

# Mesure et modélisation des transferts et transformations de l'azote à l'échelle locale : méthodologie de mesure de flux et modélisation des émissions

Pierre Cellier<sup>\*</sup>, Patricia Laville, Benjamin Loubet, Benoît Gabrielle,  
Simon Lehuger, Marie-Noëlle Rolland

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

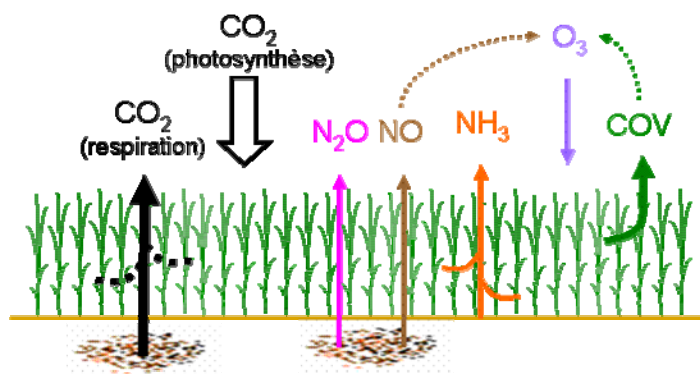
<sup>\*</sup>cellier@grignon.inra.fr

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

Les écosystèmes naturels et agricoles sont le lieu de production et de consommation de gaz à effet de serre (GES) (Figure 1) :

- absorption de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et transformation en matière organique par la photosynthèse ;
- émission de  $\text{CO}_2$  par la respiration des plantes et du sol ;
- émission de protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) par les processus de transformation de l'azote dans le sols (nitrification et dénitrification) ; il est à noter que les sols peuvent également être un puits pour le  $\text{N}_2\text{O}$ , en réduisant le  $\text{N}_2\text{O}$  atmosphérique
- concernant le méthane ( $\text{CH}_4$ ), les sols peuvent être une source (production de méthane en conditions fortement anoxiques) ou plus souvent un puits (oxydation du  $\text{CH}_4$  en  $\text{CO}_2$ )
- absorption d'ozone ( $\text{O}_3$ ) par la végétation

Ces mêmes écosystèmes sont aussi des sources de précurseurs de composés à effet de serre, et en particulier de monoxyde d'azote ( $\text{NO}$ ) et de composés organiques volatils (COV), tous deux précurseurs de l'ozone, et d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) 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.

A l'échelle du bassin de la Seine, il est vraisemblable que la contribution des surfaces agricoles et forestières soit très significative. Si le bilan de CO<sub>2</sub> est très vraisemblablement marqué par les émissions anthropiques (transport, production d'énergie, secteur résidentiel), le potentiel de stockage de carbone par les sols du bassin est important car les teneurs en matière organique des sols du bassin parisien sont relativement faibles (Arrouays *et al.*, 2002). Concernant le N<sub>2</sub>O, Garnier *et al.* (2008), en comparant leur évaluation des émissions dans le réseau hydrologique aux émissions totales liées aux activités agricoles (estimées par la méthodologie du GIEC) considèrent que la contribution du réseau hydrologique ne représentait que quelques pourcents des émissions.

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), 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<sub>2</sub>O, NO ou NH<sub>3</sub>. 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<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub> 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 protoxyde d'azote dans la mesure où, selon les sols, la flore microbienne du sol est plus ou moins efficace pour réduire le N<sub>2</sub>O en N<sub>2</sub> (Hénault *et al.*, 1998).

Devant l'importance supposée des flux de CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O, 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, voire on fait des bilans plus que des mesures directes. De tels sites sont gérables à distance dans la mesure où ils ne demandent que des interventions ponctuelles sur le terrain. Il est possible ici de mettre en réseau des sites de mesure mis en place pour des études spécifiques.
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.*, 2002).

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. Le site de l'INRA de Grignon participe à ces deux projets. Il nous a semblé intéressant d'appliquer la même approche au bassin de la Seine pour améliorer l'estimation des flux et bilan de GES à l'échelle du bassin de la Seine. Cela permet en outre 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.

Dans ce rapport, on présentera les dispositifs et des résultats concernant les points 1 et 3 ci-dessus.

## 2. Mesures de flux de GES et précurseurs sur un site agricole

Depuis 2004, des mesures de flux de différents gaz à effet de serre et précurseurs sont effectués 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, 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.

### 2.1. Le dispositif de mesure du site de Grignon

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**, basée sur la mesure à fréquence rapide (5 à 20 Hz) de la vitesse verticale du vent (avec un anémomètre sonique) et de la concentration du gaz concerné, puis calcul de la covariance à l'aide d'une procédure de traitement du signal adaptée. Le résultat est un flux sur 30 minutes. Le système, fonctionnant en continu, donne les variations journalières et saisonnières des flux. Cette méthode est utilisée pour mesurer les flux de CO<sub>2</sub>, d'O<sub>3</sub> et l'évapotranspiration.
- Des **méthodes de chambres statiques**, sur lesquelles on mesure le flux à partir de l'évolution de la concentration dans une enceinte close placée à la surface du sol. La détermination peut se faire sur une durée de quelques minutes à quelques heures. Cette méthode est classiquement utilisée pour la mesure des émissions de N<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>, ainsi que de NO. Elle permet de mettre en évidence à la fois des émissions et des dépôts de GES. Compte tenu de la variabilité spatiale des flux, il est nécessaire de travailler avec des chambres de taille assez importante (surface au sol de plusieurs dm<sup>2</sup>) et au moins 5 chambres pour avoir des valeurs représentatives. Pour avoir un suivi temporel fin, nous utilisons des **chambres automatiques** qui se ferment chacune pendant une période de 15 minutes toutes les 90 minutes (soit 16 points par chambre sur 24h). Notre dispositif compte 5 chambres. Il est complété par un dispositif de chambres statiques manuelles placées sur différentes cultures (dont les résultats ne seront pas présentés ici).

La figure 2 montre des vues des dispositifs expérimentaux. Le détail de mesures faites est donné dans le Tableau 1.

L'ensemble de ces données est collecté depuis un laboratoire de terrain relié à l'UMR EGC, permettant de contrôler le bon fonctionnement depuis nos bureaux, 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.

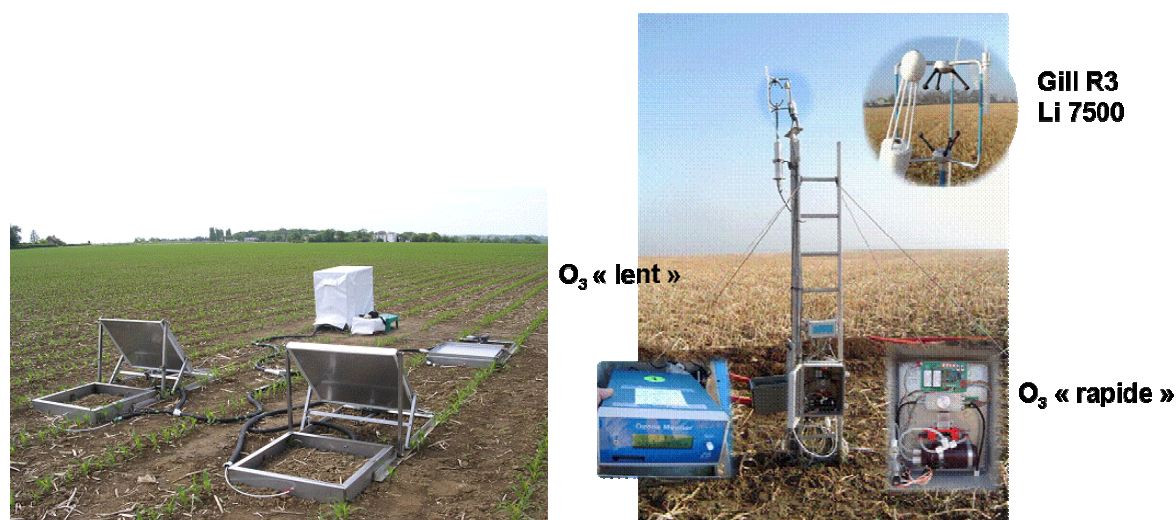


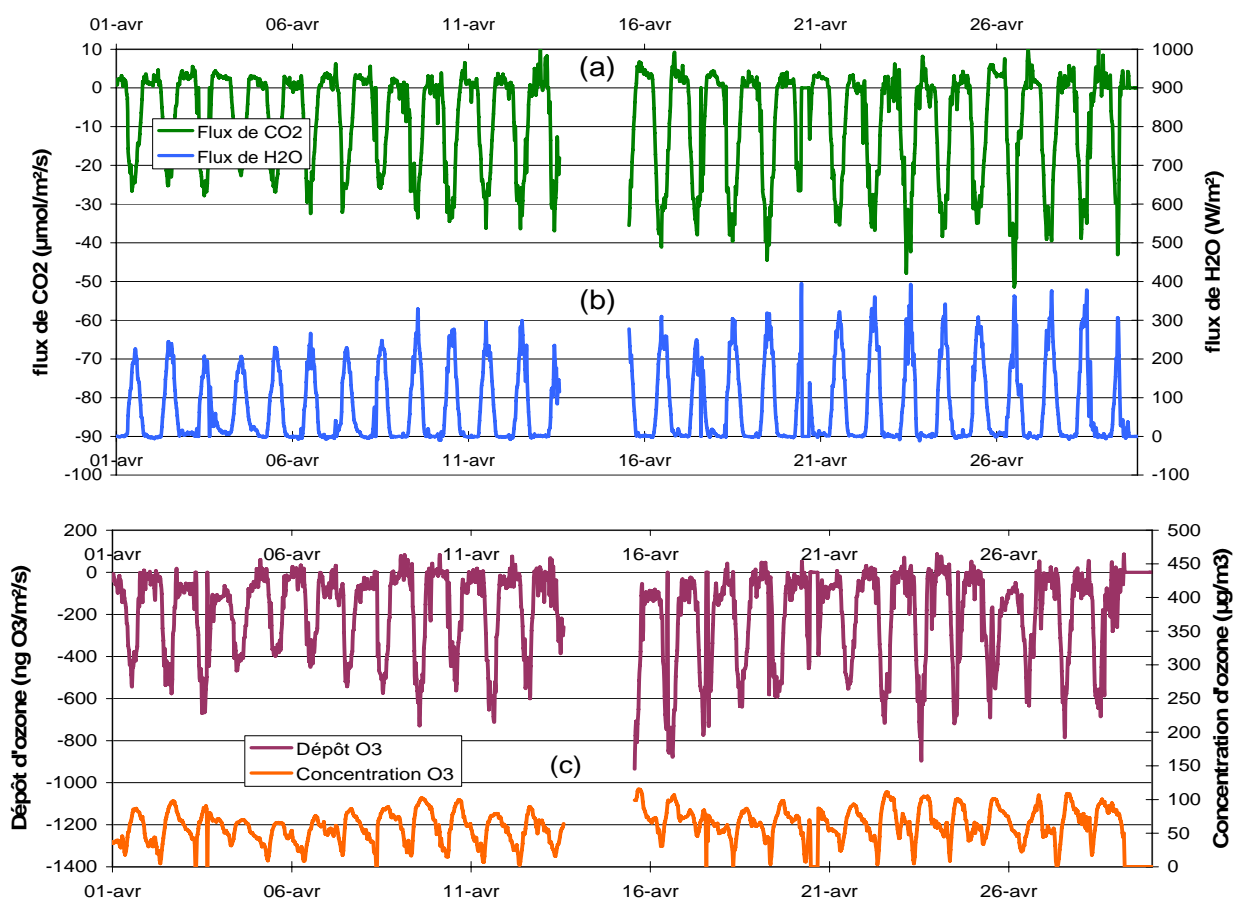
Figure 2 : Dispositifs de chambres automatiques (gauche) et mesures micrométéorologiques (droite) en place sur le site expérimental de l'INRA-EGC à Grignon (78)

Tableau 1 : Mesures faites sur le dispositif expérimental de Grignon

Type de mesure	Instrument	État
<b>Méthodes micrométéorologiques</b>		
Bilan d'énergie ( $\tau$ , H, Rn, G)	Anémomètre sonique + bilanmètre + plaquettes de flux + profil de température du sol	Depuis mai 2004
Rayonnement (Rs, Rd, aRs, Rn, Ra, PAR)	Radiomètre <i>ad hoc</i> selon la variable mesurée	Plus de 10 ans pour Rs, 2002 pour Rd, Ra, PAR; mai 2004 pour aRs
Flux de CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	Anémomètre sonique + LI7500	Depuis mai 2004
Dépôt d'O <sub>3</sub>	Anémomètre sonique + analyseur rapide d'O <sub>3</sub> (chimiluminescence)	Depuis juillet 2004
NH <sub>3</sub>	Système ROSAA ('développement INRA)	Démarrage prévu au printemps 2008
<b>Méthodes de chambres</b>		
Flux de N <sub>2</sub> O, NO, CO <sub>2</sub>	Chambres automatiques (0.25 m <sup>2</sup> ) avec les analyseurs TEI 46C (N <sub>2</sub> O), TEI 42CTL (NO/NO <sub>2</sub> ) et LI830 (CO <sub>2</sub> )	Depuis l'automne 2005. continu depuis fin 2006
N <sub>2</sub> O	Chambres « rapides »	Possible par campagne
<b>Concentrations dans l'air</b>		
NO/NO <sub>2</sub>	TEI 42CTL	Depuis 2005
O <sub>3</sub>	2B Tech, model 202	Depuis juillet 2004
SO <sub>2</sub>	TEI 43CTL	Depuis 2005
NH <sub>3</sub>	tubes denuder DELTA	Depuis 2005
<b>Dépôt humide</b>		
Dépôt "Wet-only"	Pluviomètre réfrigéré Eigenbrodt (NSA 181 / KS)	Depuis 2002 à 7 km de Grignon

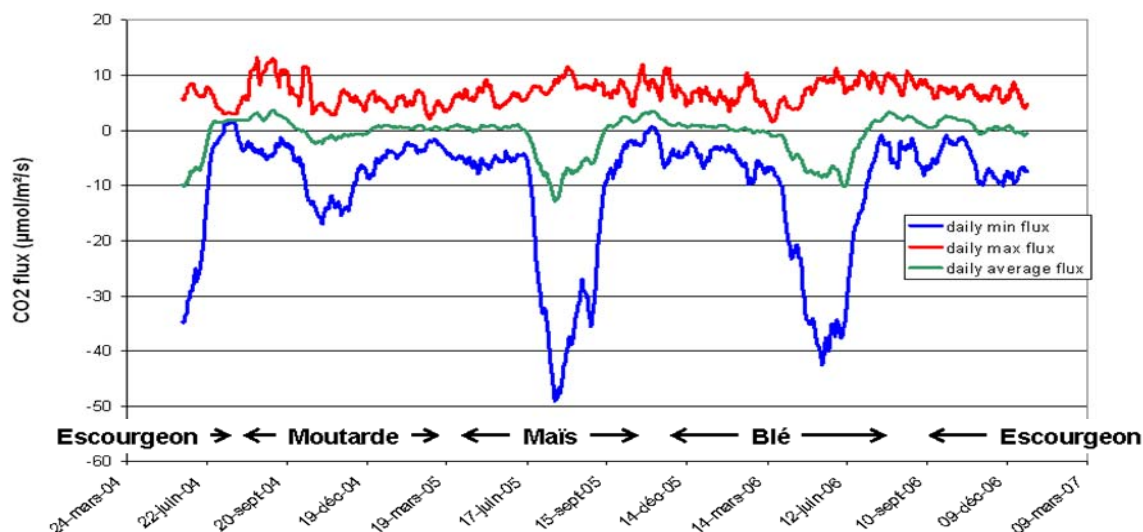
## 2.2 Quelques exemples de mesure de flux

La figure 3 donne une illustration des mesures de flux de CO<sub>2</sub>, évaporation et ozone sur le site au cours du mois d'avril 2007. Les valeurs négatives correspondent à une absorption par la culture et le sol (on a l'habitude de parler de dépôt pour l'ozone) et les valeurs positives à une émission. Pour le CO<sub>2</sub>, on voit bien les variations journalières du flux, avec un minimum en milieu de journée résultant de l'activité photosynthétique de la culture et des valeurs positives de nuit, correspondant à la respiration du sol et de la plante. De la même manière, les dépôts d'ozone montrent un minimum dans la journée en début d'après-midi, lorsque les concentrations d'ozone sont maximales, mais le dépôt est nul ou faible de nuit. Les dépôts plus élevés dans la deuxième quinzaine sont dus à l'augmentation des concentrations en ozone correspondant à des épisodes de pollution photochimique. Les flux d'évapotranspiration (flux de H<sub>2</sub>O) sont très élevés de jour, traduisant une végétation en pleine activité et bien alimentée en eau à cette période. Les faibles flux nocturnes correspondent à un dépôt de rosée certaines nuits. L'augmentation régulière des flux de CO<sub>2</sub> (en valeur absolue) et H<sub>2</sub>O pendant le mois est due ici principalement à l'augmentation de l'indice foliaire.



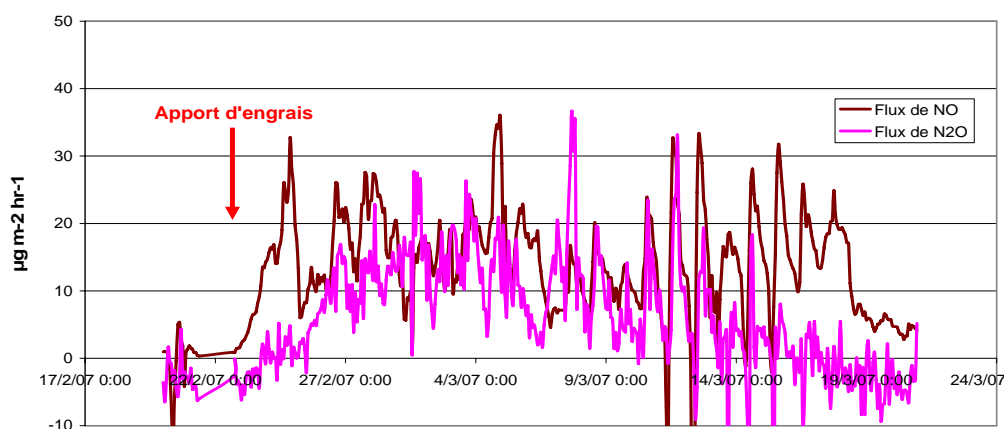
**Figure 3 : Flux de CO<sub>2</sub> (a), d'évapotranspiration (b) et d'ozone (c) mesurés sur une culture d'escourgeon en avril 2007 à Grignon (78). Les valeurs positives correspondent à des émissions et les négatives à une absorption**

La figure 4 montre les flux journaliers de CO<sub>2</sub> moyen, minima et maxima, sur l'ensemble de la rotation (3 ans). On voit bien apparaître les périodes où la végétation est active et capte du CO<sub>2</sub>, ainsi que les périodes (en hiver) où le flux moyen journalier est positif, c'est à dire que la culture « perd » du CO<sub>2</sub> en raison d'une activité photosynthétique plus faible que la respiration du sol et de la végétation.



**Figure 4 : Flux de CO<sub>2</sub> journaliers moyen (vert), mini (bleu) et maxi (rouge) sur l'ensemble de la rotation (de 2004 à fin 2006) sur le site de Grignon (78). Les valeurs positives correspondent à des émissions et les négatives à une absorption**

La figure 5 montre des mesures d'émission de N<sub>2</sub>O et NO dans la période suivant le premier apport d'engrais à la sortie de l'hiver. On y voit bien l'augmentation rapide des émissions dans les jours suivant l'apport, presque immédiate pour le NO et légèrement différée pour le N<sub>2</sub>O. 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. L'augmentation des émissions ne dure que quelques semaines, en particulier pour le N<sub>2</sub>O. On notera d'ailleurs que les flux de N<sub>2</sub>O étaient négatifs avant l'apport d'azote et le redeviennent vers le 18 mars, traduisant une réduction du N<sub>2</sub>O atmosphérique par le sol. Ce comportement est de plus en plus signalé sur différents types de sol, et il a déjà été observé sur le site de Grignon.



**Figure 5 : Flux de N<sub>2</sub>O et NO mesurés sur une culture d'escourgeon sur le site de Grignon (78) en 2007 après un apport d'engrais (54 kgN/ha le 23/2) Chaque mesure est une moyenne sur 5 chambres automatiques de 0,25 m<sup>2</sup> chacune.**

## 2.3 Conclusions

Les résultats présentés ci-dessus ne sont qu'illustratifs, mais ils montrent bien le potentiel que l'on peut attendre d'un tel site de mesure. Les 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 aussi servir pour valider des modèles de culture qui, eux, sont des outils d'extrapolation à d'autres situations et conditions climatiques (voir partie suivante).

## 3. Modélisation des émissions à l'échelle de la parcelle (CERES-EGC)

### 3.1 Principe de fonctionnement du modèle CERES-EGC

Le modèle CERES-EGC a été développé pour simuler la production primaire et le rendement des cultures, ainsi que le bilan environnemental des cultures et systèmes de culture (Gabrielle *et al.*, 2006). La figure 6 en illustre les principaux compartiments et les sorties environnementales

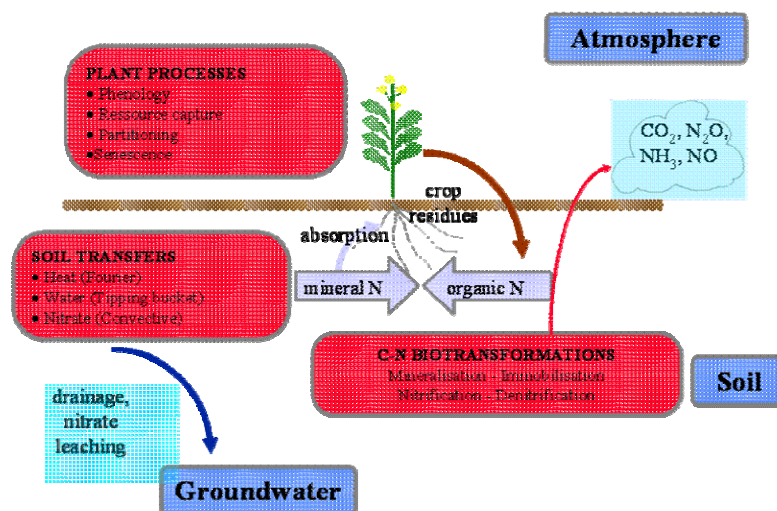


Figure 6 : Schéma de fonctionnement du modèle CERES-EGC

Pour établir le bilan environnemental, il estime les pertes de la culture vers le sol (nitrates) et l'atmosphère (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, NH<sub>3</sub>). Les cycles de l'eau, du carbone et de l'azote dans le système sol/culture, sont gérés par trois sous-modèles (Figure 6) :

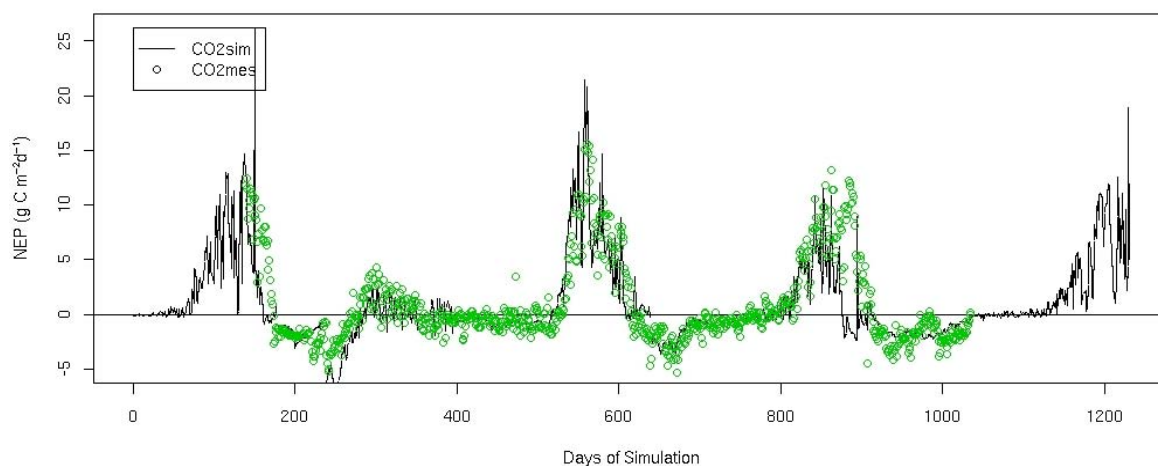
- physique pour les transferts
- biologique pour la croissance et la phénologie de la culture
- microbiologique pour les transformations du carbone et de l'azote

Les émissions de gaz à effet de serre sont simulées avec des modules spécifiques. Le module pour le N<sub>2</sub>O est adapté du modèle NOE (Hénault *et al.*, 2005) qui calcule les émissions par le biais de la nitrification et de la dénitrification en utilisant les valeurs de température, teneur en eau, nitrate et ammonium du sol calculées par le modèle principal. Une module similaire permet de calculer les émissions de NO par le sol (Laville *et al.*, 2005 ; Rolland *et al.*, 2007). La fixation de CO<sub>2</sub> par la culture est basée sur une approche de type Monteith et la respiration du sol est une sortie du sous-modèle microbiologique.

Le modèle CERES-EGC peut être téléchargé librement depuis l'adresse suivante [http://www-egc.grignon.inra.fr/ceres\\_mais/ceres.html](http://www-egc.grignon.inra.fr/ceres_mais/ceres.html), où de la documentation est aussi disponible. Il s'agit d'un code « open-source, qui peut être exécuté sous Linux ou Windows. Des publications récentes sont également disponibles.

### 3.2 Dynamique temporelle des flux de CO<sub>2</sub> et de la production de matière sèche

La figure 7 montre des résultats de l'application de ce modèle sur la rotation sur le site de Grignon en 2005. Elle illustre bien la capacité du modèle CERES-EGC à restituer de manière fine l'évolution journalière et saisonnière des flux de CO<sub>2</sub> pour différentes cultures et différentes années climatiques. On voit bien l'alternance de périodes où le flux est positif (*NB : les conventions de signes sont ici inversées par rapport aux figures 3, 4 et 5*), en raison de la fixation du CO<sub>2</sub> par la photosynthèse (les « pics » successifs correspondent aux cultures d'escourgeon, moutarde, maïs, blé et escourgeon) et les périodes où il est négatif, ce qui représente un déstockage de carbone du sol suite aux opérations culturales (retournement superficiel du sol après récolte ou à la préparation des semis) et pendant la phase hivernale où la photosynthèse est faible. Un point essentiel est la capacité de ce modèle à simuler les principales cultures du bassin de la Seine ainsi que des successions de cultures, ce qui permettra de l'appliquer, par exemple aux rotations des petites régions agricoles.



**Figure 7 : Données mesurées (points verts) et simulées (ligne noire continue) de flux de CO<sub>2</sub> journaliers (d'après Lehuger et al., 2008). Les valeurs positives correspondent à une absorption par le couvert et les négatives à des émissions (convention inverse de la figure 4).**

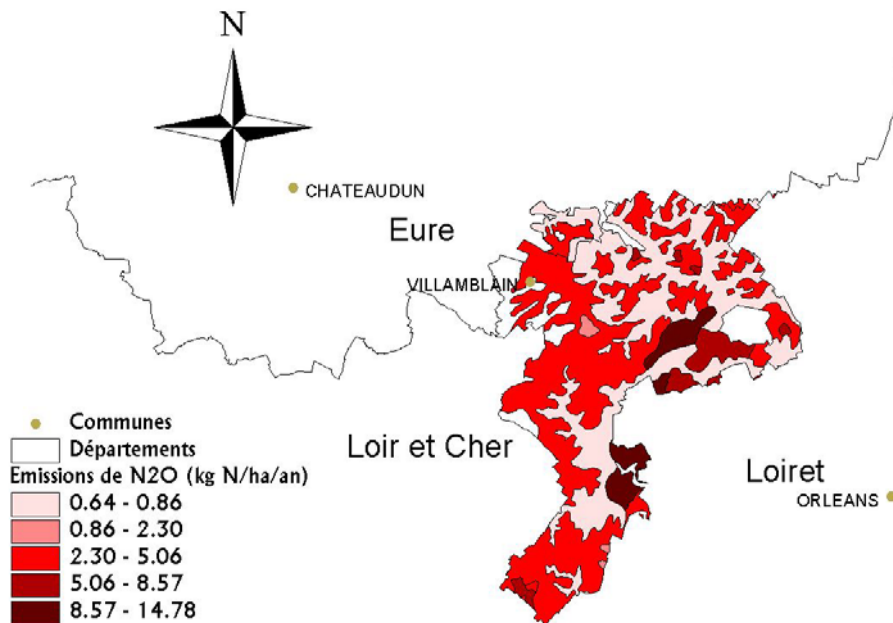
### 3.3 Spatialisation des émissions de N<sub>2</sub>O et NO par les sols agricoles

L'un des intérêts majeurs d'un modèle comme CERES-EGC est de prendre en compte les caractéristiques locales du milieu et des pratiques agricoles, dont on a vu qu'elles avaient une influence déterminante sur les valeurs des flux de GES et de leurs précurseurs dans les écosystèmes naturels et agricoles. Le fait que CERES-EGC soit spécifiquement adapté aux cultures est un atout dans la mesure où les cultures représentent la majeure partie de l'occupation du sol dans la bassin de la Seine (cf AI Preshume, Silvestre *et al.*, 2008) et que, hormis pour le CO<sub>2</sub>, les flux y sont supérieurs à ceux des écosystèmes naturels en raison des intrants apportés. Il pourrait toutefois être utilement complété par un modèle capable de simuler les mêmes flux sur prairies, forêts et zones de marais, pour couvrir l'ensemble des écosystèmes du bassin de la Seine

Pour spatialiser les émissions de N<sub>2</sub>O et NO en prenant en compte les caractéristiques du milieu, nous avons utilisé le modèle CERES-EGC en le couplant à des bases de données spatialisées sur l'utilisation du sol (surfaces agricoles et parmi celles-ci les principales cultures), le type de sol, le climat et les pratiques agricoles.

### 3.3.1 Evaluation des émissions de N<sub>2</sub>O spatialisées en Beauce

A titre d'illustration, la figure 8 est issue d'une étude réalisée au début des années 2000 sur les émissions de N<sub>2</sub>O sur la sole de blé en Beauce (Gabrielle *et al.*, 2006). Cette région avait été choisie car elle présentait des sols de caractéristiques hydriques très contrastées, laissant entrevoir des fréquences de conditions d'anoxie très différentes entre les sols et donc des émissions de N<sub>2</sub>O *a priori* différenciées.



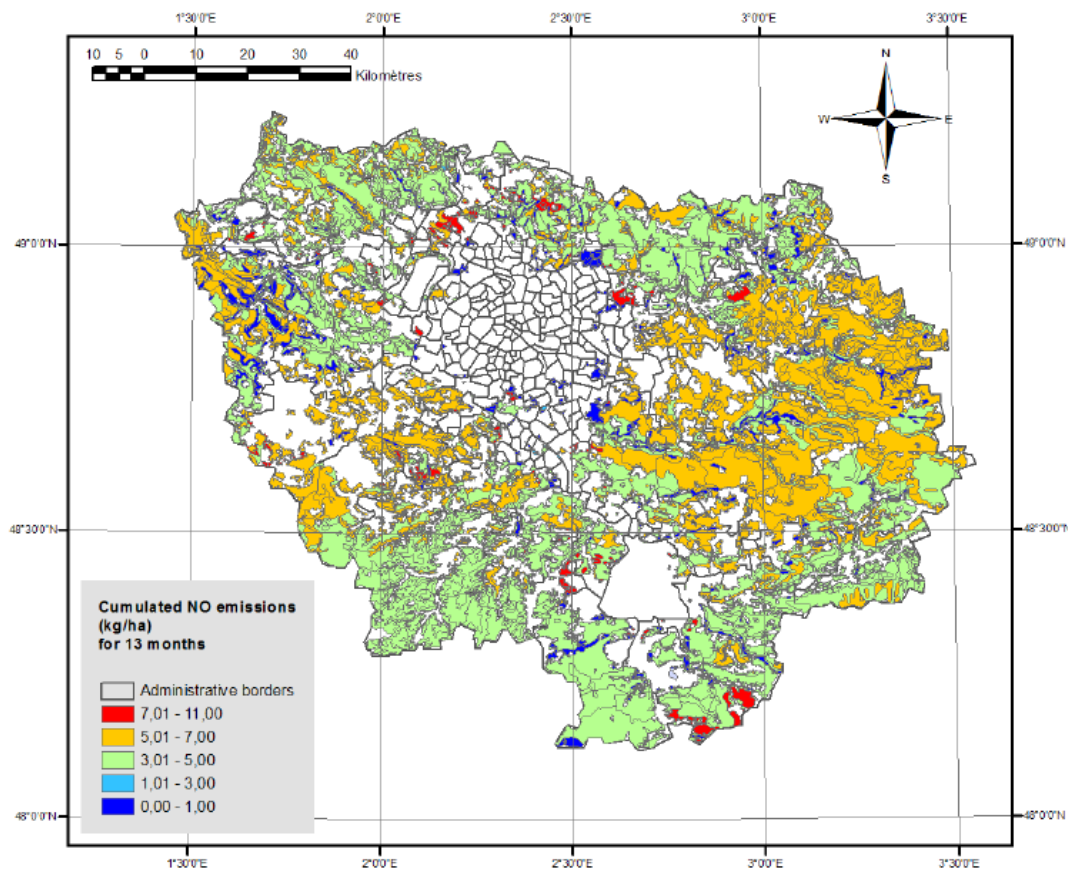
**Figure 8 : Emissions annuelles de N<sub>2</sub>O sur une région de l'ouest de la Beauce, estimée par la modèle CERES-EGC utilisant les caractéristiques des sols.**

Ces résultats mettent en évidence une forte variabilité spatiale des émissions. L'évaluation des émissions totales faites à l'aide de CERES-EGC couplé à la base de données sur les sols donne des chiffres inférieurs d'environ 30% aux estimations faites à partir de la méthodologie du GIEC. Cette méthode permet en outre d'évaluer la variabilité spatiale et temporelle des émissions.

### 3.3.2 Evaluation des émissions de NO spatialisées sur l'Ile de France

La même méthodologie, mais dans une version plus aboutie, puisqu'elle a été appliquée à toute l'Ile de France, et à l'ensemble des cultures (réparties en 6 classes), a été utilisée pour évaluer les émissions de NO par les sols de culture. Nous avons utilisé le modèle d'émission de NO de Laville *et al.* (2005) intégré dans CERES-EGC (Rolland *et al.*, 2007). Le contexte, ici, n'était pas l'effet de serre, mais l'évaluation de l'impact des émissions de NO par les sols sur la formation d'ozone troposphérique à l'échelle régionale. Dans ce cas, la localisation des émissions est importante et l'utilisation des caractéristiques locales des sols, du climat et des pratiques agricoles est essentielle.

Ici encore, les résultats (Figure 9) montrent une forte variabilité spatiale des émissions (rapport de 1 à 10 selon les zones). Le principal facteur de variation est le type de sol, puis le type de culture et enfin le climat.



**Figure 9 :** Emissions de NO sur l’Ile de France, estimées par le modèle CERES-EGC couplé à des bases de données de sols, climat, utilisation du sol et pratiques agricoles (Rolland *et al.*, en préparation).

#### 4. Conclusions

Ce rapport a présenté des résultats largement acquis sur des projets de recherche initiés en dehors du PIREN-Seine, mais les approches utilisées nous semblent pouvoir bénéficier au PIREN-Seine de différents points de vue.

Les méthodes de mesure des flux de GES et autre 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 données seront une source d’information pour le calage de modèles ou des évaluations locales ou régionales des émissions.

Un modèle comme CERES-EGC a montré sa capacité à estimer les flux de GES et leurs variations temporelles. Il permet aussi de prendre en compte les facteurs locaux liés aux sols, au climat et aux pratiques agricoles. Ceci nous a permis et permettra à d’autres partenaires d’évaluer la variabilité temporelle et spatiale des émissions, leur évolution possible dans le futur sous la contrainte climatique et les changements de pratiques. Il est à noter que la même démarche pourrait être appliquée avec un autre modèle d’écosystème et d’autres bases de données (AI Preshume). De tels travaux sont en cours avec DND (Li, 2000) dans le cadre de NitroEurope-IP en relation avec l’Institut de Météorologie de Garmisch-Partenkirchen (IMK-FZK) et pourraient l’être avec STICS (Brisson *et al.*, 2003) à condition d’améliorer le module d’émissions de N<sub>2</sub>O et d’y introduire certains processus manquants (nitrification).

Enfin, l’ancrage du site expérimental de Grignon, ainsi que du modèle CERES-EGC dans différents projets européens est une piste d’ouverture supplémentaire du programme PIREN-Seine.

## 5. 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.
- Gabrielle B., Roche R., Angas P., Cantero-Martinez C., Cosentino L., Mantineo M., Langensiepen M., Hénault C., Laville P., Nicoullaud B., Gosse G. - 2002 - A priori parameterisation of the CERES soil-crop models and tests against several European data sets. *Agronomie*, 22, 119-132.
- 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.
- Garnier J., Mounier E., Laverman A., Billen G., Martinez A., Silvestre M., Amsaleg C. - 2008 - Facteurs de contrôle de la production de N<sub>2</sub>O par dénitrification. Bilans des émissions à l'échelle du bassin de la Seine. Rapport d'activité 2007 du PIREN-Seine, (ce volume).
- 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. Fertil. 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.
- Laville P., Hénault C., Gabrielle B., Serça D. - 2005 - Measurement and modelling of NO fluxes on maize and wheat crops during their growing seasons: Effect of crop management. *Nutrient in Agroecosystems*, 72, 159-171..
- Lehuger S., Gabrielle B. - 2008 - 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.
- Rolland M.-N., Gabrielle B., Laville P., Serça D., Cortinovis J., Larmanou E., Lehuger S., Cellier P. - 2007 - Modelling of nitric oxide emissions from temperate agricultural ecosystems. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 80, 75-93.
- Silvestre M., Billen G., Garnier J. - 2008 - AIPRESHUME - Atlas Interactif des Pressions Humaines. Rapport d'activité 2007 du PIREN-Seine, (ce volume).
- 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.