

Vers une méthode de niveau 2 pour estimer les émissions annuelles de N₂O des sols cultivés ?

C. Le Gall (Terres Inovia), E. Matthias, A. Durand, E. Martin (Centre Interprofessionnel Technique de l'Etudes de la Pollution Atmosphérique), P. Cellier (INRA UMR ECOSYS), JP. Cohan (Arvalis-Institut du Végétal), R. Duval (Institut Technique de la Betterave), T. Eglin (ADEME), F. Millard (ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie) et L. Larbodière (ministère de l'agriculture, de l'alimentation et de la forêt).

Le N₂O, un gaz qui représente 50% des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) du secteur agricole

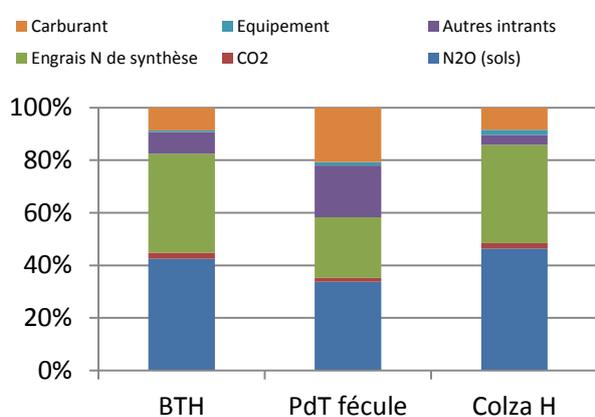


Figure 1 - Part des différentes sources de GES dans le bilan globale de 3 cultures (source : AgriBalyse, 2014)

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine agricole représentent 19% des émissions totales de GES à l'échelle nationale. Cependant, le poids du secteur agricole dans les émissions de N₂O est très marqué puisque ce secteur contribue pour 80% aux émissions nationales de N₂O (CITEPA, 2015).

Le N₂O impacte aussi lourdement le bilan GES des produits alimentaires issus de matières premières agricoles. Il représente ainsi 34% des GES émis pour la culture de pomme de terre mais jusqu'à 46% pour la culture de colza, comme le montre la figure 1.

Le N₂O est produit par les bactéries du sol impliquées dans la transformation de l'azote, au cours de deux processus principalement: la nitrification et la dénitrification. Ces processus sont très dépendants des conditions du milieu (pH, humidité et température du sol) et de la disponibilité en substrat (azote, carbone) : ils sont excessivement variables, au sein même d'une parcelle, et d'une année sur l'autre en fonction des conditions météorologiques, et notamment des événements pluvieux.

Dans le cadre de plusieurs accords internationaux (protocole de Kyoto, paquet « climat énergie » européen), la France s'est engagée à réduire ses émissions de GES. Du fait du fort poids des émissions de N₂O pour le secteur agricole et de l'importance de ce dernier dans les émissions totales de N₂O à l'échelle nationale, leur réduction représente un enjeu majeur pour ce secteur.

Estimer les émissions de N₂O par les sols cultivés : un vrai challenge

Comme évoqué précédemment, les flux de N₂O sont très variables et donc par conséquent difficile à estimer précisément. Actuellement c'est la méthode par défaut du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), dite de niveau 1, qui est la plus couramment utilisée

à l'international. C'est par ailleurs la seule méthode officiellement reconnue en France pour la réalisation des inventaires nationaux d'émissions.

Basée sur la publication de Bouwman (1996) et actualisée suite à la publication de Stehfest et Bouwman (2006), elle postule (i) que les émissions de N₂O par les sols sont exclusivement liées aux apports d'azote (engrais minéraux et organiques) et à l'azote contenu dans les résidus de végétaux restitués au sol et (ii) que ces émissions sont égales à 1% de l'azote introduit dans le système (engrais et résidus) :

Encadré 1 - Méthode de calcul des émissions de N₂O par les sols cultivés sous culture (annuelles ou pérennes) ou prairies fertilisées (pour évaluer les émissions totales de l'agriculture, il faut ajouter les émissions par les sols organiques et le pâturage) :

$$N-N_2O \text{ (kg/ha/an)} = 0.01 \times (N_{\text{min}} + N_{\text{org}} + N_{\text{res}})$$

Où N_{min} = quantité d'azote apportée à la culture sous forme d'engrais de synthèse (en kg/ha/an),
 N_{org} = quantité d'azote apportée à la culture sous forme d'engrais organique (en kg/ha/an) et N_{res} = quantité d'azote contenu dans les résidus restitués au sol

Simple à mettre en œuvre, elle présente néanmoins les désavantages d'avoir été élaborée à partir de données internationales, peu représentatives des conditions françaises, et de négliger les facteurs autres que la dose d'azote, notamment les pratiques agricoles (par ex. travail ou non-travail du sol), et les facteurs climatiques moyens.

Le GIEC incite néanmoins chaque pays signataire du protocole de Kyoto à élaborer une méthode spécifique, dite de niveau 2, basée sur des données nationales et proposant des facteurs d'émissions différenciés en fonction des sources d'azote considérées. Elle propose aussi d'introduire d'autres facteurs dans l'équation, afin de réduire les incertitudes du calcul (qui sont de 300% avec la méthode de niveau 1). Aujourd'hui, seuls quelques pays utilisent une méthode de niveau 2 : le Canada, suite à la publication de Rochette et al (2008), la Nouvelle-Zélande, suite à la publication de Clough et al (2007) et les Pays-Bas suite à la publication du rapport coordonné par Kuikman et al (2006).

Il est aussi proposé par le GIEC d'utiliser des modèles mécanistes spatialisés pour calculer les émissions de N₂O (méthode de niveau 3). Cette étape n'a pour le moment été franchie que par un seul pays, les Etats Unis qui utilisent depuis 2006 une version simplifiée du modèle DAYCENT pour la réalisation des inventaires nationaux d'émissions (Del Grosso et al, 2008).

Le projet NOGAS2 pour aller vers une méthode d'estimation spécifiquement française

Objectif

L'ambition du projet NOGAS 2 coordonné par le CITEPA et Terres Inovia (financé par le ministère en charge de l'agriculture), et dont de premiers résultats sont présentés dans cette communication, est d'élaborer une nouvelle méthode d'estimation des émissions de N_2O des sols cultivés à l'échelle territoriale, en se basant sur des données spécifiquement françaises. Les données utilisées pour ce projet sont exclusivement issues de parcelles conduites en grandes cultures : les prairies et les cultures pérennes sont donc hors du champ d'application de la méthode produite.

Les données expérimentales

L'objectif est de parvenir à estimer plus précisément les émissions de N_2O , notamment en introduisant de nouveaux facteurs permettant de rendre compte de l'effet du pédoclimat et des pratiques culturales autres que la fertilisation sur les dynamiques d'émissions annuelles. L'objectif sous-jacent est aussi de produire une méthode utilisable pour la réalisation des Analyses de Cycles de Vie (ACV) et des inventaires nationaux d'émissions : une méthode « simple » à mettre en œuvre, robuste et qui permettent d'évaluer l'action de leviers d'atténuation.

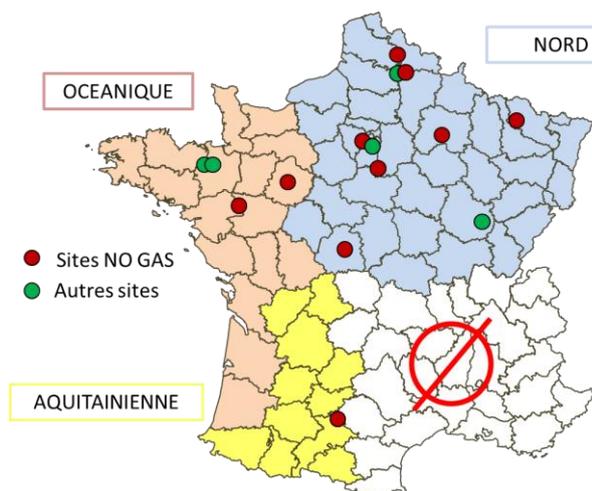


Figure 2 - Répartition des essais dont sont issus les données de flux annuels de N_2O utilisés dans le projet NO GAS2

Dans le cadre du projet NOGAS, financé par le Casdar (2009-12), un important effort d'acquisition de références expérimentales sur les émissions de N_2O en contexte de production de grandes cultures a été entrepris. Sur 2 campagnes (2010-11 et 2011-12), c'est ainsi 58 données de flux annuels qui ont pu être mesurés sur 9 sites répartis sur le territoire français (cf figure 2).

Dans le cadre du projet NO GAS2, ces données ont été étoffées par celles acquises antérieurement sur le territoire, notamment dans le cadre de projets nationaux ou européens.

La base de données constituée contient *in fine* 119 données de d'émissions annuelles auxquelles sont associés des données caractérisant le pédoclimat et les pratiques culturales mises en œuvre sur chaque essai. Les situations couvertes sont majoritairement en blé tendre d'hiver, colza d'hiver et maïs, implantées en labour ou travail superficiel. La majorité des essais sont conduits sans apports d'azote organique, mais quelques essais – inclus dans cette base – ont été dédiés spécifiquement à l'étude de l'impact de ces produits sur les émissions de N_2O . Les données recueillies montrent une forte variabilité des flux mesurés, avec une gamme allant de 0,07 kg de $N-N_2O/ha/an$ à 14,5 kg de $N-N_2O/ha/an$. Cependant, les trois-quarts des flux enregistrés sont inférieurs à 2 kg de $N-N_2O/ha/an$.

Le modèle statistique

A partir de ces données, un modèle statistique de calcul d'émissions annuelles de N_2O a été élaboré. La méthode de modélisation retenue est celle des modèles linéaires mixtes, avec l'introduction d'un facteur « site » en facteur à effet aléatoire. La sélection des variables a été réalisée via une procédure

de sélection ascendante hiérarchique, à partir d'un pool de variables définies *a priori* comme ayant un impact potentiel sur les émissions de N₂O annuelles (2 variables climatiques, 5 variables pédologiques et 7 variables culturales).

Les variables ainsi retenues sont **la quantité d'azote apportée au travers des produits organiques et des engrais de synthèse, le pH et la pluviométrie annuelle cumulée**. Le modèle élaborée a la forme suivante :

Encadré 2 – Modèle issu du projet NO GAS2

$$\ln(E_{N_2O}) = \mu = \alpha * N_{min} + \beta * N_{org} + \gamma * pH + \delta * \text{Pluviométrie} + \phi_{SITE} + \varepsilon$$

Où N_{min} = quantité d'azote apportée à la culture sous forme d'engrais de synthèse (en kg/ha/an), N_{org} = quantité d'azote apportée à la culture sous forme d'engrais organique (en kg/ha/an), pH = pH du sol, Pluviométrie = pluviométrie annuelle cumulée sur l'année de récolte (en mm), ϕ_{SITE} = effet du site d'essai (de valeur nul pour tout nouveau site), ε = erreur du modèle statistique.

Les variables ayant le plus de poids sont celles liées au pédoclimat : ces résultats sont en accord avec ceux de la littérature, qui ont démontré le poids important des variables d'état du milieu (notamment humidité du sol, très liée à la pluviométrie journalière) sur l'intensité des flux de N₂O. L'impact des pratiques culturales ne transparait dans cette équation qu'au travers de la dose d'azote apportée. Si c'est le principal facteur cité dans les publications scientifiques comme ayant un impact sur les émissions de N₂O, d'autres facteurs comme la forme de l'azote apporté ou l'intensité du travail du sol ont aussi été régulièrement mentionnés (Hénault et al, 1998 ; Dobbie et al, 2003 ; Six et al, 2004 ; Smith et al, 2004 ; Van Kessel et al, 2013). Dans le cadre de notre étude, les flux de N₂O ont été mesurés principalement sur des parcelles conduites selon les pratiques dominantes sur le bassin de production : 43% des parcelles ont été conduites en labour contre 63% en travail superficiel, et les deux formes d'engrais de synthèse utilisée étaient à parts égales l'ammonitrate et la solution azotée, ce qui est cohérent avec les tendances observées au niveau national sur les bassins de grandes cultures (AGRESTE, 2014). Ainsi, bien que les pratiques dominantes soient bien représentées, leur effet ne ressort pas dans la grande variabilité du jeu de données.

Résultats : quelles performances du modèle statistique élaboré ?

Une fois produit, le modèle statistique a été évalué. Si plusieurs indicateurs de qualité du modèle ont été étudiés, nous reviendrons ici sur un seul d'entre eux : l'erreur de prédiction, estimée par validation croisée au travers de la RMSEp (Root Mean Squared Error of prediction). Cette erreur a été ensuite comparée à celle de la méthode de niveau 1 (estimation des flux à partir des données disponibles pour les différents essais et comparaison aux résultats mesurés), ainsi qu'à ceux de 3 autres modèles statistiques issus de la littérature scientifique, établis par Freibauer et Kaltschmitt (2003), Stehfest et Bouwman (2006) et Philibert et al (2012). L'encadré 3 fournit plus de précisions sur ces 3 modèles.

Encadré 3 - Précisions sur les 3 modèles issus de la littérature scientifiques auxquels ont été comparés les performances du modèle statistique élaboré dans le cadre du projet NOGAS2

Modèle de Freibauer et Kaltschmitt (2003)

Freibauer et Kaltschmitt ont compilé un ensemble de 158 données de flux, collectés sur 40 sites expérimentaux répartis sur toute l'Europe. Le modèle obtenu est le suivant :

$$N-N_2O \text{ (kg/ha/an)} = 0.6 + 0.002*(Norg + Nmin) + 1.27*Corg - 0.024*Sables$$

Avec Corg: teneur en carbone organique du sol exprimé en pourcentage de la masse de sol échantillonnée, Sables: proportion de sables fins et grossiers de l'horizon de surface exprimé en pourcentage de la masse de sol échantillonnée.

Modèle de Stehfest et Bouwman (2006)

Stehfest et Bouwman ont collecté et rassemblé dans une base de données plus de 900 données expérimentales de flux annuels de N₂O issues de publications internationales. Le modèle obtenu est le suivant :

$$\text{Log (N-N}_2\text{O) (kg/ha/an)} = -1.516 + 0.038*(Norg + Nmin) + EFCorg + EFPH + EFTexture + EFClimat + EFCulture + 1.99$$

Avec: EFCorg: facteur d'émission lié à la teneur en carbone organique du sol, EFPH: facteur d'émission lié au pH du sol, EFTexture: facteur d'émission liée à la classe texturale du sol, EFCulture: facteur d'émission lié à l'espèce cultivée.

Modèle de Philibert et al (2012)

Philibert et al. (2012) ont réutilisé la base de données élaborée par Stehfest et Bouwman (2006) pour élaborer et tester différents modèles statistiques de prédiction des émissions de N₂O. Le modèle ayant obtenu les meilleurs résultats est le suivant :

$$N-N_2O \text{ (kg/ha/an)} = \exp(0.19 + 0.0037*[Norg + Nmin])$$

La comparaison de l'erreur de prédiction calculé avec l'ensemble de ces modèles met en évidence que :

- Comparativement à la méthode de niveau 1, le modèle statistique issu du projet NO GAS 2 permet une réduction d'erreur de 37% même si en valeur absolue, son erreur de rpédiction reste élevée.
- Comparativement aux 3 modèles statistiques issus de la littérature internationale, l'erreur de prédiction du modèle NO GAS 2 apparait systématiquement plus faible (cf tableau 1)

Méthode/ modèle	Méthode de niveau 1 (GIEC)	Modèle NO GAS 2	Modèle de Freibauer et Kaltschmitt (2003)	Modèle de Stehfest et Bouwman (2006)	Modèle de Philibert et al (2012)
Erreur de prédiction (kg de N-N ₂ O/ha/an)	1,96	1,23	2,39	2,71	2,01

Son application à l'échelle de la France : quelles perspectives ?

A ce jour, le modèle statistique élaboré est en cours d'évaluation à l'échelle France par le CITEPA. Cette étape est cruciale car elle permet d'aller au-delà de l'évaluation statistique en regardant comme le modèle réagit au changement d'échelle.

De premiers résultats sont présentés mais restent à affiner pour finaliser le projet. Les premières évaluations montrent de nettes différences d'estimation annuelles entre les deux méthodes comparées, i.e. la méthode de niveau 1 du GIEC et le modèle statistique issu du projet NO GAS2, avec des niveaux d'émissions estimés par notre modèle plus variables et très corrélés aux variations de pluviométrie (cf figure 3).

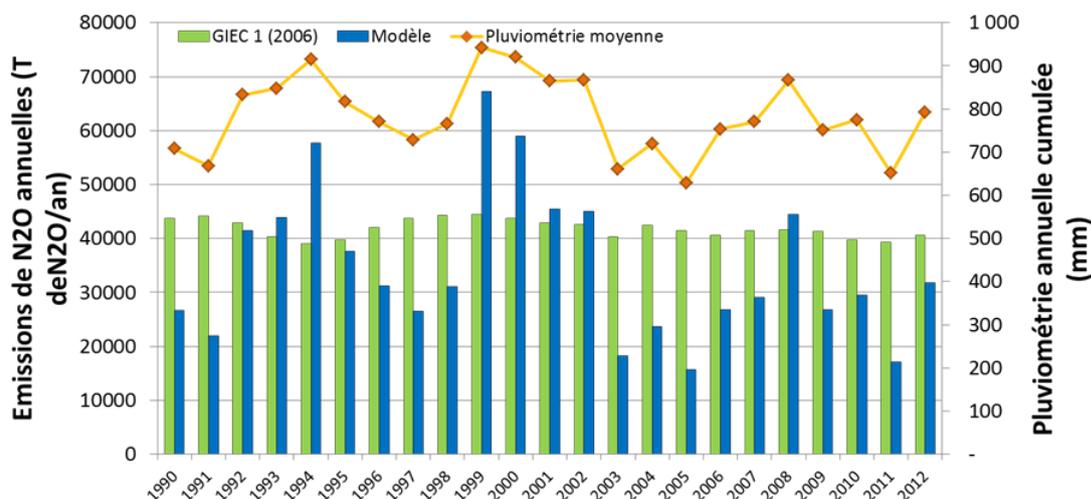


Figure 3 - Comparaison des estimations de quantités de N₂O émises annuellement au niveau français avec le modèle statistique issu du projet NO GAS2 et la méthode de niveau 1 (ces résultats sont à prendre avec précautions car issus d'une application du modèle avec des données agrégées à l'échelle nationale alors que dans le cadre des inventaires nationaux d'émissions, le modèle statistique serait appliqué à l'échelle cantonale ou départementale, et les résultats ensuite compilés au niveau national)

Ce travail préliminaire devra être poursuivi sur 2016 afin de valider l'applicabilité de la mise en œuvre du modèle à l'échelle de la France (gestion du changement d'échelle notamment, utilisation par les acteurs en vue de l'évaluation de scénarii ou réalisation d'ACV).

Conclusion

Le travail engagé dans le projet NO GAS 2 a tout d'abord permis de valoriser l'important travail d'acquisition de références réalisé en France sur les émissions de N₂O sur les bassins de production de grandes cultures, et a ouvert la porte pour un travail similaire à engager sur prairies et cultures pérennes.

Les données acquises et leur analyse ont mis en évidence un effet particulièrement important des conditions du milieu sur les émissions de N₂O, avec un fort poids du pH et de la pluviométrie annuelle dans le modèle statistique élaboré dans le cadre de ce projet. Néanmoins, à l'échelle locale (i.e. à pH et pluviométrie annuelle similaire), c'est l'effet de la fertilisation qui domine. Afin de préciser l'effet d'autres facteurs, comme la forme de l'engrais apporté, il sera sans doute nécessaire de compléter la base de données existante avec des essais portant spécifiquement sur la comparaison des formes d'engrais.

Les premiers résultats obtenus, notamment au travers de la validation statistique, sont prometteurs. L'applicabilité de la méthode (notamment la problématique du changement d'échelle) reste néanmoins à valider, avec la poursuite des tests engagés à l'échelle de la France.

Bibliographie mentionnée :

AGRESTE Les Dossiers N° 21 - juillet 2014

Bouwman A.F. 1996. Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 46 : 53 –70. Butterbach-Bahl K, Baggs EM, Dannenmann M, Kiese R, Zechmeister-Boltenstern S. 2013 Nitrous oxide emissions from soils : how well do we understand the processes and their controls? *Phil Trans R Soc B.* 368 : 20130122. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0122>

CITEPA, 2015. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France. Format SECTEN©.

Clough T., Di H., Cameron K., Sherlock RR., Metherell AK, Clark H., Rys G. 2007. Accounting for utilization of a N₂O mitigation tool in the IPCC inventory methodology for agricultural soils. *Nut. Cy. Agroecosyst.* 78 :1-14.

Dobbie, K. E., & Smith, K. A. 2003. Impact of different forms of N fertilizer on N₂O emissions from intensive grassland. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 67(1), 37-46.

Freibauer, A., & Kaltschmitt, M. (2003). Controls and models for estimating direct nitrous oxide emissions from temperate and sub-boreal agricultural mineral soils in Europe. *Biogeochemistry*, 63(1), 93-115.

Hénault C., Devis X., Lucas J.L., Germon J.C., 1998a. Influence of different agricultural practices (Type of crop - form of N-fertilizer) on soil nitrous oxide emissions. *Biol. Fertil. Soils, Special issue, Soils and Climate Change*, 27, 299-306.

Kuikman, P.J., K.W. van der Hoek, A. Smit and K.A. Zwart, 2006. Update of emission factors for direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils on the basis of measurements in the Netherlands . *Alterra Report 1217*, Alterra, Wageningen

Rochette, P., Worth, D. E., Lemke, R. L., McConkey, B. G., Pennock, D. J., Wagner-Riddle, C. and Desjardins, R. L. 2008. Estimation of N₂O emissions from agricultural soils in Canada. I. Development of a country-specific methodology. *Can.J. Soil. Sci.* 88 : 641-654

Smith, K. A., Dobbie, K. E., Thorman, R., Watson, C. J., Chadwick, D. R., Yamulki, S., & Ball, B. C. 2012. The effect of N fertilizer forms on nitrous oxide emissions from UK arable land and grassland. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 93(2), 127-149.

Stehfest, E., & Bouwman, L. (2006). N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 74(3), 207-228.

Philibert, A., Loyce, C., & Makowski, D. (2012). Quantifying uncertainties in N₂O emission due to N fertilizer application in cultivated areas. *PloS one*, 7(11), e50950.

Van Kessel C., Venterea R., Six J., Adviento-Borbe M.A., Linquist B., van Groenigen K.J. 2013. Climate, duration, and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems : a meta-analysis. *Glob. Change. Biol.* 19 :33-44.