

MÉCANISMES

DES ÉMISSIONS LIÉES À L'ACTIVITÉ des micro-organismes du sol



Dans les sols, ce sont les micro-organismes qui produisent le N₂O. Les émissions de ce gaz vers l'atmosphère sont donc dépendantes de leur activité, fonction des caractéristiques du sol, de sa structure et du climat.

Dans le sol, les composés azotés subissent de nombreuses transformations, très souvent réalisées grâce à l'activité de micro-organismes, et pendant lesquels du protoxyde d'azote (N₂O) peut être produit. C'est à la fin du XIX^e siècle que des chercheurs français (Dehérain, Maquenne, Gayon et Dupetit) ont mis en évidence la production de ce gaz par les sols.

Des processus plus ou moins bien connus

Neuf mécanismes de production ou de consommation de N₂O par les sols sont aujourd'hui répertoriés. Sur cet ensemble, ce sont la dénitrification et la nitrification qui sont les mieux connues. Elles sont en général réalisées par des micro-organismes (1), au cours des processus biologiques

grâce auxquels ils produisent leur énergie, c'est-à-dire durant leur métabolisme énergétique.

La dénitrification permet de transformer du nitrate (NO₃⁻) en nitrite (NO₂⁻) puis en composés gazeux, d'abord en oxyde nitrique (NO), puis en protoxyde d'azote (N₂O) et enfin en diazote (N₂). La nitrification conduit à la transformation de l'ammonium (NH₄⁺) successivement en nitrite puis en nitrate. Elle peut engendrer elle aussi une production de N₂O, mais bien plus marginale.

La dénitrification effectuée dans tous les sols

La dénitrification est une respiration microbienne qui s'observe en absence d'oxygène. Son fonctionnement nécessite la présence de matières organiques. Son efficacité énergétique étant plus faible que celle de la respiration aérobie (en présence d'oxygène),

XIX^e

siècle : c'est l'époque où les chercheurs français ont mis en évidence la production du N₂O par les sols.

Des organismes dénitrifiants présents dans le monde agricole

Les organismes dénitrifiants constituent un groupe présentant une très grande diversité. La capacité de dénitrification est présente chez des bactéries connues par le monde agricole, comme des espèces de la famille des *Rhizobiaceae*, bactéries symbiotiques des légumineuses, ou des *Pseudomonaceae* dont certaines souches jouent un rôle dans la résistance des sols aux fusarioses. La fonction de dénitrification a aussi été observée chez des champignons mais leur contribution n'est pas connue. Récemment, des essais au laboratoire et en serre ont permis de créer des systèmes « sol-plante-micro-organismes naturels de la famille des *Rhizobiaceae* » capables d'éliminer du N_2O atmosphérique. Ces résultats vont bientôt être testés au champ (1) pour mesurer le bénéfice environnemental de ce type de culture, puits de N_2O .

(1) projet PUIGES, financé par la région Centre et associant l'INRA, l'université d'Orléans et AgroPithiviers.

elle n'est pas utilisée préférentiellement par les micro-organismes. Par ailleurs, seule une petite partie des micro-organismes vivant dans les sols est capable d'aller jusqu'au bout du processus, soit à la production de diazote, le principal constituant de l'air.

« Jusqu'à 5 % des micro-organismes du sol seraient capables de produire des gaz (NO , N_2O , N_2). »

La majorité des micro-organismes du sol peut réduire le nitrate en nitrite. Jusqu'à 5 % d'entre eux seraient capables de produire des gaz (NO , N_2O , N_2), une caractéristique des « vrais dénitrifiants ». Une proportion encore plus faible mais mal connue serait capable de transformer le N_2O en N_2 , seul

LA DÉNITRIFICATION : principale source connue de N_2O

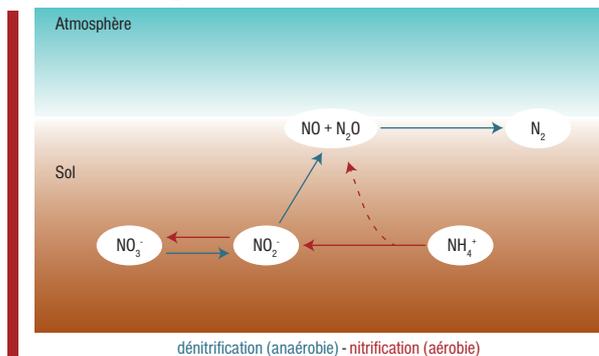


Figure 1 : Représentation schématique des mécanismes de dénitrification et de nitrification impliqués dans les émissions du gaz à effet de serre N_2O par les sols.

Les micro-organismes de la famille des *rhizobiaceae* participent au processus de dénitrification.



mécanisme terrestre identifié permettant l'élimination de N_2O . Aucun sol dépourvu de la capacité dénitrifiante, c'est-à-dire inapte à transformer le nitrate en composés gazeux, toutes formes confondues, n'a été observé. En revanche, il existe des sols incapables de produire du diazote de l'air, identifiés via des expérimentations au champ et au laboratoire.

À la différence de la dénitrification, la nitrification s'effectue en présence d'oxygène. Des travaux sur souches pures de bactéries nitrifiantes ainsi que sur des échantillons de sol ont permis de mettre en évidence que du N_2O peut être produit au cours de l'étape d'oxydation de l'ammonium en nitrite ou pendant une dénitrification des nitrites par les bactéries nitrifiantes. Au bilan, ce processus produit toutefois nettement moins de N_2O que la dénitrification.

Des émissions très dépendantes de l'état hydrique du sol

Les émissions de N_2O par les sols se caractérisent par une variabilité spatiale et temporelle très marquée et ce, à différentes échelles. Dans la majorité des situations, les émissions sont inférieures à 5 g $N-N_2O$ /ha/jour. Mais localement et ponctuellement, leur intensité peut soudainement être multipliée par 10, 100 voire 1000. La dynamique d'émissions de N_2O est très particulière : des phases longues avec des niveaux bas d'émissions sont entrecoupées de subits pics d'émissions (figure 2).



Les phases présentant de bas niveau d'émissions peuvent être attribuées principalement à la nitrification. Les pics d'émission sont quant à eux provoqués par l'activité dénitrifiante des sols qui se met en place quand l'oxygène disparaît après des événements pluvieux importants ou des irrigations massives.

« **L'estimation des émissions de N₂O par les sols** à l'échelle de la parcelle cultivée à partir de mesures directes est laborieuse. »

La dynamique de l'eau dans les sols est le principal déterminant de l'apparition des pics d'émission. L'intensité de ces pics résulte des effets combinés de facteurs environnementaux (humidité et densité des sols, disponibilité en azote minéral, température) et biologiques (potentiel microbien du sol à dénitrifier, à réduire le N₂O et à nitrifier).

ÉMISSIONS DE N₂O PAR LE SOL : un rythme variable

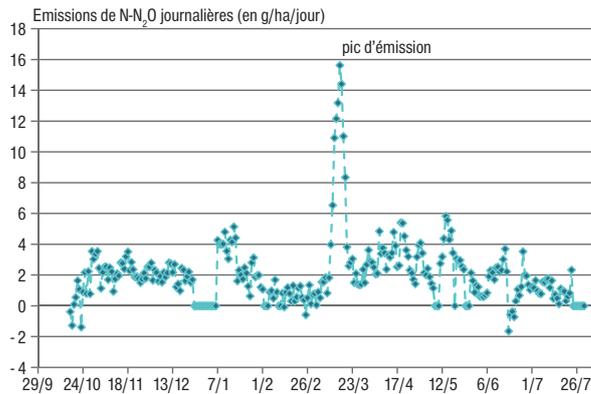


Figure 2 - Emissions de N₂O mesurées sur le site de Grignon (78) en 2008-2009 sur blé tendre d'hiver. Les mesures ont été réalisées sur un sol limoneux à l'aide de chambres automatiques.

La modélisation pour compléter l'expérimentation

Très variables dans l'espace et dans le temps, l'estimation des émissions de N₂O par les sols à l'échelle de la

parcelle cultivée à partir de mesures directes est laborieuse et non directement généralisable. Il faudrait plus d'une centaine de chambres de mesure par parcelle pour connaître de façon fiable l'intensité des émissions de cette parcelle. Une alternative consiste à développer une méthode d'estimation des flux basée sur le calcul (modélisation) à l'aide d'équations décrivant le fonctionnement de chacun des mécanismes biologiques et physiques impliqués dans les émissions de N₂O. La représentation souvent choisie est d'attribuer à chaque sol un potentiel microbien à produire ou à réduire le N₂O, puis de limiter ce potentiel par les facteurs du milieu : humidité, densité apparente, température, disponibilité en azote minéral, pH.

(1) Dans des milieux très réducteurs, le processus de dénitrification peut fonctionner sans catalyse biologique. Il s'agit de dénitrification chimique.

Catherine Hénault - Catherine.Henault@orleans.inra.fr

INRA

Cécile Le Gall - legall@cetiom.fr - CETIOM

Jean-Pierre Cohan - ARVALIS-Institut du végétal

Pierre Cellier - INRA

ZOOM

DES TECHNIQUES POUR COMPRENDRE ET mesurer les processus d'émissions au champ



Les chambres au sol automatisées permettent de mesurer des émissions de N_2O au champ de façon précise (dispositif de l'Inra de Bretenières).

© A. Vermuer, Inra

La biologie moléculaire, l'analyse isotopique et les mesures d'émissions au champ permettent aujourd'hui de mieux connaître les processus producteurs de N_2O .

La connaissance de la diversité microbienne impliquée dans les émissions de N_2O a progressé significativement avec l'essor des techniques de biologie moléculaire qui permettent la détection des gènes d'intérêt. Pour étudier le fonctionnement des processus microbiens impliqués dans les émissions de N_2O , de nombreuses études ont fait appel au gaz acétylène qui bloque la transformation de N_2O en N_2 et la nitrification. L'analyse isotopique (1) peut être un outil de choix pour étudier qualitativement et quantitativement les processus biologiques impliqués dans les émissions de N_2O . Plusieurs approches existent : travailler sur la variation d'abondance naturelle de l'azote 15 ($\delta^{15}N$), car les micro-organismes utilisent préférentiellement l'azote 14, apporter de l'azote minéral (nitrate ou ammonium) enrichi en ^{15}N puis le tracer. L'emploi de ces techniques est néanmoins contraint par l'équipement analytique (spectrométrie de masse adaptée pour échantillons gazeux) et les compétences pointues qu'elles nécessitent.

Chambres au sol ou micrométéorologie

Au champ, les mesures d'émission de N_2O s'appuient sur deux grandes familles de techniques : les chambres au sol et les techniques micrométéorologiques, couplées à l'utilisation d'analyseurs en chromatographie en phase gazeuse ou en spectrométrie infrarouge. Le principe des chambres au sol (caissons en PVC ou en métal, photo 1) est de confiner l'atmosphère gazeuse à la surface des sols et d'y suivre l'accumulation de N_2O pour en déduire une vitesse d'émission locale. Ces chambres peuvent être utilisées dans une version manuelle ou automatisée (photo 2). Basées sur des mesures

de concentration de gaz au-dessus d'un couvert végétal et des mesures de vent, les méthodes micrométéorologiques relèvent de la mesure directe dans l'atmosphère du transfert de gaz du sol et du couvert végétal vers l'atmosphère. Les techniques de chambres au sol sont particulièrement utiles pour comparer l'effet de différentes pratiques agronomiques sur les émissions de N_2O . Les techniques micrométéorologiques sont adaptées pour quantifier les émissions dans des situations représentatives d'écosystèmes.

(1) Les isotopes sont des formes très proches d'un même atome mais que l'on peut néanmoins distinguer par une très faible différence de masse. Pour l'azote on peut distinguer par analyse isotopique la forme principale de masse 14 de son isotope de masse 15.

« Le principe des chambres au sol est de confiner l'atmosphère gazeuse à la surface des sols et d'y suivre l'accumulation de N_2O . »



© V. Puyron, Ferme de Grignon

Dans une chambre manuelle (sans couvercle, photo de gauche), un prélèvement d'échantillon gazeux est réalisé à l'aide d'une seringue (site de la Ferme AgroParisTech de Grignon).