

## Mesure des flux de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O et NO et établissement de bilans quantitatifs à l'échelle de la parcelle agricole

Pierre Cellier\*, Benjamin Loubet, Patricia Laville, Simon Lehuger, Benoît Gabrielle, Olivier Fanucci, Brigitte Durand, Eric Larmanou

UMR Environnement et Grandes Cultures, INRA-AgroParisTech, Thiverval-Grignon, France

\*cellier@grignon.inra.fr

### 1 Introduction : mesurer et modéliser les flux de gaz à effet de serre sur les surfaces agricoles

Les écosystèmes naturels et agricoles sont des sources et des puits de gaz à effet de serre (GES : CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>) (Figure 1), ainsi que des sources de précurseurs de composés à effet de serre, et en particulier de monoxyde d'azote (NO) et de composés organiques volatils (COV), tous deux précurseurs de l'ozone, et d'ammoniac (NH<sub>3</sub>) précurseur de particules fines (qui ont un pouvoir réfléchissant sur le rayonnement solaire, et donc réduisent l'effet de serre).

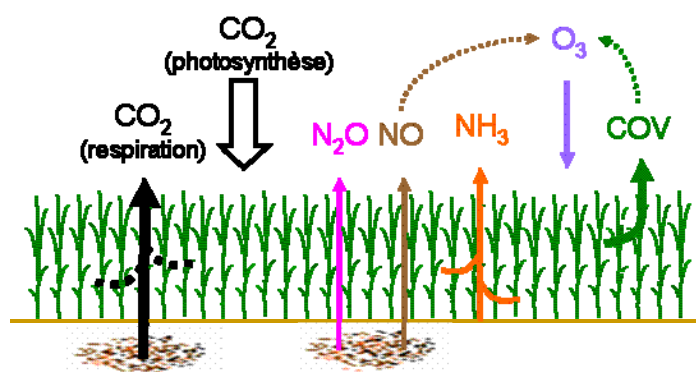


Figure 1 : Emission et absorption de composés à effet de serre ou précurseurs sur un écosystème

Ces sources sont une composante importante du pouvoir de réchauffement global à l'échelle du territoire français. Dans ses estimations annuelles, le Citepa (2006) indique que les activités agricoles et forestières contribuaient en 2004 pour 76% aux émissions de N<sub>2</sub>O, principalement liées à la fertilisation des sols par des engrais minéraux et organiques, et 71% à celles de CH<sub>4</sub> (dans ce dernier cas, la principale source est la fermentation entérique des ruminants, donc les activités d'élevage). Le stockage de carbone dans les sols n'est pas comptabilisé dans ces inventaires, mais l'expertise faite par l'INRA (Arrouays *et al.*, 2002) a montré que les sols forestiers et, dans une moindre mesure, agricoles, pouvaient représenter un potentiel de stockage intéressant. Cette problématique du stockage de carbone peut être déterminante dans la perspective de changement d'usage des sols.

Ces flux d'émissions ou d'absorptions de composés à effet de serre sont très variables dans le temps. Ils sont notamment fortement affectés par les pratiques agricoles (Smith *et al.*, 2004 ; Eugster *et al.*, soumis), au premier lieu desquelles la fertilisation azotée, qui favorise les émissions de N<sub>2</sub>O et le stockage de carbone dans les sols, et le travail du sol qui favorise la respiration du sol, mais peut

également affecter les émissions de  $N_2O$ ,  $NO$  ou  $NH_3$ . Ils sont également fortement dépendants des conditions climatiques, les températures élevées et la pluviométrie favorisant le métabolisme des plantes et des microorganismes du sol (et donc les transformations du carbone et de l'azote). En outre, une pluviométrie élevée peut provoquer l'apparition temporaire ou durable de conditions d'anoxie dans les sols, favorable à la production et l'émission de  $N_2O$  et  $CH_4$  par le sol.

Ces différents flux présentent également une forte variabilité spatiale dépendant à la fois de la culture ou de l'écosystème, des conditions de sols et du climat local. Le type de sol est particulièrement importants pour les émissions de  $N_2O$  dans la mesure où, selon les sols, la flore microbienne du sol est plus ou moins efficace pour réduire le  $N_2O$  en  $N_2$  (Hénault *et al.*, 1998).

Devant l'importance supposée des flux de  $CO_2$  et  $N_2O$ , voire d'autres composés à effet de serre ou précurseurs, dans le bilan à l'échelle du bassin, ainsi que leur forte variabilité temporelle et spatiale, il est essentiel de disposer de références locales, acquises sur de longues durées pour bien appréhender la variabilité temporelle des flux et leurs variations en fonction des conditions climatiques et des pratiques. Pour cela, la stratégie idéale consiste à associer

1. Quelques sites sur lesquels sont suivis sur une base de temps courte (heure, journée) les principaux flux, pour investiguer la variabilité temporelle des flux ; cela suppose un investissement instrumental et humain important sur des sites situés forcément à proximité des laboratoires.
2. Un réseau de sites représentant des conditions pédologiques et climatiques, voire agronomiques différentes sur lesquels on mesure des flux de manière moins intensive que précédemment. On peut aussi se contenter de faire des bilans plutôt que des mesures directes.
3. Des modèles représentant le fonctionnement de l'écosystème et les principaux flux de GES. Plusieurs modèles de ce type existent dans la littérature, parmi lesquels on peut citer DNDC (Li, 2000), STICS (Brisson *et al.*, 2003) et CERES-EGC (Gabrielle *et al.*, 2006 ; Hénault *et al.*, 2005).

Le présent rapport, ne traite que du point 1 ci-dessus. Cette stratégie rejoint celle de deux projets européens touchant à l'effet de serre et aux écosystèmes, CarboEurope-IP (<http://www.carboeurope.org/>) qui s'intéresse au bilan de carbone des écosystèmes continentaux en Europe, et NitroEurope-IP (<http://www.nitroeuropa.eu/>) qui vise à voir comment la gestion de l'azote peut modifier le bilan d'effet de serre de ces mêmes écosystèmes. Même si on se focalise sur un type de composés et/ou d'effet (ici les GES), il est aussi essentiel d'avoir des références sur d'autres composés pour analyser les interactions possibles entre ces différents flux et évaluer la contribution des agrosystèmes aux différentes problématiques environnementales en vue d'avoir des éléments quantitatifs pour arbitrer objectivement entre les différents impacts. Le site de l'INRA de Grignon participe à ces deux projets. Cela permet de mettre en œuvre une synergie de moyens (expérimentaux et modélisation) entre le PIREN-Seine et ces projets, et de faire bénéficier le PIREN-Seine des résultats et bases de données acquis au cours des années précédentes.

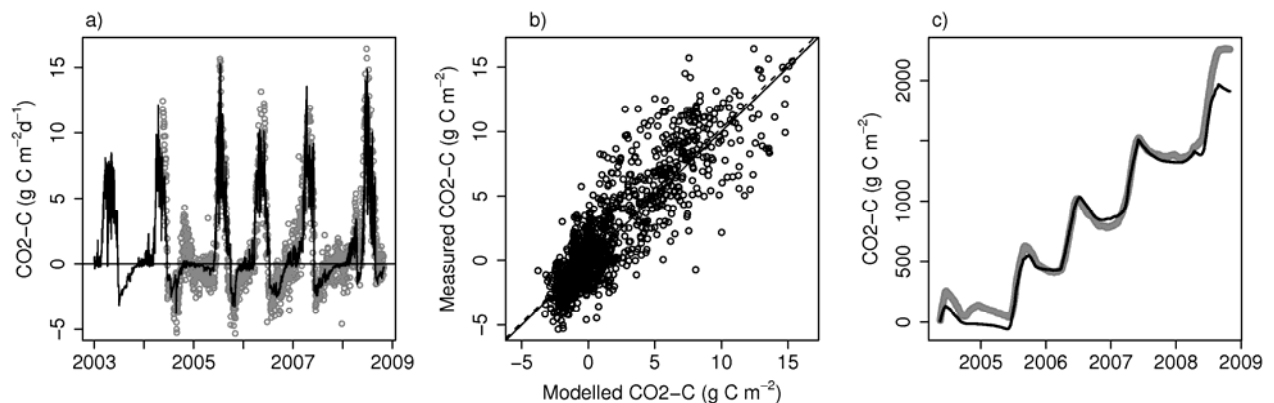
## 2 Résultats de mesures de flux de GES sur un site agricole

Depuis 2004, des mesures de flux de différents gaz à effet de serre et précurseurs sont effectuées sur le site de Grignon (78) à environ 35 km à l'ouest-sud-ouest de Paris. Le site de mesure est une parcelle de 19 ha, appartenant à la ferme expérimentale d'AgroParisTech, sur laquelle est menée une rotation maïs-blé-escourgeon, avec une interculture de moutarde entre l'escourgeon et le maïs. Il s'agit d'une rotation assez classique dans la région. Le sol est profond, limono-argileux.

Deux grands types de méthodes sont mises en œuvre sur ce site pour faire des mesures directes des émissions et dépôts de GES : des méthodes micrométéorologiques et plus particulièrement la **méthode des corrélations**, et des **méthodes de chambres statiques** automatisées. Le principe et le détail des mesures faites ont été donnés dans le rapport 2007. L'ensemble de ces données est collecté depuis un laboratoire de terrain relié à l'UMR EGC, permettant d'en contrôler quotidiennement le bon

fonctionnement, si nécessaire. Les données sont traitées selon des procédures et une démarche qualité définies dans les projets CarboEurope-IP et NitroEurope-IP, ou en interne (certaines méthodes employées ayant été développées à l'UMR EGC), selon le type de données. Elles alimentent une base de données interne et sont téléchargées sur les bases de données de CarboEurope-IP et NitroEurope-IP tous les 6 mois.

La figure 2 montre les flux journaliers de CO<sub>2</sub> sur l'ensemble de la rotation depuis 2004 (Lehuger *et al.*, 2009). Les mêmes flux calculés avec le modèle CERES-EGC (Gabrielle *et al.*, 2006) sont également présentés en comparaison aux mesures. Cette figure illustre un intérêt de ce type de mesures, qui permettent de faire des bilans de carbone des cultures à l'échelle d'un cycle de culture, d'une rotation ou à plus long terme, ainsi que de quantifier l'impact à court terme (jour, semaine, mois) de pratiques agricoles telles que les intercultures, le travail du sol ou la fertilisation (Eugster *et al.*, soumis). Les valeurs cumulées (Figure 2c) indiquent les quantités de C fixées par les cultures. Cependant, lorsqu'on fait un bilan de carbone en soustrayant les exportations de biomasse (récolte des grains, des pailles et de la plante entière pour l'ensilage) le bilan est quasi nul, voire négatif (perte de carbone par le système).

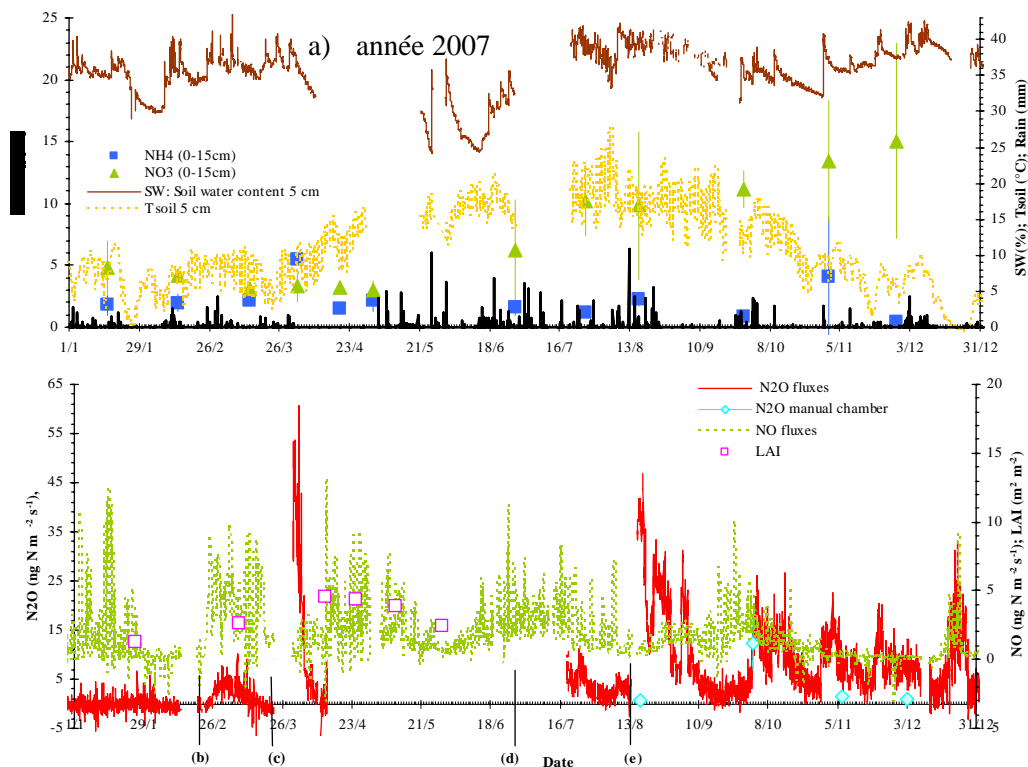


**Figure 2 : Flux de CO<sub>2</sub> journaliers mesurés par la méthode des corrélations de 2004 à fin 2008 sur le site de Grignon (78). Les valeurs positives correspondent à une absorption de CO<sub>2</sub> par la végétation et les négatives à des émissions. Les cultures sont de l'escourgeon en 2004 et 2007, du maïs en 2005 et 2008 et du blé en 2006 (d'après Lehuger *et al.*, 2009).**

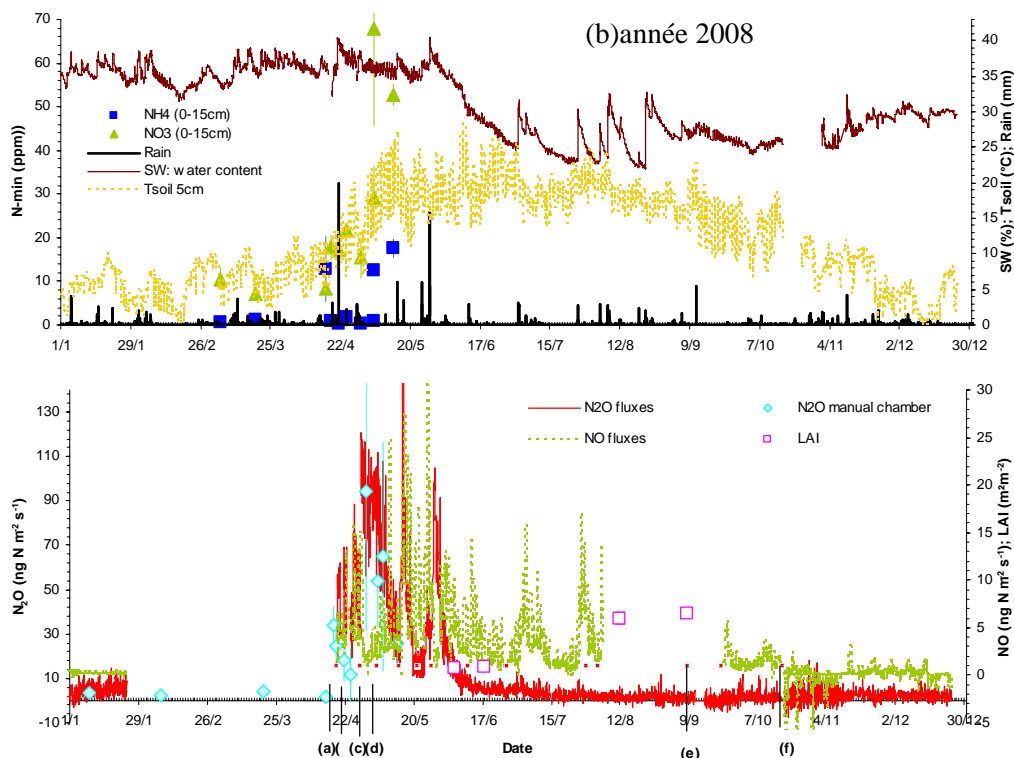
- a) flux mesurés au cours du temps (ligne noire = modèle CERES-EGC ; points gris = mesures)
- b) comparaison entre flux mesurés et calculés
- c) cumul des flux de CO<sub>2</sub> sur 4 cycles complets de culture

La figure 3 montre les mesures d'émission de N<sub>2</sub>O et NO sur les années 2007 et 2008 (Laville *et al.*, 2009). Les interruptions sont dues à des problèmes techniques sur les chambres automatiques et les analyseurs, ou aux interventions culturales sur le champ nécessitant un démontage du dispositif (travail du sol, récolte). On y voit bien l'augmentation rapide des émissions dans les jours suivant les apports d'engrais, l'effet des épisodes de pluie. L'augmentation des émissions après la fertilisation ne dure que quelques semaines, en particulier pour le N<sub>2</sub>O. On a également observé à la fin de l'année 2007 des émissions fortes vraisemblablement liées à un épisode de gel/dégel. La fréquence des mesures (16 points par jour) permet de voir la variation des flux à l'échelle de la journée, avec un maximum en début d'après-midi (souvent un peu plus tardif pour le N<sub>2</sub>O par rapport au NO), ce qui pourrait traduire des émissions par des couches plus profondes du sol. Ces mesures ont permis de faire des bilans et d'évaluer des facteurs d'émission, qui sont récapitulés sur le Tableau 1.

Programme PIREN-Seine : mesure et modélisation des flux de gaz à effet de serre



(a) 24/10/06 semis de l'escourgeon; (b) 21/02/07 apport d'engrais azoté; (c) 23/03/07 apport d'engrais azoté; (d) 28/06/07 moisson ; (e) 13/08/07 travail du sol superficiel et enfouissement des résidus



(a) 16/04/08 application de lisier; (b) 18/04/08 enfouissement du lisier; (c) 28/04/08 semis du maïs; (d) 5/05/08 apport d'engrais azoté; (e) 8/09/08 récolte, (f) 17/10/2008 semis du blé.

**Figure 3 : Flux de  $N_2O$  et  $NO$  mesurés sur (a) une culture d'escourgeon sur le site de Grignon (78) en 2007 et (b) une culture de maïs en 2008, avec une interculture de moutarde de septembre 2007 à avril 2008. Chaque mesure est une moyenne sur 5 chambres automatiques de  $0,25\text{ m}^2$  chacune.**

Year	N-tot application (kg ha <sup>-1</sup> )	N <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )	N-NO (kg ha <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )
2007	1.00	1.04 (0.75%)	0.64 (0.75%)
2008	1.49	3.63 (2.43%)	0.74 (0.50%)

*Tableau 1 : bilan des apports d'azote (N-tot application), des émissions de N<sub>2</sub>O et de NO en 2007 et 2008. Les chiffres entre parenthèses représentent les facteurs d'émissions (fraction de l'apport émise sous forme de N<sub>2</sub>O ou NO) calculés sur ces données.*

### 3 Conclusions

Les méthodes de mesure des flux de GES et autres composés permettront de constituer une base de données de référence sur ces flux dans le contexte climatique, pédologique et agricole du bassin de la Seine. Ces séries de mesure de flux accumulées sur plusieurs années permettent d'analyser les flux de CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O en fonction du cycle de la culture, des pratiques agricoles et des conditions météorologiques. Ces résultats peuvent être en partie extrapolés à d'autres situations mais surtout servir pour valider des modèles de culture qui, eux, sont des outils d'extrapolation à d'autres situations et conditions climatiques.

### 4 Références

- Arrouays D., Balesdent J.C., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. - 2002 - Contribution à la lutte contre l'effet de serre: Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?, Rapport d'expertise, INRA Expertise Scientifique Collective, Paris, 259 pages
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussière F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., Hénault C., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H. - 2003 - An overview of the crop model STICS. European Journal of Agronomy, 18, 309-332.
- Citepa - 2007 - Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France. Rapport d'inventaire national au format SECTEN. Disponible sur le site du Citepa (<http://www.citepa.org>), 247 pages.
- Eugster W., et al. Management Effects on European Cropland Respiration. Soumis à Agric. Ecosys. Environ..
- Gabrielle, B., Laville, P., Duval, O., Nicoullaud, B., Germon, J. C. and Hénault, C. – 2006 - Process-based modelling of nitrous oxide emissions from wheat-cropped soils at the sub-regional scale, Global Biogeochem. Cycles, 20, GB4018.
- Hénault C., Devis X., Page S., Justes E., Reau R., Germon J.-C., 1998. Nitrous oxide emission under different soil and land management conditions. Biol. Fert. Soils, 26, 199-207.
- Hénault C., Bizouard F., Laville P., Gabrielle B., Nicoullaud B., Germon J.C., Cellier P. - 2005 - Predicting in situ soil N<sub>2</sub>O emission using NOE algorithm and soil database. Global Change Biology, 11, 115-127.
- Lehuger S., Gabrielle B. – 2009 - Modelling progress for CERES-EGC. Rapport annuel pour la composante 3 du programme NitroEurope-IP, 6 pages.
- Li, C. – 2000 - Modelling trace gas emissions from agricultural ecosystems. Nutr. Cycl. Agroecos. 58, 259-276.
- Smith P., Ambus P., Amézquita M.C., Andrén O., Arrouays D., Ball B., Boeckx P., Brüning C., Buchmann N., Buendia L., Cellier P., et al - 2004 - Greenhouse gas emissions from European croplands. Report Carboeurope-GHG, Concerted Action Synthesis of the European Greenhouse Gas Budget, Report 3/2004, Specific study 2, 49 p. + annexes.