées à différentes échelles spatiales et temporelles. Lorsque c'est possible, les résultats obtenus à partir de différentes techniques opérées à différentes échelles sont confrontées afin de valider les mesures. Trois équipes de la Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux travaillent conjointement à ce projet : l'Unité de Physique des Biosystèmes, l'Unité de Phytotechnie des Régions tempérées et le Laboratoire d'Écologie microbienne et d'Épuration des Eaux usées. Le projet est financé par la Communauté française de Belgique (Projet ARC) et par la Communauté européenne (Projet CarboEurope).

5.2 Description du site et des mesures

Les mesures sont réalisées sur une parcelle agricole de 11,8 ha, sise à Lonzée, commune de Gembloux (Belgique). Ce site est maintenu sous culture depuis plus de 70 ans et depuis près de 10 ans, il est cultivé selon une rotation de 4 ans, largement pratiquée dans la région limoneuse. Depuis le début des mesures, les cultures qui se sont succédées sont la betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.) (2004), le blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) (2005), les pommes de terre pour plants (*Solanum tuberosum* L.) (2006) et, à nouveau, le blé d'hiver (2007). En 2008, des betteraves sucrières

seront à nouveau cultivées. Le site est caractérisé par un climat tempéré maritime avec une température moyenne de 10 °C et une pluviométrie annuelle de l'ordre de 800 mm. Le sol est un Luvisol (classification FAO). Le site a été décrit en détail dans Moureaux et al. (2006).

À l'échelle de la plante, des échantillons sont prélevés une fois par quinzaine ou une fois par semaine, selon le rythme de développement de la culture. Quatre zones de prélèvement sont définies à proximité de la station météorologique et du système d'*eddy covariance* de manière telle à ne pas perturber les mesures de ce dernier. Les échantillons sont répétés dans ces quatre zones. La matière sèche et le contenu en carbone de ces échantillons sont mesurés et extrapolés à l'ensemble de la culture. Ces mesures permettent d'obtenir une estimation de la productivité primaire nette (NPP).

À l'échelle de la plante, toujours, les surfaces des feuilles et des différents organes sont mesurées au cours du développement des cultures. Un suivi visuel régulier est également mis en place dans le but de définir les stades de développement, de suivre l'ordre d'apparition et de disparition des différents organes, d'observer l'évolution de la sénescence et de détecter d'éventuelles maladies. Les dépositions d'azote sont également mesurées.

À l'échelle de la mini-parcelle de sol, les flux de respiration de sol (SR) sont mesurés, chaque demi-heure, à l'aide d'un système automatique utilisant le principe de la chambre fermée dynamique (Norman et al., 1992 ; Longdoz et al., 2000) mis au point à l'Unité de Physique des Biosystèmes (Suleau et al., 2008). Dans ce système, un collier est inséré dans le sol. Pendant la mesure, il est fermé par un couvercle et relié par un circuit aérodynamique à un analyseur de concentration de CO₂ par spectrométrie infrarouge. Le circuit aérodynamique étant fermé, la respiration contribue à augmenter la concentration de CO₂ dans le système. La mesure est déduite de la pente de l'évolution de la concentration de CO₂ en fonction du temps. Ces mesures permettent d'étudier l'évolution temporelle et climatique de la respiration du sol. Toutefois, comme les chambres sont en nombre limité et placées en des positions fixes, elles ne renseignent pas de la variabilité spatiale des flux. C'est la raison pour laquelle, pendant les périodes cultivées et à raison d'une fois par semaine, des mesures additionnelles sont effectuées de manière extensive au travers de la parcelle agricole avec un système portable, basé sur le même principe.

Toujours à l'échelle de la mini-parcelle de sol, des mesures microbiologiques sont menées avec l'objectif de déterminer les quantités d'azote et de carbone microbiens et les respirations basales et induites. Les premières permettent d'estimer l'importance des populations microbiennes et les secondes renseignent

sur leur activité. Ces mesures sont effectuées afin d'expliquer la variabilité spatiale de la SR.

À l'échelle de la feuille, l'assimilation nette est mesurée à l'aide d'un poromètre (Licor 6400, Licor Inc., Lincoln, NE, USA). Cet appareil permet de mesurer les échanges de CO₂ d'une feuille sous conditions contrôlées (température, déficit de pression de vapeur, rayonnement incident, [CO₂] ambiante). Lors des mesures, une partie de feuille est insérée dans la pince de mesure. Les conditions de température et de déficit de pression de vapeur de la feuille et de [CO₂] de l'air sont maintenues constantes aux valeurs que connaissait la feuille avant la mesure. Le rayonnement varie par palier des conditions saturantes à l'obscurité. À chaque palier, l'assimilation nette de la feuille est mesurée. On obtient ainsi la réponse de l'assimilation nette d'une feuille au rayonnement (réponse A-Q).

Enfin, à l'échelle de la parcelle, un système de mesure des flux turbulents (*eddy covariance*) fournit une mesure par demi-heure de l'échange net de CO₂ par la parcelle (NEE) (cf. paragraphe 2). Un des principaux objectifs des mesures d'*eddy covariance* étant le suivi à long terme des échanges, les flux vont être sommés à l'échelle journalière, mensuelle, saisonnière et annuelle. L'ensemble de la procédure d'acquisition et de traitement des données est décrite dans un article méthodologique (Aubinet et al., 2000). Cette procédure standardisée est utilisée par l'ensemble de la communauté FLUXNET.

En plus de ces différentes mesures, une station météorologique automatique est installée sur la parcelle afin de mesurer en continu les conditions dans lesquelles se font les échanges et ainsi de déterminer leur réponse au climat. Cette station fournit chaque demi-heure une mesure de la température et de l'humidité de l'air (RHT2, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK) à 1,3 m du sol, de la pression atmosphérique (MPX4115A, Motorola Phoenix, AR, USA), des précipitations, du rayonnement global incident et réfléchi, du rayonnement infrarouge incident et réfléchi (CNR1, Kipp en Zonen, Delft, NL), du rayonnement photosynthétiquement actif diffus et total (Sunshine Sensor type BF3, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK), de la température (pt100, Jumo) et de l'humidité du sol (ThetaProbe, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK) à différentes profondeurs.

5.3 Exploitation des mesures

Le schéma de la **figure 3** synthétise la procédure utilisée pour exploiter les mesures effectuées et représente les flux obtenus directement par mesure, les flux calculés à partir d'un seul type de mesures et enfin les flux obtenus par combinaison de plusieurs types de mesures.

La mesure de NEE par *eddy covariance* permet d'évaluer l'importance du puits ou de la source de CO₂ que représente une culture. La séquestration annuelle

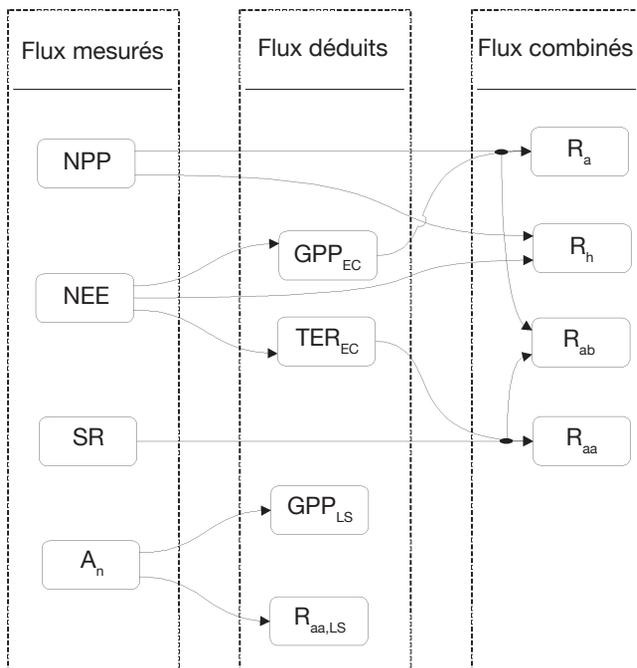


Figure 3. Présentation de la méthodologie de calcul permettant d'obtenir les termes du bilan de carbone à partir de mesures faites à différentes échelles spatiales et temporelles — *Methodology of carbon balance assessments from measurements performed at different spatial and temporal scales.*

NPP : Productivité Primaire Nette — *Net Primary Productivity* ;
 NEE : Échange Net de l'Écosystème — *Net Ecosystem Exchange* ;
 SR : Respiration du Sol — *Soil Respiration* ;
 A_n : Assimilation nette — *Net assimilation* ;
 GPP_{EC} : Productivité Primaire Brute pour les flux provenant des mesures par *eddy covariance* — *Gross Primary Productivity for the fluxes coming from measurements by eddy covariance* ;
 GPP_{LS} : Productivité Primaire Brute pour les mesures faites à l'échelle de la feuille — *Gross Primary Productivity for the measurements made at the scale of the leaf* ;
 TER_{EC} : Respiration Totale de l'Écosystème pour les flux provenant des mesures par *eddy covariance* — *Total Ecosystem Respiration for the fluxes coming from measurements by eddy covariance* ;
 $R_{aa,LS}$: Respiration autotrophe des parties aériennes pour les mesures faites à l'échelle de la feuille — *Above ground autotrophic respiration for the measurements made at the scale of the leaf* ;
 R_a : Respiration autotrophe — *Autotrophic respiration* ;
 R_h : Respiration hétérotrophe — *Heterotrophic respiration* ;
 R_{ab} : Respiration autotrophe du sol — *Below ground autotrophic respiration* ;
 R_{aa} : Respiration autotrophe des parties aériennes — *Above ground autotrophic respiration.*

de la culture de betterave, sa sensibilité à certains choix méthodologiques lors de son estimation et la réponse des flux au climat et au développement de la culture est analysée dans Moureaux et al. (2006). Toutefois, la mesure de NEE ne permet pas de prédire son évolution suite à un changement du climat ou du mode de gestion

de l'écosystème. En effet, l'échange net résulte de la différence entre la photosynthèse des feuilles (GPP) et la respiration de l'écosystème (TER), lesquelles répondent différemment au climat (Falge et al., 2002 ; Law et al., 2002, notamment). Une meilleure compréhension de l'évolution du flux net exige donc de pouvoir séparer ces deux processus et de les décrire indépendamment. La procédure que nous avons choisie est celle proposée par Reichstein et al. (2005). Cette méthode part du principe que les mesures effectuées la nuit par le système d'*eddy covariance* représentent la TER. La réponse de ce terme à la température peut donc en être déduite. Si l'on postule que la TER présente la même réponse à la température de jour que de nuit, elle peut dès lors être calculée pour l'ensemble de la journée en extrapolant aux conditions de jour la réponse établie la nuit. La GPP est alors calculée comme la somme de la NEE et de la TER pendant la journée et est considérée comme nulle pendant la nuit. L'algorithme utilisé pour établir une réponse de la TER à la température utilise un court pas de temps (quelques jours) de manière à pouvoir reproduire des événements particuliers et limités dans le temps comme les périodes d'intense développement de la culture, les périodes de sénescence ou de sécheresse (Reichstein et al., 2005).

Les mesures de respiration du sol sont extrapolées à l'échelle de la culture en combinant les mesures automatiques et manuelles. L'extrapolation est basée sur un principe de séparation des dépendances climatique et spatiale : la réponse climatique de la respiration est caractérisée par une fonction identique en tous points de la culture, laquelle est multipliée par un coefficient intégrant la variabilité spatiale. La réponse climatique est obtenue en combinant les résultats des mesures automatiques aux mesures météorologiques, le coefficient spatial étant déduit des mesures manuelles. De cette manière, la respiration mesurée à l'échelle des mini-parcelles de sol peut être extrapolée aux échelles de la culture et de la saison entière. Un article présentant la mise au point d'un tel modèle, sa calibration et sa validation sur les mesures de la SR des cultures de froment d'hiver 2005 et 2007 est soumis. Il analyse également la dépendance de la respiration du sol aux précipitations et met en évidence un comportement différencié de la respiration du sol selon les stades de développement de la culture. Préalablement à de telles analyses, les chambres de respiration de sol ont été adaptées pour fournir des mesures fiables sur un site agricole. Ces chambres ayant initialement été conçues pour fonctionner dans des écosystèmes forestiers et donc dans des conditions peu venteuses car à l'abri dans la forêt, un important problème de sensibilité des mesures au vent a dû être résolu. Les adaptations apportées au système sont décrites dans Suleau et al. (2008).

Les mesures d'assimilation nette à l'échelle de la feuille sont répétées une fois par semaine sur

différentes feuilles dans le but d'étudier la variabilité de la réponse A-Q en fonction de la position de la feuille, des conditions climatiques et de la saison. À partir de cette description, un modèle peut être développé pour extrapoler l'assimilation nette (différence entre la quantité de carbone assimilée par photosynthèse, GPP_{LS} , et la respiration des parties aériennes de la plante, $R_{aa,LS}$, **Figure 3**) à l'entièreté de la culture et à toute la saison de végétation. Pour ce faire, outre la description des réponses A-Q, il est nécessaire de connaître l'évolution et la répartition des organes verts dans la culture. Cette approche a été décrite et développée par Hoyaux et al. (2008) pour la culture de froment d'hiver de 2005.

En combinant ces mesures, les différents termes du bilan carboné de la culture sont déduits (**Figure 3**), en particulier la discrimination entre les parts autotrophes et hétérotrophes de la respiration. Une autre technique pour décomposer la respiration du sol en ses parts auto- et hétérotrophes a été mise en place sur les cultures de pommes de terre (2006) et de froment d'hiver (2007). Elle consiste à mesurer la respiration du sol sur des parties plantées et non plantées. L'hypothèse est posée que les parts auto- et hétérotrophes sont présentes dans les premières alors que seule la part hétérotrophe est présente dans les secondes. Il faut toutefois tenir compte du fait que, dans les secondes, l'absence de végétation modifie les conditions climatiques locales et doit influencer sur la part hétérotrophe. L'analyse de ces résultats est actuellement en cours. Ils pourront être confrontés aux estimations provenant de la combinaison de la NEE (ou de la GPP) et de la NPP (**Figure 3**).

Le bilan carboné de la culture de blé d'hiver est présenté dans Moureaux et al. (2008). Les évolutions des différents flux et de leurs valeurs relatives sont analysées en fonction du développement de la culture. Dans leur article, Hoyaux et al. (2008) comparent les estimations de la GPP obtenues à partir des mesures à l'échelle de la feuille et à partir des mesures d'*eddy covariance*. Les deux estimations de la R_{aa} sont confrontées dans Moureaux et al. (2008).

Notre appartenance aux réseaux européens CarboEurope-IP et NitroEurope implique la mise en commun de mesures effectuées sur notre site. En effet, l'ensemble des mesures météorologiques, des mesures faites par le système d'*eddy covariance*, des mesures de matières sèches et de contenus en carbone (NPP), ainsi que le suivi du développement de la culture sont à la disposition des communautés de CarboEurope, de FLUXNET et de NitroEurope sur une base de données. Celle-ci permet d'effectuer plus aisément des analyses entre sites. Un article récemment publié compare des méthodes d'estimation de la GPP pour différents sites européens (forêts, prairies, cultures) non soumis à des épisodes de sécheresse (Owen et al., 2007). Plusieurs articles comparant les cultures sont en préparation. Ils sont coordonnés par différents groupes du réseau.

La base de données fournit également les mesures effectuées à l'échelle d'un site aux groupes qui établissent les bilans carbonés à l'échelle régionale, européenne ou globale (Ciais et al., 2005 ; Granier et al., 2007 ; Reichstein et al., 2007, notamment).

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le projet pluridisciplinaire intitulé " Mesure des flux de CO_2 et bilan carboné d'une grande culture " a permis, à ce jour, de mieux caractériser les échanges de CO_2 entre une culture et l'atmosphère pendant une rotation complète de quatre ans. Une évaluation de la séquestration nette de carbone par chaque culture et de l'ensemble de la rotation a été réalisée. Une comparaison de la séquestration nette entre les cultures a aussi été effectuée. Le développement en parallèle de différentes mesures effectuées à différentes échelles spatiales et temporelles (mesure de photosynthèse à l'échelle de la feuille, mesures de matière sèche, mesures de respiration du sol) a par ailleurs permis, d'une part de réaliser une validation mutuelle des méthodes, d'autre part de mieux détailler les différentes composantes du flux net de CO_2 . En particulier, les évolutions avec le climat et le développement de la culture des productivités primaires brute et nette, de la respiration totale de l'écosystème et de la respiration du sol ont pu être étudiées. La séparation entre les composantes hétérotrophe et autotrophe de la respiration a pu être réalisée et s'est avérée riche d'indications pour la compréhension de ces flux. La méthodologie permettant l'établissement du bilan carboné des cultures a été mise au point, les incertitudes liées à chaque méthode ont été évaluées et une méthode optimale a été proposée et appliquée de manière à proposer un bilan carboné des cultures.

D'autres points restent à analyser ou à approfondir. La réponse des flux au climat et aux stades de développement de la végétation reste à affiner. En effet, dans la mesure où, au cours d'une saison de culture, la succession de ces stades est corrélée aux variables climatiques qui sont souvent elles-mêmes corrélées entre elles, il n'est pas toujours possible d'identifier la cause précise de la variation du flux. Le fait de pouvoir observer des cultures identiques qui se succèdent sur le site tous les deux ou quatre ans permet d'affiner cette description et de mieux discerner l'impact de l'une ou l'autre cause. En pratique, la comparaison entre deux cultures identiques développées deux années différentes fournit des séries de données indépendantes permettant de valider et calibrer des modèles décrivant le comportement des flux. Ce travail est notamment en cours pour les cultures de blé en 2005 et 2007 et est projeté pour les cultures de betteraves de 2004 et 2008. Par ailleurs, cette comparaison permet d'évaluer

la variabilité interannuelle des flux. Par exemple, la comparaison des flux en 2005 et 2007 va permettre d'étudier l'impact des conditions climatiques très particulières de 2007 (hiver exceptionnellement doux, printemps très sec) sur le développement de la culture et fournira de précieuses informations quant au comportement d'une culture soumise à un climat plus chaud et à une période de sécheresse.

Il est également nécessaire de vérifier la représentativité des mesures réalisées à l'échelle régionale. Les réseaux CarboEurope-IP et FLUXNET auxquels le site est rattaché offrent de nombreuses possibilités de comparaisons entre sites des différents flux. En particulier, une étude comparant les bilans carbonés de cultures ayant connu une rotation complète ou quatre ans de cultures continues serait souhaitable.

Une meilleure compréhension des processus responsables des échanges de CO₂ et une meilleure prédiction de l'évolution de ceux-ci suite à un changement climatique passe par l'élaboration de modèles. Les modèles mis au point jusqu'ici sont essentiellement de type empirique. Il est maintenant nécessaire de développer des modèles plus fondamentaux prenant en compte les mécanismes de base à l'œuvre dans la culture. S'il existe des modèles fondamentaux décrivant la photosynthèse (Farquhar et al., 1982), les modèles décrivant les processus de respiration à l'échelle de l'écosystème et à une échelle journalière restent très insuffisants. Ils sont pourtant nécessaires pour prédire notamment l'impact de pratiques culturales sur ces flux. Ces modèles ne pouvant pas être développés *ab nihilo*, il est nécessaire de développer en parallèle des expériences spécifiques permettant leur calibration et leur validation. En particulier, les expériences mesurant les rapports isotopiques du CO₂ émis s'avèrent prometteuses dans ce contexte, permettant notamment de mieux séparer la part de la respiration provenant de l'activité des plantes et celle provenant de la décomposition de la matière organique du sol.

L'étude de l'impact des pratiques culturales sur les flux doit être approfondie. Les mesures décrites ici se rapportent à une culture de production gérée de manière traditionnelle. L'analyse des quatre années de mesure en continu de l'échange net révèle certaines "anomalies" qui sont liées à certaines interventions culturales (labour, épandage de résidus de cultures, traitement herbicide, etc.). La réponse climatique des flux ayant maintenant bien été décrite, une analyse de résidus des modèles de réponse climatique pourrait être développée afin de chiffrer l'émission de CO₂ associée à ces activités. Par ailleurs, la nécessité d'adapter l'agriculture aux changements climatiques et la volonté de mitiger l'effet de serre en tentant d'accroître le stockage de carbone dans le sol mène à l'élaboration de nouveaux itinéraires culturaux et de nouvelles pratiques

de gestion des cultures. L'impact de ces pratiques sur les émissions de gaz à effet de serre, sur la productivité des cultures et sur la qualité des sols est le plus souvent hypothétique. Il est donc nécessaire de plus étudier et approfondir l'impact des pratiques agricoles sur les émissions de CO₂. En particulier, l'impact d'une modification des doses ou de la distribution de la fertilisation, l'impact d'un travail du sol réduit, celui de la restitution et de l'enfouissement des résidus de cultures après récolte doivent être analysés plus en détail. Cela nécessite, outre le développement des modèles fondamentaux précités, celui d'expériences particulières.

Notre étude s'est jusqu'ici concentrée sur le CO₂ qui est le principal gaz à effet de serre. Le méthane et le protoxyde d'azote sont également des gaz jouant un rôle important, leur plus faible concentration dans l'atmosphère étant compensée par un plus grand pouvoir de réchauffement potentiel (IPCC, 2007). Les sols agricoles constituent une des sources principales de N₂O mais les modalités de cette émission, leur dépendance par rapport au climat et aux actions culturales restent mal connues et peu quantifiées. Ici également, des mesures complémentaires s'imposent afin de mieux comprendre ces phénomènes.

Enfin, les études décrites ici ont analysé les échanges à l'échelle de la parcelle agricole. L'analyse des échanges s'effectuant à l'échelle de l'exploitation voire de l'ensemble de la filière de production constitue également une piste intéressante de perspectives. Une étude récente analyse les échanges à l'échelle d'une exploitation agricole irlandaise basée sur l'élevage (Byrne et al., 2007).

Remerciements

Cette étude est financée par la Communauté française de Belgique (Direction générale de l'Enseignement non obligatoire et de la Recherche scientifique, Action de Recherche Concertée, Convention n°03/08-304), par la Commission Européenne (Carboeurope IP, contrat GOCE-CT-2003-505572) et par le FNRS (convention 2.4526.01).

Liste des abréviations

A_n : assimilation nette
 GPP : productivité primaire brute
 GPP_{EC} : productivité primaire brute pour les flux provenant des mesures par *eddy covariance*
 GPP_{LS} : productivité primaire brute pour les mesures faites à l'échelle de la feuille
 NEE : échange net de l'écosystème
 NPP : productivité primaire nette
 R_a : respiration autotrophe
 R_{aa} : respiration autotrophe des parties aériennes

$R_{aa,LS}$: respiration autotrophe des parties aériennes pour les mesures faites à l'échelle de la feuille
 R_{ab} : respiration autotrophe du sol
 R_h : respiration hétérotrophe
 SR : respiration du sol
 TER : respiration totale de l'écosystème
 TER_{EC} : respiration totale de l'écosystème pour les flux provenant des mesures par *eddy covariance*

Bibliographie

- Arrouays D. et al., eds., 2002. *Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Rapport d'expertise*. Paris : INRA.
- Aubinet M. et al., 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Adv. Ecol. Res.*, **30**, 113-175.
- Baker D., 2000. *Sources and sinks of atmospheric CO₂ estimated from batch least-squares inversions of CO₂ concentration measurements*. Thesis: Princeton University, NJ (USA).
- Baldocchi D.D., 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biol.*, **9**, 479-492.
- Baldocchi D.D. et al., 2001. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **82**(11), 2415-2434.
- Balesdent J., Chenu C. & Balabane M., 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Tillage Res.*, **53**, 215-230.
- Battelle, 2000. *Global energy technology strategy: addressing climate change*. Washington, DC: Battelle.
- Bingham G.E., Gillespie C.H. & McQuaid J.H., 1978. *Development of a miniature, rapid response CO₂ sensor. Lawrence Livermore National Laboratory Report UCRL-52440*. Livermore, CA, USA: California University, Lawrence Livermore Laboratory.
- Black T.A. et al., 1996. Annual cycles of water vapour and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest. *Global Change Biol.*, **2**, 219-230.
- Bonan G., 2002. *Ecological climatology: concepts and applications*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Bousquet P. et al., 2000. Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980. *Science*, **290**, 1342-1346.
- Brach E.J., Desjardins R.L. & St Amour G.T., 1981. Open path CO₂ analyser. *J. Phys. E Sci. Instrum.*, **14**, 1415-1419.
- Brown S., 1996. Management of forests for mitigation of greenhouse gas emissions. In: Watson R.T., Zinyowera M.C., Moss R.H. & Dokken D., eds. *Climate Change 1995: impacts, adaptations and mitigation of climate change. Scientific-technical analyses. Contributions of working group II to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 773-797.
- Byrne K.A., Kiely G. & Leahy P., 2007. Carbon sequestration determined using farm scale carbon balance and eddy covariance. *Agric. Ecosystem Environ.*, **121**, 357-364.
- Canadell J.G., Ciais P., Cox P. & Heimann M., 2004. Quantifying, understanding and managing the carbon cycle in the next decades. *Clim. Change*, **67**, 147-160.
- Ciais P. et al., 1995. A large northern-hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by the 13C/12C ratio of atmospheric CO₂. *Science*, **269**, 1098-1102.
- Ciais P. et al., 2005. Unprecedented reduction in European primary productivity caused by heat and drought in 2003. *Nature*, **437**, 529-533.
- Cole C.V., 1996. Agricultural options for mitigation of GHG emissions. In: Watson R.T., Zinyowera M.C., Moss R.H. & Dokken D., eds. *Climate Change 1995: impacts, adaptations and mitigation of climate change. Scientific-technical analyses. Contributions of working group II to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 745-771.
- Coppin P.A. & Taylor K.J., 1983. A three-component sonic anemometer/thermometer system for general micrometeorological research. *Boundary-Layer Meteorol.*, **27**, 27-42.
- Desjardins R.L., Sivakumar M.V.K. & de Kimpe C., 2007. The contribution of agriculture to the state of climate: workshop summary and recommendations. *Agric. Forest Meteorol.*, **142**, 314-324.
- Falge E. et al., 2002. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agric. Forest Meteorol.*, **113**, 53-74.
- Falkowski P. et al., 2000. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system. *Science*, **290**, 291-296.
- Farquhar G.D. & von Caemmerer S., 1982. Modelling of photosynthetic response to environmental conditions. In: Lange O.L., Nobel P.S., Osmond C.B. & Ziegler H., eds. *Encyclopedia of plant physiology. New Series. Vol. 12b*. Berlin: Springer-Verlag, 549-587.
- FLUXNET, 2007. *Site by networks results*. <http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet/networkname.cfm?networkid=3>, (06/12/07).
- Freibauer A., Rounsevell M.D.A., Smith P. & Verhagen J., 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma*, **122**, 1-23.
- Gleixner G., Poirier N., Bol R. & Balesdent J., 2002. Molecular dynamics of organic matter in a cultivated soil. *Org. Geochem.*, **33**, 357-366.
- Goulden M.L. et al., 1996a. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods

- and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biol.*, **2**, 169-182.
- Goulden M.L. et al., 1996b. Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: response to interannual climate variability. *Science*, **271**, 1576-1578.
- Gower S.T., McMurtrie R.E. & Murty D., 1996. Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes. *Trends Ecol. Evol.*, **11**, 378-382.
- Grace J. et al., 1996. The use of eddy covariance to infer the net carbon dioxide uptake of Brazilian rain forest. *Global Change Biol.*, **2**(3), 209-217.
- Granier A. et al., 2007. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agric. Forest Meteorol.*, **143**, 123-145.
- Greco S. & Baldocchi D.D., 1996. Seasonal variations of CO₂ and water vapour exchange rates over a temperate deciduous forest. *Global Change Biol.*, **2**, 183-198.
- Grelle A. & Lindroth A., 1996. Eddy correlation system for long-term monitoring of fluxes of heat, water vapour, and CO₂. *Global Change Biol.*, **2**, 297-307.
- Heimann M., 2001. *Atmospheric inversion calculations performed for IPCC third assessment report*. Jena, Germany: Max-Planck-Institute für Biogeochemie.
- Houghton J.T. et al., 2001. *Climate change 2001: the scientific basis. WGI-Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Houghton R.A., Hackler J.L. & Lawrence K.T., 1999. The US carbon budget: contributions from land-use change. *Science*, **285**, 574-578.
- Hoyaux J. et al., 2008. Extrapolating the gross primary productivity from leaf to canopy scale in a winter wheat crop. *Agric. Forest Meteorol.*, accepted.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 1997. *IPCC 1996. Revised good practice guidelines for greenhouse gas inventories*. Tokyo: Institute for Global Environmental.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. *Climate change 2007: the physical science basis - summary for policymakers*. [Http://www.aaas.org/news/press_room/climate_change/media/4th_spm2feb07.pdf](http://www.aaas.org/news/press_room/climate_change/media/4th_spm2feb07.pdf), (06/12/07).
- Jarvis P.G. et al., 1997. Seasonal variation of carbon dioxide, water vapor, and energy exchanges of a boreal black spruce forest. *J. Geophys. Res.*, **102**, 28953-28966.
- Jones E.P., Zwick H. & Ward T.V., 1978. A fast response atmospheric CO₂ sensor for eddy correlation flux measurement. *Atmos. Environ.*, **12**, 845-851.
- Kaiser K. et al., 2002. Stabilization of organic matter by soil minerals investigations of density and particle-size fractions from two acid forest soils. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenkd.*, **165**, 451-459.
- Law B.E. et al., 2002. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agric. Forest Meteorol.*, **113**, 97-120.
- Lawlor D.W., 1998. Plant responses to global change: temperature and drought stress. In: De Kok L.J. & Stulen I., eds. *Responses of plant metabolism to air pollution and global change*. Leiden, The Netherlands: Backhuys Publishers, 193-208.
- Lee X., Massman W. & Law B., 2004. *Handbook of micrometeorology. A guide for surface flux measurement and analysis*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Longdoz B., Yernaux M. & Aubinet M., 2000. Soil CO₂ efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution. *Global Change Biol.*, **6**(8), 907-917
- Massman W.J. & Lee X., 2002. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agric. Forest Meteorol.*, **113**, 121-144.
- McGuire A.D. et al., 2001. Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: analyses of CO₂, climate and land-use effects with four process-based ecosystem models. *Global Biogeochem. Cycles*, **15**, 183-206.
- Meehl G.A. & Tebaldi C., 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, **305**, 994-997.
- Mosier A.R. et al., 1998. Mitigating agricultural emissions of nitrous oxide. *Clim. Change*, **40**, 7-39.
- Moureaux C. et al., 2006. Annual net ecosystem carbon exchange by a sugar beet crop. *Agric. Forest Meteorol.*, **139**, 25-39.
- Moureaux C. et al., 2008. Carbon balance assessment of a Belgian winter wheat crop (*Triticum aestivum* L.). *Global Change Biol.*, **14**(6), 1353-1366.
- Norman J.M., Garcia R. & Verma S., 1992. Soil surface CO₂ fluxes and the carbon budget of grassland. *J. Geophys. Res.*, **97**, 18845-18853.
- Ohtaki E. & Matsui T., 1982. Infrared device for simultaneous measurements of fluctuations of atmospheric CO₂ and water vapour. *Boundary-Layer Meteorol.*, **24**, 109-119.
- Owen K.E. et al., 2007. Linking flux network measurements to continental scale simulations: ecosystem CO₂ exchange capacity under non-water-stressed conditions. *Global Change Biol.*, **13**, 734-760.
- Pacala S.W. et al., 2001. Consistent land and atmosphere-based U.S. carbon sink estimates. *Science*, **292**, 2316-2320.
- Pattey E. et al., 2007. Tools for quantifying N₂O emissions from agroecosystems. *Agric. Forest Meteorol.*, **142**, 103-119.
- Peylin P. et al., 2002. Influence of transport uncertainty on annual mean and seasonal inversions of atmospheric CO₂ data. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **107**(D19), 4385.
- Raddatz R.L., 2007. Evidence for the influence of agriculture on weather and climate through the transformation and management of vegetation: illustrated by examples from

- the Canadian prairies. *Agric. Forest Meteorol.*, **142**, 186-202.
- Rayner P.J., Enting I.G., Francey R.J. & Langenfelds R., 1999. Reconstructing the recent carbon cycle from atmospheric CO₂, ¹³C and O₂/N₂ observations. *Tellus B*, **51**, 213-232.
- Reichstein M. et al., 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biol.*, **11**, 1424-1439.
- Reichstein M. et al., 2007. Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly: a joint flux tower, remote sensing and modelling analysis. *Global Change Biol.*, **13**, 634-651.
- Reynolds O., 1895. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of criterion. *Philos. Trans. R. Soc. London*, **A174**, 935-982.
- Rodenbeck C., Houweling S., Gloor M. & Heimann M., 2003. CO₂ flux history 1982-2001 inferred from atmospheric data using a global inversion of atmospheric transport. *Atmos. Chem. Phys.*, **3**, 1919-1964.
- Saxe H. et al., 2001. Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytol.*, **149**, 369-400.
- Schär C. et al., 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, **427**, 332-336.
- Schimel D.S. et al., 2000. Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. *Science*, **287**, 2004-2006.
- Schimel D.S. et al., 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, **414**, 169-172.
- Seguin B. et al., 2007. Moderating the impact of agriculture on climate. *Agric. Forest Meteorol.*, **142**, 278-287.
- Six J. et al., 2001. Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates. *Eur. J. Soil Sci.*, **52**, 607-618.
- Six J. et al., 2004. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long-term. *Global Change Biol.*, **10**, 155-160.
- Smith P., 2004. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *Eur. J. Agron.*, **20**, 229-236.
- Smith P., Powlson D.S. & Glendining M.J., 1996. Establishing a European soil organic matter network (SOMNET). In: Powlson D.S., Smith P. & Smith J.U., eds. *Evaluation of soil organic matter models using existing, long-term datasets*. NATO ASI Series I, vol. 38. Berlin: Springer-Verlag, 81-98.
- Smith P., Powlson D.S., Glendining M.J. & Smith J.U., 1997a. Using long-term experiments to estimate the potential for carbon sequestration at the regional level: an examination of five European scenarios. *Agrokém. Talajtan*, **46**, 25-38.
- Smith P., Powlson D.S., Glendining M.J. & Smith J.U., 1997b. Potential for carbon sequestration in European soils: preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments. *Global Change Biol.*, **3**, 67-79.
- Smith P. et al., 2000. Meeting Europe's climate change commitments: quantitative estimates of the potential for carbon mitigation by agriculture. *Global Change Biol.*, **6**, 525-539.
- Smith P. et al., 2004. *Greenhouse gas emissions from European croplands. Report 3/2004*. Viterbo, Italy: University of Tuscia.
- Suleau M., Debacq A., Dehaes V. & Aubinet M., 2008. Wind speed perturbation of soil respiration measurements with closed dynamic chambers. *Eur. J. Soil Sci.* (accepté).
- Tans P.P., Fung I.Y. & Takahashi T., 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, **247**, 1431-1438.
- Valentini R. et al., 1996. Seasonal net carbon dioxide exchange of a beech forest with the atmosphere. *Global Change Biol.*, **2**, 199-208.
- Valentini R., ed., 2003. *Fluxes of carbon, water and energy of European forests. Ecological Studies*. Vol. 163. Berlin: Springer-Verlag.
- Vleeshouwers L.M. & Verhagen A., 2002. Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe. *Global Change Biol.*, **8**, 519-530.
- Watson R.T. et al., eds., 2000. *Land use, land use change, and forestry*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Wofsy S.C. et al., 1993. Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, **260**, 1314-1317.
- Yamamoto S., Murayama S., Saigusa N. & Kondo H., 1999. Seasonal and inter-annual variation of CO₂ flux between a temperate forest and the atmosphere in Japan. *Tellus B*, **51**, 402-413.