

SEPT ANNEES DE MESURE D'EMISSIONS DE N₂O SUR SOLS CULTIVES

Yves PYTHON

Introduction

La nitrification et à la dénitrification de substrats azotés au niveau des sols agricoles sont à l'origine de la plupart des émissions de protoxyde d'azote (N₂O) mondiales d'origine humaine. Le N₂O participe ainsi à hauteur de 6 % aux émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) anthropiques mondiales (IPCC, 2014) et il représente à l'échelle nationale la moitié des émissions de GES du secteur agricole (CITEPA, 2014).

Le GIEC (IPCC, 2006) propose une méthode d'évaluation des émissions de N₂O par les sols basée sur un facteur d'émission égal à 1 % de l'azote apporté. Créée pour la réalisation des inventaires nationaux, cette méthode se révèle pertinente lorsqu'elle est utilisée à cette fin. Celle-ci présente toutefois des limites relatives à sa faible sensibilité aux pratiques culturales et aux conditions locales, ainsi qu'à son niveau d'incertitude important. Ces limites justifient un besoin de références locales.

Depuis 2006, la ferme expérimentale d'AgroParisTech est engagée dans le programme Grignon Energie Positive dont l'un des premiers objectifs est de réduire les impacts environnementaux de l'exploitation – en particulier ses émissions de GES – sans réduire sa marge économique et sa capacité nourricière (www.PerfAlim.com). Dans le cadre de ce projet, et pour évaluer plus précisément les impacts environnementaux, une dizaine de parcelles de la ferme ont fait l'objet d'un suivi des émissions de N₂O à l'aide de chambres manuelles statiques entre 2008 et 2014. L'originalité de ce dispositif de suivi réside dans la diversité des cultures et des types de fertilisants azotés mis en œuvre, dans l'importante durée du suivi (7 années) et dans le fait que les parcelles suivies étaient conduites selon des pratiques proches de celles d'exploitations commerciales. Les principaux enseignements tirés de ce dispositif de mesure original sont présentés ci-dessous.

1. Matériel & Méthode

1.1. Parcelles, cultures et fertilisation azotée

Sept à dix parcelles ont été instrumentées chaque année entre 2008 et 2014 pour la mesure des émissions de N₂O sur des cycles culturaux complets. Ces parcelles étaient toutes situées dans un rayon de 2 km autour de la ferme expérimentale d'AgroParisTech dans l'ouest parisien. Les sols rencontrés étaient de type limons profonds et argilo-calcaires superficiels. Une grande diversité de cultures ont été suivies : grandes cultures (blé, colza, triticale, escourgeon et orge de printemps), cultures fourragères (maïs et luzerne pure ou en mélange avec des graminées fourragères) et enfin cultures énergétiques (miscanthus et switchgrass).

Tableau 1 – Liste et effectifs de cycles culturaux représentés (*n*) pour les variables Parcelles, Cultures, Stratégies de fertilisation et Années – Il n'y a pas de liens entre les données d'une même ligne. Zéro N, Aucun apport azoté ; Min., Engrais minéraux seuls ; Fix (luzerne), Fixation symbiotique sur les parcelles contenant de la luzerne ; Div. org., Divers apports organiques.

Parcelles (<i>n</i>)	Cultures (<i>n</i>)	Stratégies de fertilisation (<i>n</i>)	Années (<i>n</i>)
F1 (9)	Maïs (12)	Engrais minéraux (Min.) (13)	2008 (6)
F2 (7)	Blé (8)	Div. org. + Min. (15)	2009 (7)
F3 (7)	Luzerne* (8)	Lisier (7)	2010 (8)
F4 (8)	Miscanthus (7)	Zéro N (16)	2011 (9)
F5 (3)	Switchgrass (7)	Fix (luzerne) (Fix.) (7)	2012 (9)
F6 (14)	Colza (6)	Div. org. + Fix. (1)	2013 (10)
F7 (1)	Triticale (4)		2014 (10)
F8 (5)	Escourgeon (4)		
F9 (2)	Orge de Print. (3)		
F10 (3)			

*Luzerne pure ou en mélange avec des graminées fourragères

La conduite des cultures a été assurée par la ferme expérimentale d'AgroParisTech et diverses stratégies de fertilisation azotée ont été adoptées avec différentes formes d'engrais minéraux (solution 39 et ammonitrate 27 principalement), différents types d'engrais de ferme (principalement des lisiers bovin mais aussi des fumiers bovin, ovin, caprin et équin ainsi que des composts de fumier), de la fixation symbiotique sur les parcelles contenant de la luzerne, des parcelles non fertilisées et des stratégies faisant intervenir 2 à 3 des sources précédemment citées.

Au total, le dispositif de suivi des émissions de N_2O a couvert 59 cycles culturaux complets sur 7 années, sur 10 parcelles différentes, avec 9 types de culture et 6 stratégies de fertilisation azotée représentées (Tableau 1).

1.2. Mesure des émissions de N_2O

1.2.1. Chambres manuelles statiques

Toutes les mesures d'émissions de N_2O ont été réalisées selon la méthode des chambres statiques manuelles. Les chambres sont des enceintes en aluminium ouvertes de 60 cm de côté par 30 cm de hauteur. Celles-ci ont été enfoncées dans la surface du sol au début de chaque campagne de mesure (Photo 1a) et n'ont été déplacées que lorsque des travaux le nécessitaient. Pendant la réalisation des mesures, les chambres étaient fermées de manière à ce que les gaz émis s'accumulent à l'intérieur (Photo 1b et 1c). Lorsque le développement du peuplement végétal était trop important pour pouvoir fermer les chambres, des rehausses d'une hauteur de 50 cm ont été positionnées sur les chambres avant leur fermeture (Photo 1c).



Photo 1 – Chambre manuelle statique en place sur colza : hors séance de mesure (a) et pendant séance de mesure sans (b) et avec rehausse (c). *Crédit photo Y. PYTHON.*

Au moment des mesures trois échantillons de gaz étaient prélevés à l'aide d'une seringue à l'intérieur de chacune des chambres et à des temps d'accumulation prédéfinis. Les trois temps d'accumulation étaient de (i) T1 au moment de la fermeture de la chambre, (ii) T2 après un temps d'accumulation de 15 minutes sans les rehausses et 30 minutes avec, et (iii) T3 après un temps d'accumulation de 30 minutes sans les rehausses et 60 minutes avec. Les échantillons étaient ensuite transférés dans des tubes préalablement mis sous vide en vue de leur analyse.

1.2.2. Analyse des échantillons et calcul des flux

L'analyse du contenu des échantillons gazeux a été réalisée par chromatographie en phase gazeuse afin de déterminer les concentrations en N_2O , en CH_4 et en CO_2 . Les détecteurs utilisés étaient de type ECD pour le N_2O et FID pour le CH_4 et le CO_2 . Les flux de N_2O ont ensuite été évalués à partir de la dynamique d'évolution des concentrations observée dans chaque chambre au moment de la mesure. Le calcul faisait en outre intervenir le volume des chambres et la loi des gaz parfaits.

1.2.3. Nombre de chambres par parcelle et fréquence d'échantillonnage

Dans la plupart des cas ($n = 43$ sur 59) chaque parcelle était équipée de 3 chambres. Pour les deux cultures énergétiques (miscanthus et switchgrass), ce ratio a été réduit à 2 chambres par parcelle à partir de 2010 ($n = 10$) en raison des faibles flux observés systématiquement sur ces cultures. Enfin, 5 chambres par parcelles ont parfois été installées ($n = 6$) pour répondre à des besoins spécifiques dans le cadre d'expérimentations.

La fréquence de réalisation des mesures a été adaptée en temps réel en fonction des itinéraires techniques de chaque culture et des conditions climatiques. Elle a varié entre une mesure tous les 4 jours pendant les périodes les plus propices aux émissions et une mesure par mois pendant les périodes les moins favorables. Sur l'ensemble des données, le temps moyen écoulé entre deux mesures d'émissions de N₂O a été de 17 jours.

1.3. Traitement des données

1.3.1. Estimation des flux cumulés à l'échelle des cycles culturels complets

Afin d'évaluer les flux cumulés à l'échelle des cycles culturels complets, une série d'interpolations linéaires a été appliquée à chacun des intervalles séparant deux dates de mesures effectives. Les courbes d'émissions obtenues par cette interpolation ont ensuite été intégrées selon la méthode des trapèzes et sur des durées correspondant aux cycles complets (i.e. de récolte à récolte pour les cultures annuelles et du 1^{er} janvier au 1^{er} janvier pour les cultures pluriannuelles).

1.3.2. Estimation des facteurs d'émissions

Le facteur d'émission de N₂O relatif à un cycle cultural (FE) – tel que définis dans la méthode d'évaluation des émissions de N₂O par les sols du GIEC (IPCC, 2006) – correspond à la fraction de l'azote d'origine anthropique apportée à la culture qui est perdue sous forme de N₂O durant ce cycle. Le calcul de cet indicateur nécessite de différencier les émissions de N₂O liées à la présence d'azote anthropique (ici les apports sous forme d'engrais et les résidus de la culture précédente) et les émissions de fond dont l'origine est autre. Ainsi la formule qui permet le calcul du facteur d'émission relatif à un cycle cultural C est telle que :

$$FE_C = \frac{N_2O_C - N_2O_{FOND}}{N_C}$$

Avec :

- FE_C – Facteur d'émission relatif au cycle C, en %
- N_2O_C – Emissions de N₂O cumulées au cours du cycle C, en kgN-N₂O.ha⁻¹
- N_2O_{FOND} – Emissions de N₂O de fond, en kgN-N₂O.ha⁻¹
- N_C – Quantité d'engrais et de résidus azotés apportés sur la parcelle au cours du cycle C, en kgN.ha⁻¹

Les émissions de N₂O de fond relatives à chaque cycle cultural considéré ont été évaluées sur la base des émissions mesurées sur les cultures énergétiques (miscanthus ou switchgrass) la même année. Dans la mesure où ces cultures ont été conduites sans aucun apport d'engrais azoté et dans un environnement (climat et sol) proche des autres cultures du suivi, les émissions de N₂O observées sources cultures énergétiques constituent des estimations fiables des émissions de fond.

Les quantités d'engrais et de résidus azotés apportés ont été évaluées au cas par cas sur la base des préconisations formulées dans la méthodologie du GIEC (IPCC, 2006). Ces préconisations ont notamment permis d'évaluer les résidus des cultures précédentes sur la base des rendements de celles-ci et en prenant en compte les différentes fractions exportées (grain, paille, menue paille).

Dans les cas des cultures non fertilisées ($n = 16$) et des parcelles avec luzerne ($n = 8$), le calcul de facteurs d'émissions se révèle impossible ou non pertinent car le dénominateur est nul. Ainsi sur les 59 cycles étudiés seulement 35 facteurs d'émissions ont été calculés.

2. Résultats & Discussions

Comme on l'observe dans le Tableau 1, la distribution relative des 59 cycles culturels étudiés est déséquilibrée entre les variables explicatives potentielles que sont les différentes stratégies de fertilisation, les années, les parcelles et les cultures. Les résultats exposés ici sont issus d'analyses simples (calculs de médianes, de moyennes et d'écart types) qui ne permettent pas de prendre en compte ces déséquilibres. Il convient donc de considérer ces résultats comme des tendances à confirmer par analyse statistique. Par ailleurs, il est important de rappeler que, comme dans la plupart des domaines touchant à l'agriculture, les émissions de N₂O sont très dépendantes du contexte (sol, climat, pratique) et qu'à ce titre, nos observations ne sont pas généralisables.

2.1. Résultats généraux

2.1.1. Flux médians

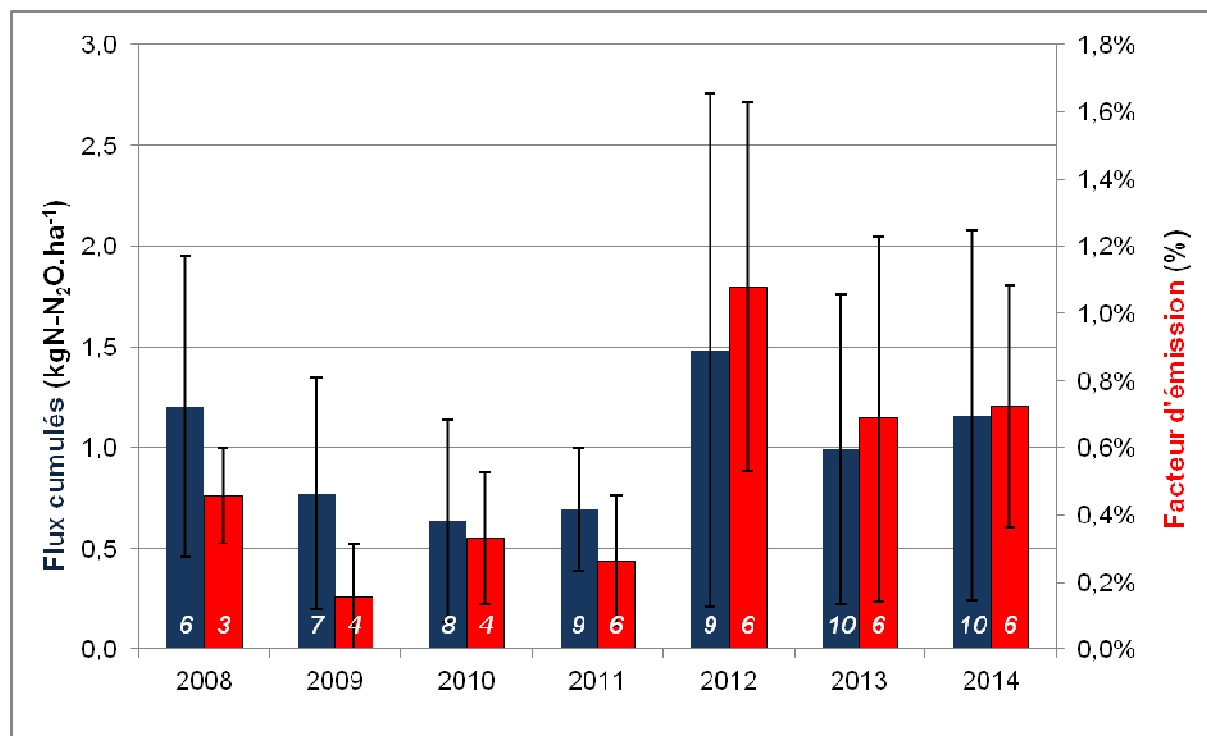
Le flux cumulé brut médian observé sur les 59 cycles culturaux est de $0,66 \text{ kgN-N}_2\text{O}\cdot\text{ha}^{-1}$ (moyenne de $1,00 \text{ kgN-N}_2\text{O}\cdot\text{ha}^{-1}$). Le plus petit flux a été observé en 2014 sur un miscanthus non fertilisé avec seulement $0,20 \text{ kgN-N}_2\text{O}\cdot\text{ha}^{-1}$ tandis qu'un flux maximum de $3,92 \text{ kgN-N}_2\text{O}\cdot\text{ha}^{-1}$ a été observé en 2012 sur un maïs fertilisé ayant reçu du lisier avant semis. Le FE médian ($n = 35$) est de $0,50 \%$ (moyenne de $0,57 \%$) avec un minimum de $0,02 \%$ observé sur une orge de printemps conduite en 2009 et n'ayant reçu que des engrais minéraux et un maximum de $1,92 \%$ observé sur le maïs conduit en 2012 avec lisier et déjà mentionné ci-dessus. Le FE médian observé dans notre contexte ($0,50 \%$) est d'une part cohérent avec la plage d'incertitude de $0,3$ à $3,00 \%$ proposée par le GIEC (IPCC, 2006) et il est, d'autre part, largement inférieur au facteur utilisé par défaut dans les inventaires (qui est de 1%).

2.1.2. Variabilité interannuelle

Le Graphique 1 ci-dessous représente les flux cumulés et les FE moyens par année. On y observe l'importance de la variabilité interannuelle des émissions de N_2O . Cette variabilité s'observe sur les flux cumulés avec un facteur 2 entre le flux annuel moyen le plus faible ($0,64 \text{ kgN-N}_2\text{O}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 2010) et le plus élevé ($1,49 \text{ kgN-N}_2\text{O}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 2012). La variabilité interannuelle est encore plus marquée en terme de facteurs d'émissions avec un facteur 7 entre le FE moyen le plus faible ($0,16 \%$ en 2009) et le plus élevé ($1,08 \%$ en 2012).

Cette forte variabilité est une caractéristique connue des émissions de N_2O . Elle s'explique en grande partie par les effets du climat et en particulier des précipitations, aussi bien en termes de quantités de pluie qu'en termes de distribution temporelle des épisodes pluvieux. L'importance de cette variabilité souligne fortement l'intérêt de la mise en œuvre de suivies pluriannuels.

Graphique 1 – Flux cumulés et FE moyens par année – Les barres d'erreur représentent des écarts types et les effectifs (n) sont donnés par les chiffres blancs dans les barres d'histogramme.



2.1.3. Cas des cultures énergétiques

Chaque année, les flux observés sur cultures énergétiques ont été les plus faibles. Ainsi sur les 7 années la moyenne des flux annuels mesurés sur miscanthus et switchgrass est de

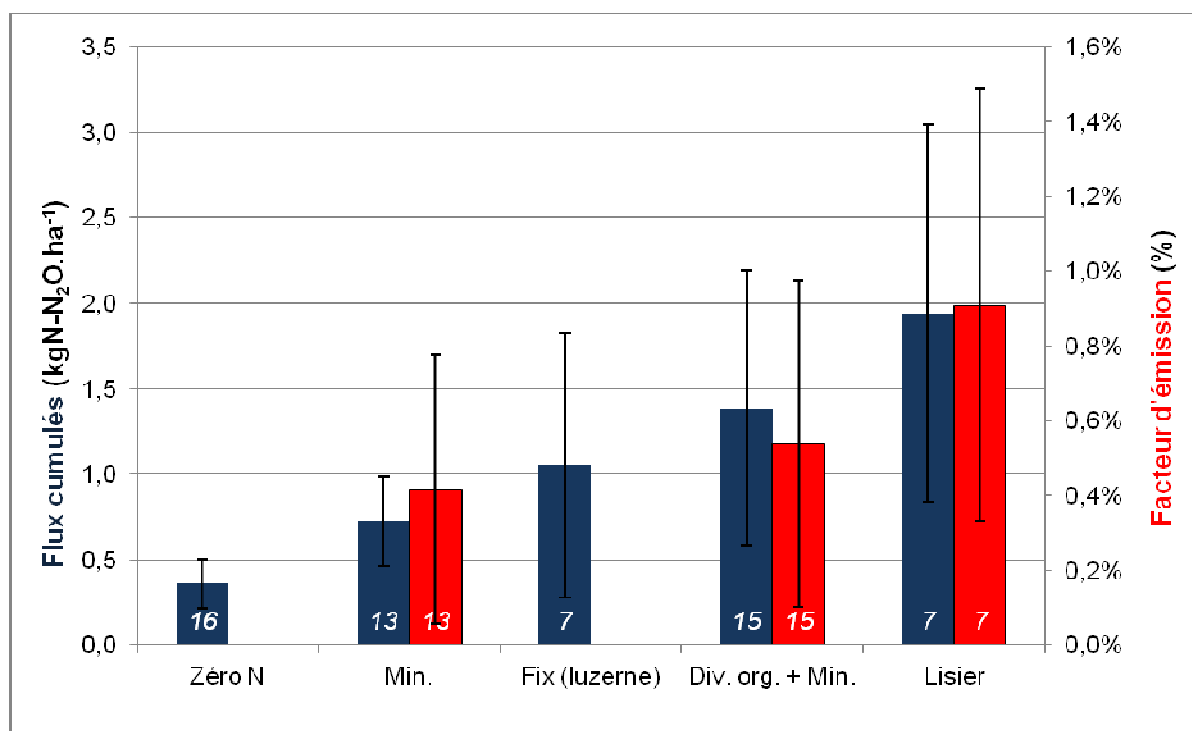
0,34 kgN-N₂O.ha⁻¹. Ces faibles flux s'expliquent par l'absence de fertilisation sur ces cultures et ils confirment la pertinence de l'utilisation de celles-ci pour estimer les émissions de fond dans le calcul des facteurs d'émissions (cf. § 1.2.3).

2.2. Effets de la forme de l'azote apporté

2.2.1. Effets généraux

Le Graphique 2 ci-dessous représente les flux cumulés et les FE moyens par type d'azote. Les barres d'erreurs du graphique montrent l'importance de la variabilité des observations pour un même type d'apport. Des tendances se dégagent malgré cette importante variabilité. On observe tout d'abord que les parcelles non fertilisées ont émis moins de N₂O que les autres avec seulement 0,36 kgN-N₂O.ha⁻¹ en moyenne. Des différences apparaissent également entre les différentes formes avec, pour les flux cumulés **Lisier > Div. org. + Min > Fix. > Min.** et un ordre identique pour les FE (avec la catégorie **Fix.** en moins) **Lisier > Div. org. + Min. > Min.**

Graphique 2 – Flux cumulés et FE moyens par type d'apports azotés – Les barres d'erreur représentent des écarts types et les effectifs (*n*) sont donnés par les chiffres blancs dans les barres d'histogramme. Zéro N, Aucun apport azoté ; Min., Engrais minéraux seuls ; Fix (luzerne), Fixation symbiotique sur les parcelles contenant de la luzerne ; Div. org., Divers apports organiques. La catégorie *Div. Org + Fix* (cf. Tableau 1) n'est pas représentée pour cause d'effectif trop faible (*n* = 1).



2.2.2. Formes organiques vs formes minérales

Dans notre contexte, les engrais d'origine organique, et en particulier les lisiers, ont été à l'origine d'émissions plus importantes que les engrais minéraux seuls. Les différences d'émissions moyennes observées entre les catégories lisiers purs et engrais minéraux seuls sont relativement fortes avec 2 fois plus de N₂O cumulé et un FE 2 fois plus important pour les lisiers purs. Des flux plus importants pour des apports organiques en comparaison à des formes minérales sont fréquemment mentionnés dans la bibliographie (Kaiser et Ruser, 2000 ; Bouwman et al., 2002) cependant des observations contradictoires ont également été rapportées (Chantigny et al., 2010 ; Pelster et al., 2012) et en définitive les effets de la forme de l'azote sont probablement conditionnés par les conditions locales de sol et/ou de climat.

2.2.3. Le cas de la fixation symbiotique de la luzerne

La présence de luzerne semble avoir entraîné une augmentation des émissions par rapport à l'absence d'apport. Ainsi le flux cumulé moyen observé avec luzerne est de $1,05 \text{ kgN-N}_2\text{O}\cdot\text{ha}^{-1}$ contre $0,36$ sur les parcelles sans apports. Ce résultat peut paraître surprenant pour deux raisons. Tout d'abord il est en contradiction avec la méthodologie du GIEC (IPCC, 2006) selon laquelle seuls les résidus de cultures générés après destruction du peuplement sont à l'origine d'émissions de N_2O dans le cas de légumineuses non fertilisées (en conséquence de quoi les émissions relatives à une légumineuse pérenne sont considérées comme nulles tant que la culture est en place). Deuxièmement d'autres études rapportent des niveaux d'émissions de N_2O sur légumineuses comparables à ceux de cultures non fertilisées (Jeuffroy et al., 2013) ou inférieurs à ceux observés sur des cultures ayant reçu des apports minéraux (Schwenke et al., 2015).

Toutefois, les effets des cultures légumineuses sur les émissions de N_2O des sols sont encore assez mal connus et certaines études laissent à penser que la luzerne pourrait être à l'origine de flux plus importants que d'autres légumineuses annuelles. Ainsi dans une revue bibliographique synthétisant 79 mesures de N_2O sur de nombreuses légumineuses, Rochette et Janzen (2005) rapportent les flux les plus importants pour la luzerne. De plus, sur les 14 mesures conduites sur luzerne et rapportées par ces auteurs, le flux de N_2O moyen est supérieur à nos observations avec $1,99 \text{ kgN-N}_2\text{O}\cdot\text{ha}^{-1}$.

3. Conclusions

Cet article synthétise des mesures d'émissions de N_2O réalisées sur des parcelles cultivées en région parisienne selon des pratiques proches de celles d'exploitations commerciales et ce durant 59 cycles culturaux répartis sur 7 années. Des flux de N_2O relativement faibles ont été observés avec un facteur d'émission médian de $0,50 \%$ ce qui est 2 fois inférieur à la référence de 1% du GIEC (IPCC, 2006). Par ailleurs une forte variabilité interannuelle des phénomènes d'émissions a pu être mise en avant grâce au caractère « longue durée » (7 ans) du dispositif. Ainsi le FE annuel moyen le plus grand ($1,08 \%$ en 2012) est 7 fois plus important que le plus faible ($0,16 \%$ en 2009). Enfin des tendances ont été dégagées quand aux effets des formes d'azote sur les émissions.

Premièrement les résultats indiquent des émissions accrues par l'usage d'engrais d'origine organique (principalement lisier bovin ici) par rapport à des engrais minéraux. La différence observée entre les deux types d'engrais est importante avec des émissions moyennes sur lisiers purs 2 fois plus fortes que sur engrais minéraux seuls. Malgré ces différences, il faut souligner d'une part que les émissions observées sur engrais organiques restent plus faibles que la référence de 1% du GIEC (IPCC, 2006) (FE moyen sur lisier de $0,91 \%$) et d'autre part que le recyclage de l'azote via les effluents d'élevage peut être à l'origine d'importants bénéfices environnementaux. Deuxièmement les mesures réalisées sur luzerne montrent des niveaux d'émissions plus forts que ceux observés sur les cultures non fertilisées. Sans remettre en question les avantages environnementaux de la luzerne, ce résultat peut paraître surprenant et il souligne la nécessité de poursuivre les recherches relatives aux émissions de N_2O par les légumineuses en générales et par la luzerne en particulier.

D'autres mesures d'émissions de N_2O non présentées ici ont été réalisées sur les parcelles de la ferme expérimentale d'AgroParisTech durant la période étudiée. Ajoutées aux nôtres, ces données – réalisées par l'UMR AgroParisTech EcoSys ou provenant du réseau de mesure NOGAS – ont permis de construire une base couvrant 78 cycles culturaux. Une analyse statistique de cette base de données a été réalisée et fera l'objet d'une publication scientifique en cours de rédaction.

Références bibliographiques

Bouwman et al., 2002. Bouwman, A.F., Boumans, L.J.M., Batjes, N.H., 2002. Emissions of N_2O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. Glob. Biogeochem. Cycles 16, 1058.

Chantigny et al., 2010. Chantigny, M.H., Rochette, P., Angers, D.A., Bittman, S., Buckley, K., Massé, D., Bélanger, G., Eriksen-Hamel, N., Gasser, M.-O., 2010. Soil nitrous oxide emissions following band-incorporation of fertilizer nitrogen and swine manure. J. Environ. Qual. 39, 1545–1553.

CITEPA, 2014. CITEPA, 2014. Rapport National d'Inventaire pour la France au titre de la Convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques et du Protocole de Kyoto - Rapport CCNUCC. CITEPA, France.

IPCC 2006. IPCC, 2006. In Egglestone, et al. (Eds.), Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IGES, Japan.

IPCC, 2014. IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report (No. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). IPCC, Geneva, Switzerland.

Jeuffroy et al., 2013. Jeuffroy, M.H., Baranger, E., Carrouée, B., de Chezelles, E., Gosme, M., Hénault, C., Schneider, A., Cellier, P., 2013. Nitrous oxide emissions from crop rotations including wheat, oilseed rape and dry peas. *Biogeosciences* 10, 1787–1797.

Kaiser et Ruser, 2000. Kaiser, E.-A., Ruser, R., 2000. Nitrous oxide emissions from arable soils in Germany — An evaluation of six long-term field experiments. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, 249–259.

Pelster et al., 2012. Pelster, D.E., Chantigny, M.H., Rochette, P., Angers, D.A., Rieux, C., Vanasse, A., 2012. Nitrous Oxide Emissions Respond Differently to Mineral and Organic Nitrogen Sources in Contrasting Soil Types. *J. Environ. Qual.* 41, 427.

Rochette et Janzen, 2005. Rochette, P., Janzen, H.H., 2005. Towards a Revised Coefficient for Estimating N₂O Emissions from Legumes. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 73, 171–179.

Schwenke et al., 2015. Schwenke, G.D., Herridge, D.F., Scheer, C., Rowlings, D.W., Haigh, B.M., McMullen, K.G., 2015. Soil N₂O emissions under N₂-fixing legumes and N-fertilised canola: A reappraisal of emissions factor calculations. *Agric. Ecosyst. Environ.* 202, 232–242.