Le protoxyde d'azote (N₂O), puissant gaz à effet de serre émis par les sols agricoles : méthodes d'inventaire et leviers de réduction

Amélie VIARD¹
Catherine HÉNAULT²
Philippe ROCHETTE³
Peter KUIKMAN⁴
Francis FLÉNET⁵
Pierre CELLIER⁶

¹ UMT GES-N₂O ;
CETIOM,
avenue Lucien Brétignières,
78850 Thiverval-Grignon,
France
<amelie.viard@gmail.com>

² INRA,
Unité de Science du Sol,
2163 avenue de la Pomme de Pin,
CS 40001 Ardon,
45075 Orléans Cedex 2,
France

³ Agriculture and Agri-food Canada,
2560 Hochelaga Blvd,
Quebec,
Quebec G1V 2J3,
Canada

⁴ Alterra Wageningen UR,
Droevendaalsesteeg 4,
6708PB Wageningen,
Pays-Bas

⁵ Département des Etudes
Opérationnelles,
CETIOM,
Avenue Lucien Brétignières,
78850 Thiverval-Grignon,
France

⁶ INRA,
Unité Mixte de Recherche INRA/
AgroParisTech "Environnement et
Grandes Cultures",
78850 Thiverval-Grignon,
France

Abstract: Nitrous oxide (N₂O), a greenhouse gas emitted from agricultural soils: emission inventories and mitigation pathways

Nitrous oxide (N₂O) is a greenhouse gas that mainly originates from soils and agricultural activities. International initiatives require that countries calculate national inventories of their N₂O emissions from agricultural soils. Several methodologies can be applied: (i) Tier I Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) default approach that only takes into account nitrogen (N) input, (ii) Country-specific methodologies (Tier II and Tier III) that account for regional climatic and land use impacts on N₂O emission factors, and include several sources. Strategies to mitigate N₂O emissions from agricultural soils are based on a rational use of N resource and the stimulation of soil aerobic conditions and biological activity. Management practices to reduce the N₂O emissions should be focused on: (i) Avoiding the soil denitrification process by maximizing soil aeration and reducing their acidity, (ii) Improving N fertilization by reducing free N in soil and optimizing N use efficiency in cropping systems, (iii) Direct actions on the microbial processes by limiting the nitrification process and stimulating the last step of the denitrification process (N₂O reduction to N₂).

Key words: nitrous oxide, greenhouse gas, agricultural soils, emission inventories, mitigation pathways

Le N₂O, un gaz à effet de serre principalement d'origine agricole

Lors du Grenelle de l'Environnement en 2007, la France s'est engagée à se placer sur une trajectoire de division par quatre de ses émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2050. Parmi tous les GES responsables du changement climatique, le protoxyde d'azote (N₂O) possède un très fort pouvoir radiatif, de l'ordre de 300 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone (CO₂). En France, les émissions de N₂O représentent 15 % de la contribution au réchauffement global, ce qui fait du N₂O le second GES après le CO₂. Avec plus des trois quarts des émissions de N₂O (figure 1), l'agriculture incarne le premier secteur producteur de ce gaz (CITEPA,

2011a). Pour les filières végétales, l'enjeu est particulièrement important puisque le N₂O est souvent le principal GES de la production agricole. Il représente par exemple 57 % des émissions totales de GES de la culture de colza, du semis à la récolte (CETIOM, 2013). Suite à la directive européenne sur les énergies renouvelables, les filières végétales, et notamment la filière oléagineuse, doivent faire face aux controverses sur les bilans GES des biocarburants de première génération et anticiper la révision future des seuils d'émission, ce qui souligne l'importance du N₂O comme levier pour améliorer les bilans. Par ailleurs, le N₂O est aussi la principale substance responsable de la destruction de la couche d'ozone stratosphérique. Pour répondre aux engagements du Grenelle, l'agriculture a donc un

Article reçu le 7 janvier 2013
Accepté le 6 février 2013

Pour citer cet article : Viard A, Hénault C, Rochette P, Kuikman P, Flénet F, Cellier P. Le protoxyde d'azote (N₂O), puissant gaz à effet de serre émis par les sols agricoles : méthodes d'inventaire et leviers de réduction. OCL 2013 ; 20(2) : 108-118. doi : 10.1684/ocl.2013.0501

Figure 1. Émissions atmosphériques de N₂O par secteur en France métropolitaine (CITEPA, 2011b).

rôle majeur à jouer vis-à-vis des attentes sociétales de lutte contre le changement climatique.

Les émissions de N₂O provenant des sols agricoles ont pour origine les processus microbiens et sont attribuées à la transformation de l'azote minéral des sols. Pour les sols cultivés, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) considère que les émissions de N₂O sont proportionnelles à la quantité d'azote apporté à la parcelle, à hauteur de 1 % (GIEC, 2006). Cette méthode d'inventaire, actuellement appliquée en France, considère donc un lien grossier entre les émissions de N₂O et la fertilisation azotée. Elle relève toutefois d'une vision réductrice car elle suppose que le seul facteur de variation des émissions, donc la seule manière de réduire les émissions de N₂O par les sols agricoles, est de diminuer la quantité

d'engrais azoté apporté à la parcelle. Or, de nombreux travaux de recherche français et étrangers ont mis en évidence l'existence d'autres leviers susceptibles de moduler les émissions de N₂O, pouvant être considérés comme autant de voies de progrès pour les réduire. Ces leviers relèvent de solutions agronomiques ou font appel au génie microbiologique.

Après une présentation des processus responsables de la production de N₂O par les sols, cet article de synthèse propose de recenser les méthodes de calculs pouvant être élaborées pour estimer les émissions de N₂O des sols agricoles. Les leviers de réduction des émissions de N₂O, identifiés par les travaux de recherche, seront ensuite examinés en se basant sur une analyse des processus sous-jacents. Un diagnostic de leur pertinence et de leur applicabilité sera également réalisé afin

de déterminer leur degré de faisabilité actuelle ou future, et les freins à leur mise en œuvre.

Processus et facteurs à l'origine de la production de N₂O par les sols

La production et la consommation de N₂O par les sols sont des phénomènes naturels, ayant pour origine des processus impliquant les micro-organismes du sol. Les deux principaux processus microbiens à l'origine de la production et de la consommation de N₂O sont la nitrification et la dénitrification (figure 2) :

- la nitrification est l'oxydation biologique de l'ammonium (NH₄⁺) en nitrite (NO₂⁻) puis en nitrate (NO₃⁻). Cette réaction est favorisée en milieu aérobie et son rendement en N₂O est faible car ce gaz est un coproduit de la réaction ;
- la dénitrification est un processus respiratoire au cours duquel les formes solubles de l'azote (nitrate NO₃⁻, nitrite NO₂⁻) sont réduites en composés gazeux (oxyde nitrique NO, protoxyde d'azote N₂O et azote gazeux N₂). La dénitrification se produit surtout en milieu anaérobie et augmente avec la teneur en nitrate. Son rendement en N₂O est élevé car ce gaz est un produit intermédiaire de la transformation. Lorsque la transformation est complète, elle conduit à la formation de N₂, donc à l'élimination sans transfert de pollution des formes solubles de l'azote. En revanche, si le processus de dénitrification est incomplet, du N₂O est libéré dans l'atmosphère.

Bien que les sols puissent fonctionner tour à tour comme source ou puits de N₂O, à l'échelle globale, la production de N₂O est supérieure à sa consommation. Dans les sols agricoles, les émissions de N₂O sont majoritairement attribuées au processus incomplet de dénitrification, lorsque l'aération du sol est imparfaite.

Les émissions de N₂O dépendent d'interactions complexes entre le sol, le climat et les modes de gestion des cultures, où interagissent des facteurs biologiques et physico-chimiques qui influencent les processus microbiens (figure 3). Les principaux facteurs déterminant la production de N₂O sont

Figure 2. Processus microbiens à l'origine de la production de N_2O dans les sols (d'après P. Cellier, INRA UMR EGC).

liés aux conditions physiques et physico-chimiques du sol (texture, physico-chimie, densité, matière organique), au climat (température, précipitations) et aux pratiques culturales (travail du

sol, fertilisation, irrigation, etc.), et correspondent aux facteurs distants. Ils interviennent en modifiant les facteurs proximaux, c'est-à-dire les facteurs environnementaux (température, humidité,

Figure 3. Facteurs déterminant la production de N_2O par les sols (d'après P. Rochette, Agriculture et Agroalimentaire, Canada).

pH, potentiel d'oxydo-réduction) et le substrat des réactions microbiennes (carbone, azote). Par conséquent, toutes les pratiques culturales pouvant faire varier un ou plusieurs de ces paramètres sont susceptibles d'influencer significativement les émissions de N_2O .

Les émissions de N_2O sont sujettes à une grande variabilité, quelle que soit l'échelle spatiale ou temporelle considérée :

- la variabilité spatiale (figure 4) : entre deux points de mesure situés à quelques centimètres d'écart, les émissions peuvent varier d'un facteur 10 à 100 ;
- la variabilité temporelle (figure 5) : des fluctuations des émissions peuvent être observées à l'échelle de la journée, du mois, de la saison et de l'année.

Les méthodes de calcul pour estimer les émissions de N_2O des sols agricoles

Face au changement climatique, l'obligation de réduire les émissions de GES se traduit par des politiques réglementaires appliquées à tous les secteurs d'activité, dont l'agriculture, à l'échelle européenne. L'incitation à contrôler et diminuer les émissions de GES nécessite, au préalable, d'être en mesure d'estimer les émissions. Pour cela, le GIEC a défini des règles de calcul des émissions de N_2O à l'échelle de chaque pays, nécessitant d'établir une liste exhaustive des sources d'émission et d'estimer des facteurs d'émission pour chacune d'elles. Trois méthodes d'inventaire peuvent être mises en œuvre (niveau 1, niveau 2 ou niveau 3), différant par la prise en compte des facteurs agissant sur les émissions. Le passage d'un niveau de la méthode à un niveau supérieur nécessite une augmentation de la quantité des données requises mais permet d'affiner la précision des estimations (figure 6).

La méthode de niveau 1 du GIEC

La méthode de niveau 1 du GIEC est la méthode actuellement utilisée en France, comme dans la grande majorité des pays, pour estimer les émissions de N_2O par les cultures. Elle prend en considération uniquement la quantité d'azote apportée à la parcelle comme facteur régissant les émissions de N_2O , que cet azote soit minéral, organique ou

Figure 4. Variabilité spatiale des émissions de N_2O (Mathieu et al., 2008).

lié aux résidus de culture. Le facteur d'émission directe de N_2O proposé par le GIEC, c'est-à-dire à l'échelle des parcelles qui reçoivent des apports anthropiques d'azote, est unique à

l'échelle mondiale. Il s'élève à 1 % (0,01 kg $N-N_2O$ par kg N apporté), avec un intervalle de confiance de 0,003 à 0,03 (GIEC, 2006). Cela signifie que l'azote apporté à la parcelle fera l'objet d'une

perte par voie gazeuse, sous forme de N_2O , à hauteur de 1 % de la quantité apportée. Par exemple, pour 100 kg d'azote apporté par hectare, les pertes de N_2O s'élèveront à 1 kg $N-N_2O$.

Bien que la méthode de niveau 1 soit considérée comme applicable à tous les pays, elle présente de nombreuses limites :

i) Tout d'abord, le facteur d'émission utilisé est commun à tous les pays du monde et ne tient donc pas compte des spécificités du climat, des sols et des pratiques de l'agriculture française, ce qui conduit à des résultats très imprécis et peu représentatifs des conditions françaises (exemple des conditions sèches du pourtour méditerranéen). Dans l'inventaire des émissions de GES en France de 1990 à 2009, le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA) a ainsi mis en évidence que les émissions de N_2O par les sols agricoles, calculées par la méthode de niveau 1 du GIEC, présentent l'incertitude la plus élevée de l'inventaire, toutes catégories confondues (CITEPA, 2011a) :

ii) le facteur d'émission de 1 % considère une relation linéaire entre les émissions de N_2O et l'azote apporté, ce qui n'est pas toujours le cas. En effet, des études ont démontré que les émissions de N_2O augmentent plus rapidement lorsque l'azote est apporté en excès par rapport aux besoins des cultures, la relation prenant alors une forme exponentielle plutôt que linéaire (Van Groenigen *et al.*, 2010 ; Philibert *et al.*, 2012). Cet effet n'est pas pris en compte dans la méthode de niveau 1 alors qu'il semble être responsable de la majorité des émissions de N_2O en Europe (Lesschen *et al.*, 2009) ;

iii) la méthode de niveau 1 considère que les engrais azotés possèdent tous le même facteur d'émission de 1 %, indépendamment de leur provenance (minérale ou organique), de leur forme (liquide ou granulaire) et de leur composition (nitrique, ammoniacale, uréique). Cependant, selon le type d'engrais appliqué, la fraction d'azote minéral directement disponible dans le sol et impliquée dans la production de N_2O est variable. Cet effet n'est pas pris en compte dans les méthodes d'inventaire.

Enfin, la valeur calculée avec la méthode de niveau 1 ne dépend que de la quantité d'azote reçue à la parcelle. En

Figure 5. Variabilité temporelle des émissions de N_2O (d'après Laville et al., 1997).

Figure 6. Les différentes méthodes d'inventaire d'émission de gaz à effet de serre proposées par le GIEC (d'après GIEC, 2006).

conséquence, avec une telle approche, la seule voie envisageable de réduction de l'émission de N_2O est de réduire la fertilisation azotée en diminuant la quantité d'engrais épandu. Les autres facteurs influençant les émissions, c'est-à-dire les caractéristiques du sol, le type de climat et les pratiques culturales (travail du sol, modalités d'application de l'engrais, forme d'azote, dates d'apports, etc.), ne sont pas pris en compte alors qu'ils pourraient constituer des leviers pour réduire les émissions et faire prendre en compte ces réductions dans l'effort national de maîtrise des émissions de GES.

La méthode de niveau 2 du GIEC

La méthode de niveau 2 du GIEC (2006) consiste à adapter les facteurs d'émission aux conditions de chaque pays grâce à une approche statistique basée sur des références locales. Elle se caractérise par la prise en compte d'autres facteurs que la seule quantité d'azote apporté, par exemple le type de climat, le type de sol ou les pratiques culturales. Les facteurs d'émission retenus sont ensuite déclinés à une échelle régionale. La méthode de niveau 2 présente comme principal avantage de donner une vision plus complète et plus réaliste des sources d'émission et de leur variabilité et conduit à une estimation plus précise et robuste des émissions de N_2O . Elle nécessite cependant de pouvoir justifier de mesures ayant une représentativité et une signification statistique bien établie, et passe par l'acquisition de références expérimentales propres au pays désireux de développer la méthode.

Une telle adaptation a été réalisée au Canada pour l'émission directe de N_2O . La méthode mise au point dans ce pays calcule un coefficient d'émission directe en fonction du ratio entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle, de la texture du sol et de la topographie. Ce coefficient permet de calculer une émission directe de N_2O moyenne, qui est ensuite corrigée par l'effet d'autres facteurs qui sont le travail du sol, l'irrigation, la gestion estivale de la parcelle (jachère ou non), les déjections des animaux domestiques et l'effet des sols organiques. Selon les régions, les facteurs d'émission varient de 0,2 à 1,7 % et sont étroitement liés au climat. Le potentiel de réduction varie donc en fonction des régions et est le plus élevé sur les sols argileux à forte pluviométrie. Au Canada, cette méthode de niveau 2 a été utilisée pour réaliser l'inventaire des émissions de N_2O par les sols agricoles de 1990 à 2005. Pour cette période, Rochette *et al.* (2008a) ont ainsi estimé que les émissions directes de N_2O des sols agricoles s'établissaient en moyenne à 39,3 Gg de $N-N_2O$ par année. Cette valeur est inférieure de 19 % à celle calculée par la méthode de niveau 1 du GIEC pour la même période.

La méthode de niveau 3 du GIEC

Pour affiner l'estimation des émissions en fonction des pédoclimats et des pratiques agricoles, le GIEC (2006) propose également la possibilité d'utiliser une méthode dite de niveau 3, consistant à utiliser un modèle de simulation des émissions de N_2O . Pour

être reconnus, les modèles doivent être testés et validés dans les conditions pédoclimatiques et d'agriculture du pays souhaitant appliquer la méthode. Tout comme la méthode de niveau 2, la méthode de niveau 3 nécessite de disposer de mesures d'émissions spécifiques et représentatives de la réalité agricole du pays pour valider le modèle proposé, condition indispensable à la reconnaissance de la méthode.

En France, plusieurs modèles ont été développés par des équipes de recherche, intégrant les connaissances des processus biologiques impliqués dans les émissions de N_2O . Ces modèles, couplés à des systèmes d'information géographique, permettraient d'obtenir des inventaires plus précis que ceux obtenus avec les méthodes de niveaux 1 et 2. Toutefois, les modèles actuellement disponibles sont considérés comme inadaptés pour être mis en œuvre par les organismes en charge de réaliser les inventaires.

Les leviers de réduction des émissions de N_2O

Les émissions de N_2O relèvent d'un phénomène naturel, et ne pourront à ce titre jamais être totalement éliminées. Néanmoins, leur intensité peut être atténuée grâce à la mise en œuvre de pratiques spécifiques. Certains leviers sont connus pour moduler les flux de N_2O en agissant sur une ou plusieurs des variables contrôlant les processus microbiens à l'origine des émissions, notamment la part de l'azote dénitrifié émis sous forme de N_2O . En général, les pratiques culturales réduisant les émissions de N_2O ciblent majoritairement la dénitrification car son rendement en N_2O est plus élevé. Trois grands types de leviers existent, relevant de solutions agronomiques ou faisant appel au génie microbiologique : 1) les pratiques culturales favorisant l'aération du sol, 2) les pratiques culturales permettant une meilleure gestion de l'azote, 3) les pratiques influençant le fonctionnement des processus microbiens. Certaines pratiques ont déjà prouvé leur efficacité en conditions réelles et sont même déjà partiellement appliquées dans certains pays. D'autres, qualifiées de « futuristes », sont considérées comme très prometteuses mais sont encore à l'étude. C'est notamment le cas des pratiques agissant sur les processus microbiens.

Pratiques culturales favorisant l'aération du sol

Les pics d'émissions de N_2O sont toujours reliés à l'apparition de conditions d'anaérobiose dans le sol, c'est-à-dire lorsque le milieu s'appauvrit en oxygène, et que le processus de dénitrification devient majoritaire. Pour limiter l'activité de dénitrification et diminuer le risque d'émission de N_2O , il est donc important de favoriser l'aération du sol, en évitant les conditions compactantes et en limitant l'engorgement des sols. Différents facteurs influencent l'aération du sol :

Le drainage et l'irrigation

Une teneur en eau du sol élevée engendre des conditions d'anaérobiose propices aux fortes émissions de N_2O . Lorsque la porosité du sol occupée par l'eau dépasse le seuil de 50 à 60 %, l'eau limite la diffusion de l'oxygène dans le sol, ce qui stimule la production de N_2O (Linn et Doran, 1984). Pour éviter les situations où l'aération du sol est déficiente, il est donc important d'éviter l'engorgement en eau en modérant l'irrigation ou encore en drainant les parcelles.

Le travail du sol

L'adoption du semis direct a des effets antagonistes sur les émissions de N_2O .

D'une part, en limitant l'incorporation des résidus et donc la quantité d'azote minéral dans le sol, le semis direct aurait tendance à diminuer les émissions. D'autre part, en augmentant la teneur en eau du sol et le tassement, il stimulerait les émissions.

Pour statuer sur l'adoption du semis direct comme levier pour réduire les émissions de N_2O , il est donc nécessaire de prendre en compte les facteurs conditionnant sa performance, à savoir le niveau d'aération et l'ancienneté du système :

- Des travaux ont montré qu'il existerait des interactions entre le travail du sol et l'aération du sol. Rochette (2008b) a ainsi mis en évidence que, dans un sol naturellement bien aéré (texture sableuse, par exemple), le semis direct serait à privilégier pour réduire les émissions de N_2O ; à l'inverse, dans un sol mal aéré, le labour présenterait une meilleure efficacité (figure 7) ;
- Les effets du semis direct dépendent également de la durée d'adoption de cette technique. Les systèmes anciens présentent une meilleure aération du sol par rapport aux systèmes labourés, grâce à une augmentation de l'activité biologique du sol. L'effet bénéfique du

semis direct serait donc davantage marqué à long terme (Six *et al.*, 2004).

Le machinisme agricole

Pour limiter les émissions de N_2O , il est nécessaire de limiter les conditions compactantes et entretenir un sol bien aéré. De manière générale, les travaux agricoles limitant le tassement du sol sont à privilégier (diminution du nombre de passages d'engins, choix de pneumatique adapté).

En conclusion, les émissions élevées de N_2O sont généralement observées dans les sols lourds à texture fine, comme les sols argileux (Gregorich *et al.*, 2005). Dans ce type de sol où l'aération est mauvaise, il faut veiller à réduire la compaction et privilégier les pratiques culturales favorisant l'aération du sol.

Pratiques culturales permettant une meilleure gestion de l'azote

Dans les écosystèmes naturels, les émissions de N_2O sont généralement faibles car l'azote minéral libre est un facteur limitant. Dans les sols agricoles, l'azote synthétique est ajouté en quantité importante pour favoriser la production végétale, ce qui stimule les émissions de N_2O . Pour diminuer ces émissions, la gestion de la fertilisation azotée doit être améliorée à l'échelle de la parcelle. Les solutions pour réduire l'impact de la fertilisation azotée sur le N_2O sont donc agronomiques. Différents leviers existent :

L'ajustement de la fertilisation azotée aux besoins de la culture

La méthode d'inventaire de niveau 1 du GIEC part du constat bien connu que la fertilisation azotée stimule les émissions de N_2O . Autrement dit, une diminution des apports azotés conduit systématiquement à une diminution des émissions de N_2O . Cependant, comme vu précédemment, cet effet n'est pas toujours linéaire et est d'autant plus marqué que l'azote est apporté en excès par rapport aux besoins des plantes. À l'inverse, une sous-fertilisation n'est pas plus efficace pour limiter l'émission de N_2O , et présente donc peu d'intérêt (Van Groenigen *et al.*, 2010). En conséquence, le meilleur moyen pour réduire les émissions de N_2O est d'ajuster la fertilisation azotée aux stricts besoins de la culture, ce qui rejoint les pratiques visant une meilleure efficacité d'utilisation de l'azote. Partant de ce constat,

Figure 7. Ratio moyen d'émission de N_2O cumulée entre un sol en semis direct et un sol labouré, en fonction de l'aération du sol (Rochette, 2008b).

Van Groenigen *et al.* (2010) suggèrent qu'il serait plus pertinent d'exprimer les émissions de N_2O comme fonction de l'absorption d'N par la culture ou du rendement, plutôt que fonction de l'application d'engrais par hectare emblavé, comme l'imposent les méthodes actuelles du GIEC. Ces dernières visent uniquement à réduire le taux d'application d'engrais azoté pour diminuer les émissions de N_2O , mais les pratiques devraient avant tout maximiser l'absorption d'azote par les plantes pour être efficaces. Pour raisonner les apports d'azote aux besoins de la culture, un suivi en temps réel de la culture et des paramètres du sol est recommandé (analyses de sol et de plantes, apports localisés d'azote).

Le choix de l'engrais azoté

Le choix de l'engrais azoté peut avoir une influence sur les émissions de N_2O , de par sa forme et sa composition. Cependant, il est difficile de généraliser son effet en raison de la grande variation de la composition des engrais minéraux et organiques, et par l'existence d'interactions avec le type de sol :

i) Forme minérale ou organique : Les formes organique et minérale ont souvent des effets contrastés sur les émissions de N_2O à l'hectare mais, lorsque cette évaluation est ramenée à une unité de rendement, aucune différence ne subsiste (Carter et Chirinda, 2009). L'engrais azoté appliqué sous forme organique, en se décomposant dans le sol, engendre une augmentation de la disponibilité en azote minéral à des échelles de temps variables. Ce décalage temporel entre la fourniture d'azote minéral (par exemple juste après les apports ou lors de la décomposition des résidus) et le besoin de la plante en azote peut augmenter le risque d'émission de N_2O . Pour éviter les émissions, le principal levier est donc d'ajuster la fourniture d'azote avec les prélèvements effectués par la plante.

ii) La composition de l'engrais : La composition de l'engrais en fractions nitrique, ammoniacale et uréique peut faire varier les émissions de N_2O . Cependant, aucune tendance ne se dégage, en raison des nombreuses interactions entre la composition de l'engrais et les facteurs du milieu, particulièrement les conditions d'aération du sol. Par exemple, certaines études montrent que les émissions sont stimulées par la forme ammoniacale par rapport à la fraction uréique (Venterea

et al., 2010), alors que d'autres soulignent les avantages des engrais ammoniacaux, qui évitent les fortes concentrations de nitrates et les épisodes intenses de dénitrification (Gagnon *et al.*, 2011).

iii) Forme solide ou liquide de l'engrais organique : La forme solide ou liquide de l'engrais organique peut influencer les émissions de N_2O . Épandu sous forme solide, l'engrais aurait tendance à diminuer les émissions de N_2O comparé à un engrais liquide (Gregorich *et al.*, 2005). Cependant, l'effet inverse est parfois observé, particulièrement dans les sols pauvres en carbone où l'apport d'engrais organique liquide, source de carbone facilement décomposable, stimule le fonctionnement des processus microbiens (Rochette *et al.*, 2000). Le choix de la forme de l'engrais organique est donc à raisonner en fonction de la disponibilité en carbone des sols.

iv) La forme technologique : Pour diminuer les émissions liées à la fertilisation minérale, les engrais à libération lente ont déjà prouvé leur efficacité. En effet, en limitant les pics d'azote minéral présent dans le sol, ils permettent de réduire les émissions (Halvorson *et al.*, 2011).

Le fractionnement de la fertilisation azotée

Le fractionnement vise à obtenir une disponibilité en azote minéral dans le sol en phase avec les besoins de la plante, et devrait donc en théorie réduire les émissions de N_2O . L'efficacité de cette pratique est cependant très dépendante des conditions pédoclimatiques au moment de l'application de l'engrais. Par exemple, un apport sur sol chaud à forte activité biologique peut stimuler les émissions de N_2O .

Le mode d'application de l'engrais

L'absorption de l'azote minéral de l'engrais par la culture est favorisée par une application au plus près des racines des plantes. En diminuant la disponibilité en azote minéral dans le sol, ce placement de l'azote réduit le risque d'émission de N_2O et nécessite l'utilisation d'un épandeur de précision. L'incorporation de l'azote dans le sol est toutefois à considérer avec attention, notamment dans les sols argileux humides présentant des conditions favorables aux émissions.

La diversification de la rotation

i) La présence de légumineuses dans la rotation : La présence de légumineuses

dans la rotation réduit le besoin d'apport en engrais azoté, car les légumineuses sont capables de fixer l'azote atmosphérique et d'assurer leur propre nutrition azotée. Pendant de nombreuses années, les méthodes d'inventaire du GIEC prenaient en compte un effet de l'introduction des légumineuses et considéraient que la fixation symbiotique était à l'origine de formation de N_2O . Cependant, des récents travaux canadiens ont mis en évidence que les émissions attribuées aux légumineuses sont finalement semblables à celles de cultures non légumineuses non fertilisées (Rochette et Janzen, 2005 ; Jeuffroy *et al.*, 2013). En 2006, suite à ces résultats, le GIEC a retiré la contribution des légumineuses aux émissions de N_2O . Certaines études ont même montré un effet bénéfique de la présence de légumineuses dans la rotation, qui permet de diminuer l'émission annuelle de N_2O par rapport à des cultures annuelles fertilisées (Gregorich *et al.*, 2005). Néanmoins, avec leur faible rapport carbone/azote, les résidus des légumineuses se minéralisent rapidement. La période suivant leur culture présente donc un risque accru d'émission et doit être gérée avec attention.

ii) L'introduction de cultures intermédiaires : Les cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN), qui peuvent comprendre des légumineuses, sont placées après la récolte de la culture principale pour réduire le lessivage de l'azote. Durant leur phase de croissance, elles immobilisent l'azote minéral du sol et diminuent ainsi le risque de dénitrification, donc d'émission de N_2O par les processus microbiens. Cependant, au moment de leur destruction, l'incorporation des résidus peut conduire à une augmentation des émissions de N_2O , en raison de la minéralisation de l'azote organique au printemps (Millar *et al.*, 2004). Pour diminuer les émissions de N_2O , il faut donc veiller à synchroniser cette libération d'azote avec les besoins de la culture suivante, en adaptant le choix de la CIPAN et sa date de destruction, et en privilégiant l'exportation des résidus.

Pratiques influençant le fonctionnement des processus microbiens

Grâce à l'ingénierie microbiologique, une intervention sur les processus microbiens à différents niveaux pourrait permettre de contrôler les dégagements

de N_2O . De nouvelles solutions prometteuses pour le futur sont en cours de développement par la recherche. Ces leviers visent à diminuer les émissions de N_2O en agissant directement sur les processus de nitrification et dénitrification (figure 2).

Ralentir le processus de nitrification

L'utilisation d'inhibiteurs chimiques de nitrification peut diminuer de manière conséquente la formation de N_2O (Di et Cameron, 2003). Ils agissent en inhibant la nitrification productrice de nitrates (NO_3^-), principal substrat de la production de N_2O , et aussi en diminuant le lessivage de nitrates à l'origine d'émissions indirectes. Ces résultats ont conduit à proposer en 2007 la prise en compte de ce levier efficace de réduction dans l'inventaire national des émissions de N_2O à l'échelle de la Nouvelle-Zélande (Clough *et al.*, 2007).

Stimuler la capacité du sol à réduire le N_2O en N_2

La réduction du N_2O en N_2 est l'ultime étape de la dénitrification et est sous le contrôle d'une enzyme, la N_2O réductase. Des études ont montré que les sols possédant une faible capacité à réduire le N_2O en N_2 sont généralement sources de fortes émissions de N_2O en conditions d'anaérobiose (Hénault *et al.*, 1998). En conséquence, dans les sols agricoles où la N_2O réductase est peu efficace, la stimulation de cette réaction

présente un grand intérêt. Pour stimuler la capacité du sol à réduire le N_2O en N_2 , plusieurs leviers sont à l'étude :

i) Corriger le pH des sols acides : Certains résultats obtenus en laboratoire illustrent que l'activité de la N_2O réductase est diminuée à $pH < 6$, ce qui se traduit par une augmentation des émissions de N_2O (Mørkved *et al.*, 2007). Une correction du pH des sols acides permettrait donc de diminuer les émissions de N_2O (Van den Heuvel *et al.*, 2011), mais cette hypothèse doit encore être validée au champ.

ii) Inoculer les sols non réducteurs avec des microorganismes capables de réduire le N_2O en N_2 : Certains microbes du sol, les *rhizobia*, vivent en symbiose avec les légumineuses dans des nodules racinaires des plantes (figure 8). Une partie de ces *rhizobia* possède le gène *NosZ* permettant l'expression de la N_2O réductase. En laboratoire, des légumineuses ont été inoculées avec ce type de *rhizobia*, faisant basculer un système émetteur de N_2O vers un système consommateur. Cet effet est indépendant de la concentration en oxygène du sol. En cultivant des légumineuses inoculées par des souches réductrices, les émissions de N_2O pourraient ainsi être réduites de 70 % pendant la nodulation des plantes (Hénault et Revellin, 2011). Pour maximiser les bénéfices de cette future technologie, l'inoculation de légumineuses avec des *rhizobia* ne devra pas être réservée aux

cultures pures de légumineuses, correspondant à des situations peu émettrices, mais devra aussi être envisagée en association avec d'autres cultures. Il s'agira également d'identifier les espèces pouvant être inoculées, les souches d'intérêt, les quantités d'inoculum et les systèmes de cultures les plus performants.

iii) Apporter des composés carbonés facilement fermentescibles : Dans certains sols, le gène *NosZ* est présent mais ne s'exprime pas. Des travaux au laboratoire ont montré qu'une intervention sur les propriétés physico-chimiques du sol permettait de stimuler l'activité de ce gène. Il a ainsi été mis en évidence qu'un apport de composés carbonés facilement fermentescibles, comme par exemple du lisier de porc, sur un sol présentant une faible capacité à réduire N_2O en N_2 , permettait de stimuler la réduction du N_2O (Hénault *et al.*, 2001). Toutefois, l'apport de carbone pourrait avoir un effet antagoniste en stimulant parallèlement les premières étapes de la dénitrification dans les sols pauvres en carbone. Les connaissances sur les processus relatifs à cette voie de progrès doivent donc encore être améliorées afin de rendre la méthode applicable au champ. Il s'agira notamment de déterminer la disponibilité en carbone des sols et le mode de gestion du carbone le plus adapté (forme, dose, application, etc.). Dans le futur, de nouveaux fertilisants permettant une gestion combinée du carbone et de l'azote pourraient ainsi voir le jour.

Figure 8. Système racinaire d'un pied de soja présentant de nombreux nodules fixateurs d'azote (C. Avisse/INRA).

Diagnostic des principaux freins à l'application des leviers de réduction des émissions

Pour être efficaces, les leviers de réduction des émissions de N_2O doivent être analysés en considérant non seulement leur effet sur les émissions de N_2O , mais également leur adéquation avec un ensemble de paramètres techniques, économiques, sociaux et environnementaux, tels que leur faisabilité technique, l'acceptabilité par les agriculteurs ou encore la nécessité de maintenir la production agricole. Ces exigences constituent des freins à l'application de ces leviers de réduction des émissions de N_2O qui s'ajoutent aux freins d'ordres biophysiques, techniques et méthodologiques.

La mise en œuvre des leviers de réduction est nécessairement multicritère

Avec les méthodes d'inventaire du GIEC, les facteurs d'émission sont traditionnellement exprimés par unité de surface. Toutefois, la conversion par unité de rendement peut totalement changer l'évaluation des systèmes de culture (Linguist *et al.*, 2012). La question se pose donc la pertinence du facteur d'émission comme moyen d'expression des émissions de N₂O.

Par ailleurs, les leviers de réduction des émissions de N₂O doivent être évalués au regard de l'ensemble des recommandations environnementales, afin d'éviter que le ciblage d'une seule forme azotée engendre des transferts d'impacts. Par exemple, l'incorporation de lisier dans le sol limite la volatilisation d'ammoniac (NH₃) mais, en plaçant l'azote dans des zones du sol qui sont souvent plus humides, augmenterait le risque d'émission de N₂O.

L'évaluation des leviers pour réduire les émissions de N₂O à l'échelle du territoire est donc nécessairement multicritère. Elle se basera sur des diagnostics de l'ensemble des pertes azotées, mais également des impacts sociaux et économiques, grâce à l'appréciation et l'optimisation de scénarios. Pour être complets, les leviers de réduction des émissions de N₂O devront : (i) considérer l'ensemble des pertes azotées à la parcelle et leur devenir à l'échelle du territoire (NO₃⁻, NO_x, NH₃, N₂O et N₂), (ii) considérer l'ensemble des émissions de GES (N₂O, CH₄ et CO₂), (iii) être techniquement faisables, (iv) être économiquement et socialement acceptables et (v) maintenir le niveau de production.

La variabilité des émissions de N₂O et la difficile prise en compte des facteurs locaux

Le choix des situations à cibler pour que les leviers de réduction soient efficaces se heurte à la difficulté d'avoir des connaissances fiables sur les processus expliquant l'origine de la variabilité des émissions de N₂O. Dans ces circonstances, l'applicabilité des leviers de réduction est restreinte par la difficulté de prendre en compte les facteurs locaux. Comme chaque situation est un cas particulier, le N₂O est appelé par

les Anglo-Saxons « le gaz qui rend modeste » (*humbling gas*).

Bien que la variabilité du N₂O incarne un frein pour estimer les émissions, elle doit également être considérée comme une opportunité pour les réduire. Pour cela, il est nécessaire d'améliorer la compréhension des processus à l'origine de la variabilité pour développer des solutions adaptées aux conditions locales. Des travaux de caractérisation des situations émissives à partir des caractéristiques du sol (pH, texture, carbone, biodiversité microbienne, etc.) pourraient par exemple aboutir à une cartographie des zones à risque d'émission à l'échelle du territoire et à la différenciation des pratiques en fonction du potentiel de réduction des émissions.

Le manque de référence scientifique sur les leviers de réduction et leur applicabilité

Le développement des leviers de réduction des émissions de N₂O est confronté à un cruel manque de références scientifiques orientées vers la pratique et la production d'outils d'aide à la décision, et les études sur l'applicabilité de ces leviers sont rares. En France, peu d'études ont été conduites dans les conditions réelles, par exemple à l'échelle de l'exploitation agricole, et le conseil technique est encore inexistant. Les attentes des acteurs sont nombreuses et se situent tant en amont (recherche) qu'en aval (développement).

En amont, pour améliorer notre connaissance des leviers de réduction, les recherches à mener en priorité concernent :

- la compréhension de la variabilité des émissions de N₂O ;
- l'ingénierie microbiologique, pour laquelle l'acquisition de références doit encore être privilégiée afin de rendre les voies de progrès applicables ;
- le contrôle du fonctionnement hydrique des sols, dont l'objectif est de développer une application concrète des connaissances acquises en termes de gestion d'irrigation, de drainage et de travail du sol.

En aval, les recherches sur le développement du caractère opérationnel des leviers sont maigres et devront être renforcées dans les années à venir. Un effort particulier sera apporté aux modèles, en tant qu'outil d'aide à la décision pour adapter les pratiques agricoles

contrôlant les émissions (fertilisation de précision, date, forme) et décliner les moyens de gestion au niveau local. Ce travail pourrait déboucher sur la mise en place de conseils techniques et de transferts de technologies auprès des agriculteurs en prenant en compte les caractéristiques physiques et biologiques de leurs sols.

Le manque de méthodes d'inventaires prenant en compte ces leviers de réduction

À l'échelle internationale, la méthode d'inventaire la plus souvent utilisée est la méthode de niveau 1 du GIEC. Peu de pays ont investi dans les moyens expérimentaux pour développer des méthodes plus précises et sensibles aux leviers de réduction, comme les inventaires de niveaux 2 et 3. Les leviers identifiés dans certains pays appliquant le niveau 2 ne sont pas transposables tels quels car le potentiel de réduction propre à chaque mesure varie d'un pays à l'autre. Par conséquent, chaque pays désireux d'améliorer ses méthodes d'inventaires et de diversifier les leviers de réduction doit initier sa propre démarche expérimentale en l'adaptant à ses conditions pédoclimatiques singulières.

En France, l'acquisition de résultats expérimentaux pour développer les méthodes de niveaux 2 et 3 est en cours de réalisation. De 2010 à 2012, un réseau expérimental a été mis en place par l'UMT GES-N₂O (partenariat CETIOM-INRA¹) et ses partenaires de recherche et développement. Le réseau a été choisi pour être représentatif de la diversité des conditions pédoclimatiques et des conduites culturales des grandes cultures en France. En fonction des résultats obtenus, de nouveaux facteurs d'émission seront proposés pour la France. La reconnaissance de ces facteurs sera appuyée par une méthodologie et des traitements statistiques adaptés, et conduira à l'élaboration d'une méthode de niveau 2 et à la validation de modèles de simulation des émissions de N₂O en vue de développer une méthode de niveau 3 du GIEC.

¹ <http://www.cetiom.fr/dossiers-phares/demarche-de-progres-du-biodiesel/gaz-a-effet-de-serre/cetiom-et-n2o/>

Le problème de l'acceptabilité de ces mesures

La mise en œuvre des leviers de réduction n'est pas toujours recevable par les agriculteurs en raison des coûts supplémentaires ou des éventuelles diminutions de la production agricole qu'elle engendre. L'application de nouvelles mesures nécessite par ailleurs que les agriculteurs fournissent des efforts additionnels au niveau de leur exploitation, ce qui peut également nuire à l'acceptabilité de ces mesures. Par exemple aux Pays-Bas, qui ont développé une réglementation incitative pour réduire les émissions de GES, les agriculteurs ont le choix parmi un catalogue de mesures qui leur sont proposées pour réduire les émissions de N_2O . En règle générale, ils ont eu tendance à sélectionner les mesures qui leur sont familières et non les plus efficaces. Le succès des plans d'actions pour réduire les pertes d'azote passe donc par une plus grande sensibilisation des agriculteurs.

En France, le potentiel de réduction des émissions de N_2O est élevé et de nombreux leviers pourraient être mobilisés. Pour encourager l'acceptabilité des leviers de réduction, des politiques incitatives devront être développées, en donnant par exemple accès à des crédits d'émissions.

Les principes pour une réduction efficace des émissions de N_2O

Les pratiques agronomiques de conservation qui visent une utilisation rationnelle de l'azote et un environnement du sol favorisant l'activité biologique aérobie tendent à réduire l'émission de N_2O . Les pratiques les plus efficaces cibleront les leviers suivants :

- Limiter la dénitrification des sols en favorisant leur aération (éviter les conditions compactantes et limiter l'engorgement) et en corrigeant leur acidité excessive.
- Améliorer la gestion de la fertilisation azotée en ajustant l'azote minéral disponible dans le sol aux besoins de la culture et en augmentant l'efficacité d'utilisation de l'azote par les cultures.
- Intervenir sur les processus microbiens sources de N_2O pour limiter les pics de concentration en nitrates (NO_3^-) et stimuler la réduction du N_2O en N_2 .

Hiérarchiser les leviers de réduction des émissions de N_2O en fonction de leur efficacité ou de leur applicabilité est une tâche complexe, compte tenu du grand nombre d'interactions qui les relient et du fait que les recherches en cours n'ont pas encore toutes abouti. Il est d'ores et déjà admis qu'aucune voie de progrès, aussi pertinente soit-elle, n'est transposable telle quelle dans toutes les contextes. La seule approche possible pour maîtriser « le gaz qui rend modeste » est d'analyser les situations au cas par cas. La solution la plus probable pour réduire les émissions de N_2O est la combinaison de leviers de réduction complémentaires. Ainsi, la création d'un système agricole dans lequel l'aération du sol serait maintenue, la disponibilité de l'azote minéral du sol limitée à ce qui est nécessaire pour ne pas nuire à la production agricole et la réduction du N_2O en N_2 stimulée, résume bien l'optimisation souhaitée.

Conflits d'intérêts : aucun

RÉFÉRENCES

- Carter MS, Chirinda N. No effect of cropping system on the greenhouse gas N_2O . *ICROFS News* 2009 ; 2 : 9-10.
- CETIOM. *Le Colza*. Paris : coédition France Agricole-CETIOM, 2013. (sous presse).
- CITEPA. *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*. Paris : 2011a.
- CITEPA. *Substances relatives à l'accroissement de l'effet de serre*. Paris : 2011b.
- Clough TJ, Di HJ, Cameron KC, et al. Accounting for utilization of a N_2O mitigation tool in the IPCC inventory methodology for agricultural soils. *Nutr Cycl Agroecosys* 2007 ; 78 : 1-14.
- Di HJ, Cameron KC. Mitigation of nitrous oxide emissions in spray-irrigated grazed grassland by treating the soil with dicyandiamide, a nitrification inhibitor. *Soil Use Manage* 2003 ; 19 : 284-90.
- Gagnon B, Ziadia N, Rochette P, Chantigny MH, Angers DA. Fertilizer source influenced nitrous oxide emissions from a clay soil under corn. *Soil Sci Soc Am J* 2011 ; 75 : 595-604.
- GIEC. Volume 4 : Agriculture, foresterie et autres affectations des terres, Chapitre 11 : Emission de N_2O des sols gérés et émission de CO_2 dues au chaulage et à l'application d'urée. In: Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (Eds.), *Lignes directrices*

2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Hayama (Japon) : IGES, 2006.

Gregorich EG, Rochette P, VandenBygaart AJ, Angers DA. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada. *Soil Till Res* 2005 ; 83 : 53-72.

Halvorson AD, Del Grosso SJ, Jantalia CP. Nitrogen source effects on soil nitrous oxide emissions from strip-till corn. *J Environ Qual* 2011 ; 40 : 1775-86.

Hénault C, Revellin C. Inoculants of leguminous crops for mitigating soil emissions of greenhouse gas nitrous oxide. *Plant Soil* 2011 ; 346 : 289-96.

Hénault C, Chêneby D, Heurlier K, Garrido F, Perez S, Germon JC. Laboratory kinetics of soil denitrification are useful to discriminate soils with potentially high levels of N_2O emission on the field scale. *Agronomie* 2001 ; 21 : 713-23.

Hénault C, Devis X, Page S, Justes E, Reau R, Germon JC. Nitrous oxide emissions under different soil and land management conditions. *Biol Fert Soils* 1998 ; 26 : 199-207.

INRA. Des inoculants de légumineuses pour réduire les émissions des sols en oxyde d'azote nitreux. http://www.inra.fr/les_partenariats/collaborations_et_partenaires/entreprises/en_direct_des_labos/inoculants_de_legumineuses. Page consultée le 1^{er} novembre 2012.

Jeuffroy MH, Baranger E, Carrouée B, et al. Nitrous oxide emissions from crop rotations including wheat, rapeseed and dry pea. *Biogeosciences* 2013. (sous presse).

Laville P, Hénault C, Renault P, et al. Field comparison of nitrous oxide emission measurement using micrometeorological and chambers methods. *Agronomie* 1997 ; 17 : 375-88.

Lesschen JP, Kuikman PJ, Smith P, Schils RLM, Oudendag DA. Quantification of mitigation potentials of agricultural practices for Europe. In : *European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2009. Geophysical Research Abstracts 11*, Vienna, Austria, 2009-04-19/2009-04-24.

Linn DM, Doran JW. Effect of water filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non tilled soils. *Soil Sci Soc Am J* 1984 ; 48 : 1267-72.

Linquist B, Van Groenigen KJ, Adviento-Borbe MA, Pittelkow C, Van Kessel C. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops. *Glob Change Biol* 2012 ; 18 : 194-209.

Mathieu O, Lévêque J, Milloux MJ, Bizouard F, Andreux F, Hénault C. Le traçage isotopique pour étudier la production par les

- microorganismes du sol d'oxyde nitreux, gaz à effet de serre. *UB Sciences* 2008 ; 3 : 45-51.
- Millar N, Ndufa JK, Cadisch G, Baggs EM. Nitrous oxide emissions following incorporation of improved-fallow residues in the humid tropics. *Global Biogeochem Cy* 2004 ; 18 : GB1032.
- Mørkved PT, Dörsch P, Bakken LR. The N₂O product ratio of nitrification and its dependence on long-term changes in soil pH. *Soil Biol Biochem* 2007 ; 39 : 2048-57.
- Philibert A, Loyce C, Makowski D. Quantifying uncertainties in N₂O emission due to N fertilizer application in cultivated areas. *PLoS ONE* 2012 ; 7 : e50950.
- Rochette P, Worth DE, Huffman EC, et al. Estimation of N₂O emissions from agricultural soils in Canada. II. 1990-2005 inventory. *Can J Soil Sci* 2008 ; 88 : 655-69.
- Rochette P. No-till only increases N₂O emissions in poorly-aerated soils. *Soil Till Res* 2008 ; 101 : 97-100.
- Rochette P, Janzen HH. Towards a revised coefficient for estimating N₂O emissions from legumes. *Nutr Cycl Agroecosys* 2005 ; 73 : 171-9.
- Rochette P, Van Bochove E, Prévost D, Angers DA, Côté D, Bertrand N. Soil carbon and nitrogen dynamics following application of pig slurry for the 19th consecutive year : II. Nitrous oxide fluxes and mineral nitrogen. *Soil Sci Soc Am J* 2000 ; 64 : 1396-403.
- Six J, Ogle SM, Breidt FJ, Conant RT, Mosier AR, Paustian K. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term. *Glob Change Biol* 2004 ; 10 : 155-60.
- Van Den Heuvel RN, Bakker SE, Jetten MSM, Hefting MM. Decreased N₂O reduction by low soil pH causes high N₂O emissions in a riparian ecosystem. *Geobiology* 2011 ; 9 : 294-300.
- Van Groenigen JW, Velthof GL, Oenema O, Van Groenigen KJ, Van Kessel C. Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: a case study for arable crops. *Eur J Soil Sci* 2010 ; 61 : 903-13.
- Venterea RT, Dolan MS, Ochsner TE. Urea decreases nitrous oxide emissions compared with anhydrous ammonia in a Minnesota corn cropping system. *Soil Sci Soc Am J* 2010 ; 74 : 407-18.