

Modélisation biophysique des émissions de NO par les sols agricoles en Ile de France

Marie-Noëlle Rolland¹, Benoît Gabrielle*¹, Patricia Laville¹, Pierre Cellier¹, Jean-Marc Gilliot¹, Joël Michelin¹, Dalila Hadjar, Matthias Beekmann²

¹UMR 1091 INRA-AgroParisTech Environnement et Grandes Cultures, 78850 Thiverval-Grignon

²UMR 5560, Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques – OMP 31062 Créteil.

[*Benoit.Gabrielle@agroparistech.fr](mailto:Benoit.Gabrielle@agroparistech.fr)

1 Introduction

Les sols cultivés sont une source importante de monoxyde d'azote (NO), précurseur de l'ozone troposphérique qui occasionne des impacts sur la santé humaine et sur les écosystèmes. Ils sont en effet responsables de 10 à 23% des émissions totales d'oxyde d'azote (NOx) dans le monde (Delmas et al., 1997), les autres sources anthropiques étant principalement liées aux processus de combustion (transport, chauffage, industries). Dans les zones rurales où les sources de NO par combustion sont faibles, les sols agricoles peuvent jouer un rôle tout-à-fait significatif dans la pollution de fond et les pics d'ozone.

Les processus photochimiques qui conduisent à l'accumulation d'ozone dans les basses couches de l'atmosphère dépendent fortement des dynamiques spatiales et temporelles des sources naturelles et anthropiques des précurseurs de l'ozone. Une simulation réaliste de ces processus nécessite donc des estimations des émissions de NO à haute résolution dans l'espace et le temps.

La production de NO dépend des processus microbiens de nitrification et de dénitrification. La nitrification est une oxydation de l'ammonium (NH₄⁺) en nitrate (NO₃⁻), qui exige une disponibilité en dioxygène. La dénitrification est une réduction anaérobie du nitrate en formes gazeuses d'azote (N₂O et N₂). La voie nitrification prédomine dans des zones tempérées (Laville et al., 2005), et explique 60% à 90% du total des émissions (Godde et Conrad, 2000). La production de NO dépend de facteurs environnementaux et agronomiques: conduite des cultures, types de sol et séquence climatique. Etant donnée la complexité des phénomènes sous-jacents, les évaluations des sources biogéniques de NO demeurent fortement incertaines aux niveaux régionaux et globaux. Les inventaires nationaux des sources d'azote réactif (Nr) des écosystèmes reposent actuellement sur des jeux de facteurs d'émission dérivés d'expériences de plein champ, en faisant l'hypothèse d'un rapport fixe entre les émissions et les apports d'azote sous formes d'engrais. Une telle approche est utilisée dans le modèle de chimie-transport CHIMERE, qui sert à la prévision des épisodes de pollution dans un certain nombre de régions, dont l'Ile de France (Stohl et al., 1996).

Dans l'objectif d'une meilleure prise en compte de l'impact des sources agricoles sur la prévision des concentrations d'ozone atmosphérique, nous avons utilisé le modèle de culture CERES-EGC pour réaliser un inventaire d'émission à échelle fine des émissions de NO depuis les sols cultivés en Ile de France. Les émissions ont été simulées sur une base de temps journalière du 1 novembre 2000 au 31 décembre 2001, en utilisant une base de données spécifique incluant des informations détaillées sur les sols, le climat et les pratiques agricoles.

2 Modélisation à échelle régionale

2.1 Le modèle CERES-EGC

CERES-EGC est un modèle d'agro-écosystème adapté de la famille CERES, avec un accent sur la simulation des sorties environnementales telles que la lixiviation de nitrate et les émissions gazeuses d'ammoniac et des

oxydes d'azote (Gabrielle et al., 2006a). CERES-EGC contient des sous-modèles simulant les principaux processus régissant les cycles de l'eau, de carbone et d'azote dans le système sol-plante-atmosphère. Un module physique simule les transferts de chaleur, d'eau et des nitrates en bas du profil de sol et l'évaporation de sol, le drainage, et la transpiration en fonction des conditions climatiques. Un module microbiologique simule le turnover de la matière organique dans la couche labourée, comportant la minéralisation et l'immobilisation de l'azote minéral, la nitrification et la dénitrification. La photosynthèse nette de la culture est une fonction linéaire du rayonnement intercepté (selon l'approche de Monteith), qui est calculé en fonction de l'indice foliaire à partir d'une la loi de Beer-Lambert de diffusion dans des milieux turbides. Les photosynthétats sont répartis chaque jour entre les organes en croissance (racines, feuilles, tiges et fruit) selon l'étape de développement de récolte. Ce dernier est conduit par l'accumulation des degrés-jours croissants, aussi bien que la température et le jour froids pour des récoltes sensibles au vernalisation et à la photopériode. Pour finir, l'absorption d'azote de la culture est calculée par une loi d'offre/demande, l'offre du sol dépendant des concentrations en nitrate et en ammonium dans le profil et de la densité de longueur de racine.

CERES-EGC inclut le sous-modèle d'émission de NO de Laville et al. (2005), qui simule la production de NO dans sols agricoles par la voie de nitrification (Rolland et al., 2008). CERES-EGC fonctionne sur un pas de temps quotidien, et utilise la pluie quotidienne, la température de l'air moyenne et l'évapotranspiration potentielle de Penman comme variables de forçage.

2.2 Bases de données spatialisées

Nous avons simulé les émissions de NO agricoles sur la région Ile de France (12 072 km²), un domaine approximativement carré de 150 kilomètres de côté. La région est caractérisée par les une diversité d'utilisation des terres, parmi lesquels la part des sols agricoles et forestiers est de 55% et 23%, respectivement. Une base de données sous système d'information géographique (SIG) a été construite avec des données geo-référencées disponibles sur la région, incluant les limites administratives (cantons), la localisation des sources d'émission (terres arables), la conduite des cultures, les sols et le climat (voir Tableau 1 pour une description des couches et sources d'information). Les données climatiques ont été fournies sur la période de simulation (Novembre 2000 à Décembre 2001) par le modèle météorologique à méso-échelle MM5 (voir Rolland, 2008, pour plus de détails).

Les diverses couches d'information spatiales (au format vectoriel ou raster) ont été superposées en traçant les unités spatiales élémentaires représentant des combinaisons uniques des types de sol, d'usage des sols, et de conduite des cultures. Ces unités ont été plus tard employées pour les simulations avec CERES-EGC.

Tableau 1: Format des différentes couches d'information utilisées dans la spatialisation de CERES-EGC.

<i>Couche d'information</i>	<i>Format géographique</i>	<i>Résolution</i>	<i>Source</i>
Types de sols	Contours géo-référencés (Unités Cartographiques de Sols)	-	Carte des sols au 1:250 000 et base DONESOL (INRA Infosol Orléans)
Données climatiques	Données ponctuelles	16 km	Simulations MM5, Gurci et al., LISA
Itinéraires techniques	Moyennes régionales	Région	Chambres d'Agriculture et enquête AGRESTE (Min. Agriculture)
Occupation des sols	Surfaces en culture par canton	Canton	Recensement Général Agricole (2000)
	Contours des surfaces arables	100 m	Corine Land Cover (UE-IFEN, 2000)

3 Résultats

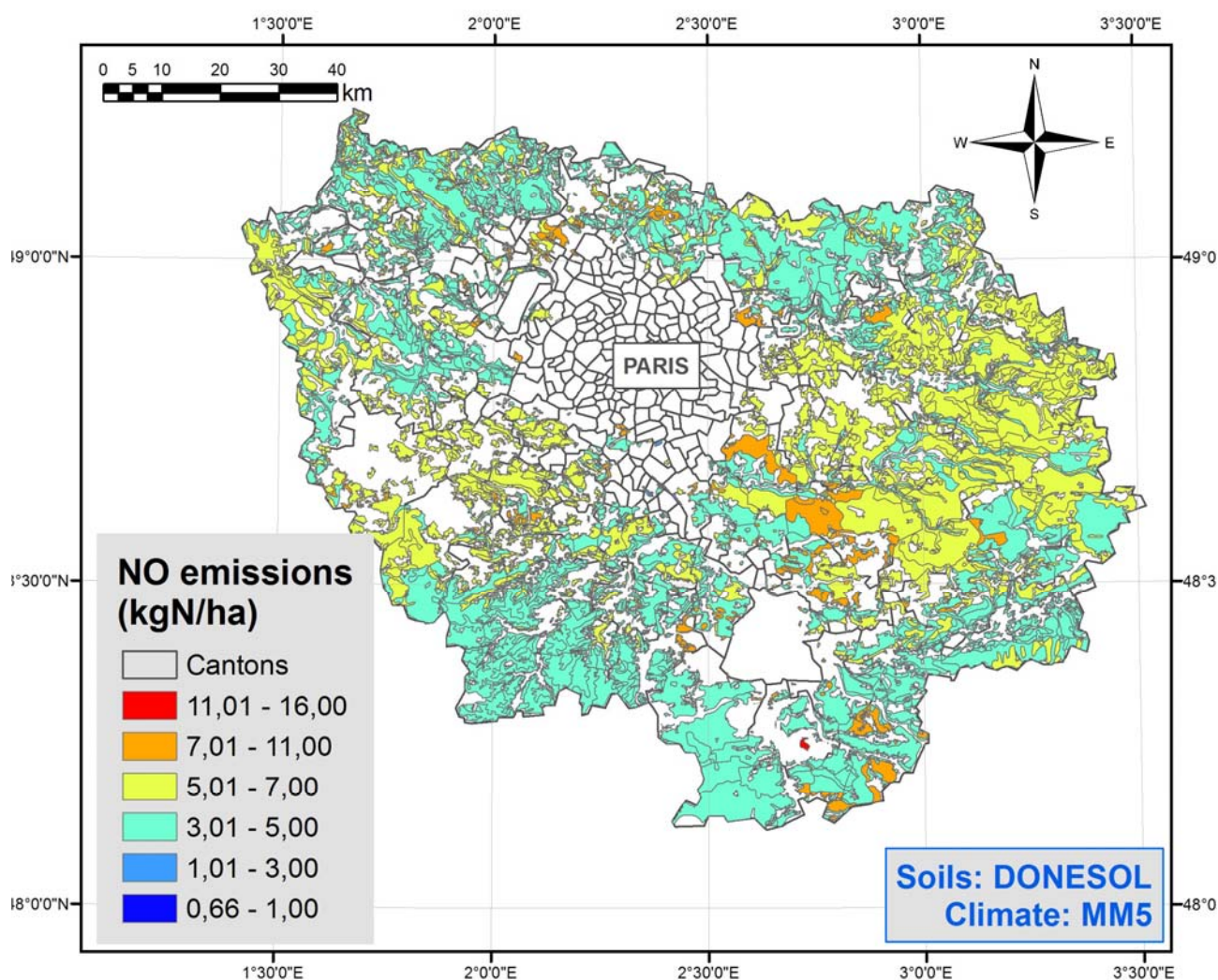


Figure 1 : Cartographie des émissions des NO simulées en Ile de France, en cumul sur la période Novembre 2000-Décembre 2001.

3.1 Répartition géographique des émissions

La Figure 1 présente la répartition des flux de NO simulés sur les sols agricoles en Ile de France de Novembre 2000 à Décembre 2001, sous forme de carte. Celle-ci montre une grande hétérogénéité spatiale des émissions, avec des valeurs s'échelonnant entre 0,7 et 16,5 kg N-NO/ha sur l'ensemble du domaine. Les émissions sont plus importantes pour les cultures de printemps (maïs et betterave), avec une fourchette de 2,8 à 16,5 kg N-NO/ha, tandis que les cultures d'hiver (blé, orge et colza) émettent entre 2,3 et 10,1 kg N-NO/ha. Le pois et les jachères sont les émetteurs les plus faibles, dû à l'absence d'apport d'engrais minéral, avec une fourchette de 0,7 à 9,3 kg N-NO/ha. Pour ces 3 classes, les flux médians sont de 4,9, 3,8 et 2,8 kg N-NO/ha, respectivement. Au niveau géographique, les plus grandes émissions se produisent à l'est du domaine, et dans certains 'hot spots' au Sud de la zone. Cette distribution est fortement liée à la structuration spatiale des sols: les sols les plus émetteurs correspondent à la famille des sols bruns (Luvisols), qui créent des conditions hydriques favorables à la nitrification.

Au total, le flux moyen régional de NO s'élève à 5,1 kg N-NO/ha, ce qui correspond à un total de 2800 t N-NO sur l'ensemble des sols agricoles. Ceci correspond à un facteur d'émission de 3% part rapport aux apports d'engrais azoté, qui représentent 150 kg N/ha en moyenne. A l'échelle régionale, les sols ne représentent que 2,8% des émissions totales de NO sur la région, soit 4,4% des émissions du secteur des transports.

Notre estimation pour les émissions agricoles est toutefois beaucoup plus importante (d'un facteur 5) que celle qui est utilisée actuellement dans les cadastres d'émissions agricoles dans les modèles de chimie-transport. La différence principale tient à la prise en compte des émissions de fond des sols (*i.e.* non liées aux apports d'engrais minéral), et à un facteur d'émission par rapport aux apports d'engrais en moyenne plus élevé que celui qui est utilisé dans les inventaires actuels (CITEPA, 2005). Notre estimation basée sur la modélisation biophysique est néanmoins proche de résultats rapportés par Butterbach-Bahl et al. (2001) en Saxe, avec une méthodologie similaire.

3.2 Dynamique temporelle

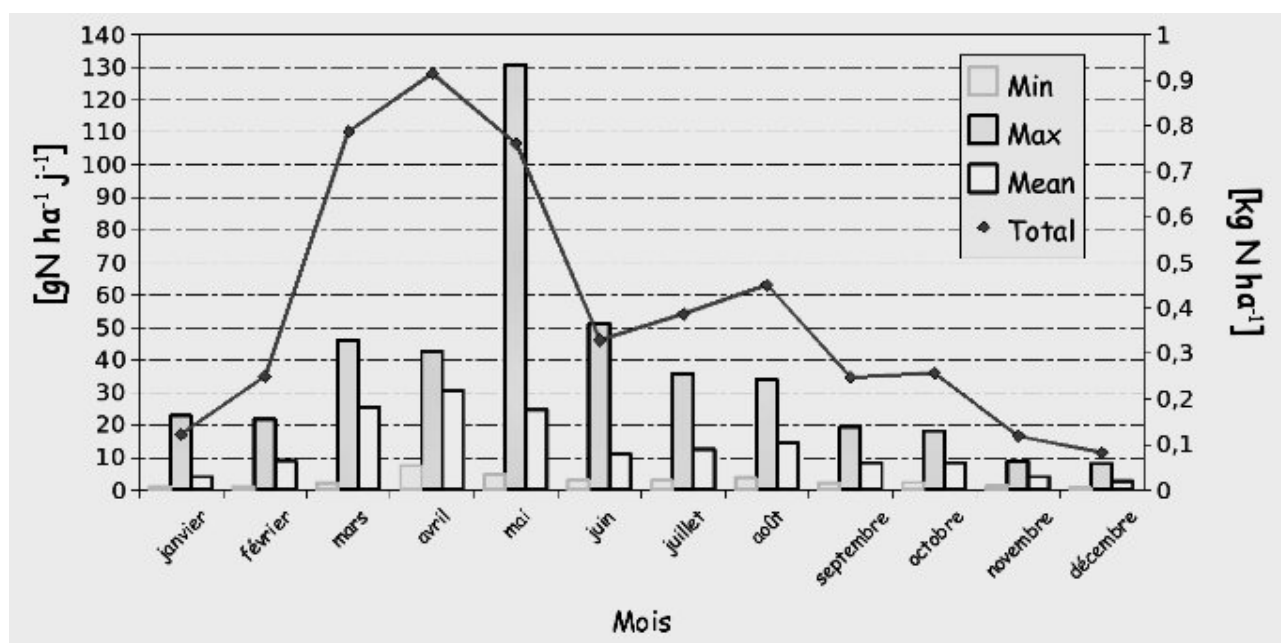


Figure 2 : Dynamique mensuelle des flux de NO journaliers (axe de gauche) et cumulés sur le mois (axe de droite) en Ile de France. Les bâtons correspondent aux valeurs journalières minimales, maximales et moyennes sur le domaine, et la ligne continue aux cumul mensuels moyens.

Les émissions de NO depuis les sols sont caractérisées par une forte variabilité saisonnière, avec des valeurs les plus fortes en mai, en raison de la fertilisation des cultures de printemps (Figure 2). Les émissions décroissent ensuite progressivement, pour atteindre des valeurs très faibles en hiver. La synchronisation possible entre les pics d'émission de la fin du printemps et les premiers épisodes météorologiques favorables à la formation d'ozone troposphérique (rayonnement solaire important et atmosphère relativement stable) est critique dans l'expression de l'impact des apports d'engrais sur la qualité de l'air au niveau régional.

4 Conclusion

Les cadastres d'émission journaliers générés ont été utilisés comme entrée du modèle de chimie atmosphérique Chimère, pour prévoir de champs de concentration d'ozone sur l'Ile de France lors d'épisodes de pollution au printemps et en été 2001 (Rolland, 2008). En comparaison au module d'origine du modèle Chimère, le cadastre à haute résolution établi à partir du modèle CERES-EGC a mis en évidence des variations spatiales et temporelles de la contribution des surfaces agricoles plus fortes, avec des structures

différentes. Les prévisions de champs d'ozone et des pics de pollution photochimique ont été significativement affectées par l'utilisation d'un tel cadastre, qui devrait permettre des améliorations. Leurs impacts des sources agricoles étant déterminés par leur position géographique vis-à-vis des autres précurseurs d'ozone troposphérique, ce travail ouvre des perspectives pour cibler des mesures permettant de diminuer l'impact des activités agricoles sur la qualité de l'air.

5 Références

- Butterbach-Bahl K., Strange F., Papen H. et Li C. 2001. Regional inventory of nitric oxide and nitrous oxide emissions for forest soils of southeast germany using the biogeochemical model PnET-N-DNDC. *Journal of Geophysical Research*, 106 :34,155–34,166.
- CITEPA. 2005. Inventaire dans l'air en France : Emissions dans l'air en France : Régions de la métropole. Rapport technique, CITEPA, Paris.
- Delmas R., Serça, D., Jambert C. 1997. Global inventory of NO_x sources. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 48: 51--60.
- Godde M., Conrad R. 2000. Influence of soil properties on the turnover of nitric oxide and nitrous oxide by nitrification and denitrification at constant temperature and moisture. *Biology and Fertility of Soils*, 32: 120--128.
- 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 Cycling in Agroecosystems*, 72: 159--171. DOI 10. 1007/s10705-005-0510-5.
- Rolland, M.-N. 2008. . Thèse de doctorat, Université Paris 6.
URL : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00325316/en/>
- Rolland M.-N., Gabrielle B., Laville P., Serça D., Cortinovis J., Larmanou E., Lehuger S. et Cellier P. 2008. Modeling of nitric oxide emissions from temperate agricultural soils *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 80 :75–93. DOI : 10.1007/s10705-007-9122-6
- Stohl A., Williams E., Kromp-Kolb G.W.H. 1996. An european inventory of soil nitric oxide emissions and the effect of these emissions on the photochemical formation of ozone. *Atmospheric Environment*, 30:3741--3755.
- UE-IFEN Corine Land Cover. 2000. Base de données d'occupation des sols, format vectoriel, échelle 1 :250 000.