

Effet de l'amendement du digestat de biogaz au biochar sur les émissions d'oxyde nitreux du sol...

Points forts

- Le travail réduit du sol (TRS) et le biochar affectent les émissions de N_2O avec deux pics distincts.
- RT a réduit les émissions de N_2O de 35 %, mais principalement dans le premier pic sous faible WFPS.
- Le biochar a diminué les émissions de N_2O sous un WFPS élevé lors du deuxième pic.

La réduction du N_2O était particulièrement notable dans le traitement RT amendé au biochar.

Résumé

L'augmentation des émissions d'oxyde nitreux (N_2O) après fertilisation au digestat de biogaz constitue un défi pour le recyclage durable des nutriments en agriculture.

Ces dernières années, l'apport de biochar et le travail réduit du sol ont été considérés comme des méthodes importantes pour une gestion durable des sols et ont fait l'objet de nombreuses études.

Cependant, leur effet sur les émissions d'oxyde nitreux (N_2O) reste controversé et les mécanismes impliqués ne sont pas encore pleinement compris.

Cette étude explore l'influence de deux pratiques agricoles durables – le travail réduit du sol (TR) traditionnel et l'amendement au biochar – sur les émissions de N_2O provenant d'un sol fertilisé au digestat.

Nous avons mené une expérience en pots sous serre pendant 36 jours, en utilisant des sols issus d'une parcelle expérimentale travaillée en labour depuis longtemps, traités sans fertilisation (NO), avec du digestat de biogaz seul (BD) ou avec du digestat amendé au biochar (BDBC).

Nous avons suivi les flux gazeux de N_2O , d'ammoniac (NH_3) et de dioxyde de carbone (CO_2), ainsi que la teneur en eau gravimétrique, la dynamique de l'azote minéral du sol et l'absorption d'azote par la biomasse de *Lolium perenne*.

Nos résultats ont révélé deux pics distincts d'émissions de N_2O , probablement dus à une faible porosité saturée en eau (PSSE) lors du premier pic (PP1, 35–45 % PSSE) et à une PSSE plus élevée lors du second pic (PP2, 50–65 % PSSE), avec des effets subséquents sur les voies de production de N_2O .

Les émissions cumulées de N_2O variaient de 9,2 à 29,6 mg N m⁻², et le sol non labouré (RT) a significativement diminué de 35 % par rapport au sol labouré de manière conventionnelle (CT), bien que cette réduction significative n'ait été observée que pendant PP1.

L'amendement au biochar n'a pas affecté significativement les émissions cumulées de N_2O , mais a significativement diminué les émissions de N_2O de PP2, en particulier dans le sol non labouré. Nos résultats montrent que le sol non labouré et l'amendement au biochar peuvent potentiellement atténuer les émissions de N_2O issues du digestat de biogaz dans certaines conditions d'humidité du sol.

Introduction

La digestion anaérobie des déchets organiques et l'utilisation du digestat de biogaz résiduel comme engrais organique constituent une approche prometteuse pour boucler le cycle des nutriments agricoles (Arthurson, 2009).

Le digestat contient des concentrations plus élevées de micro- et macronutriments assimilables par les plantes (à l'exception du carbone (C)) que la matière organique non digérée (Gutser et al., 2005 ; Möller et Müller, 2012).

Contrairement aux engrais azotés de synthèse produits par le procédé Haber-Bosch, responsables de 1,8 % des émissions mondiales de CO₂ (The Royal Society, 2020) et de 1 à 2 % de la consommation énergétique mondiale (Chen et al., 2018), la production de digestat génère du biogaz à usage énergétique (Walsh et al., 2012 ; Tian et al., 2021). De 2000 à 2017, le nombre d'installations de méthanisation en Allemagne est passé de 850 à 9 331.

Cette croissance s'inscrit dans le cadre de la promotion du développement de la bioénergie, conformément à la loi allemande sur les énergies renouvelables (EEG) (Thrän et al., 2020 ; Yang et al., 2021).

Le digestat était principalement utilisé comme engrais pour les cultures (Sobhi et al., 2024). Toutefois, son épandage entraîne généralement des émissions d'oxyde nitreux (N₂O) plus importantes que celui des engrais minéraux (Buchen-Tschiskale et al., 2020 ; Li et al., 2024). Le N₂O, un gaz à effet de serre dont le potentiel de réchauffement climatique est 273 fois supérieur à celui du CO₂ (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2023), provient principalement de l'agriculture, qui contribue directement et indirectement jusqu'à 70 % des émissions de N₂O à l'échelle mondiale (Tian et al., 2020).

Le N₂O se forme dans le sol par les voies microbiennes de nitrification et de dénitrification (Firestone et Davidson, 1989 ; Hu et al., 2015 ; Tian et al., 2020).

La nitrification est un processus strictement aérobie d'oxydation de l'ammoniac (NH₃) en nitrite (NO₂⁻) ou en nitrate (NO₃⁻).

La dénitrification, un processus hétérotrophe qui se déroule en conditions anaérobies, réduit le NO₃⁻ en diazote (N₂) ou en produits intermédiaires comme le N₂O (Firestone et Davidson, 1989 ; Hu et al., 2015). L'humidité du sol, indicateur de la disponibilité en oxygène, détermine la contribution relative de la nitrification et de la dénitrification à la production de N₂O, tandis que l'ammonium (NH₄⁺) et les nitrates (NO₃⁻) fournissent respectivement le substrat à la nitrification et à la dénitrification, et régulent ainsi les taux d'émission absolus (Wang et al., 2022). De plus, le carbone organique est la principale source d'énergie pour la dénitrification, favorisant ainsi la formation de produits de dénitrification (Firestone et Davidson, 1989). Le digestat contenant des quantités considérables de carbone assimilable par les micro-organismes et d'eau, ainsi que de l'ammonium (NH₄⁺), des émissions de N₂O plus élevées après son application, comparativement à un engrais minéral, sont à prévoir (Köster et al., 2011 ; Albuquerque et al., 2012).

Néanmoins, les émissions de N₂O après l'application de digestat varient considérablement en fonction des caractéristiques du digestat, des méthodes d'application et de la gestion antérieure du sol, comme le travail du sol (Severin et al., 2016 ; Rosace et al., 2020 ; Lazcano et al., 2021).

La pratique du travail réduit du sol (TRS) vise à accroître la séquestration du carbone dans la matière organique du sol (MOS), à améliorer la structure du sol et à réduire la consommation de

carburant par rapport au labour conventionnel (LC) (Koga et al., 2003 ; Daraghmeh et al., 2009 ; Hartmann et Six, 2023). Le TRS concentre généralement les apports de matière organique dans la couche superficielle travaillée, ce qui entraîne une stratification avec des teneurs en MOS et une biomasse microbienne plus élevées près de la surface, mais des niveaux similaires ou inférieurs dans les couches plus profondes non travaillées, comparativement aux sols cultivés en LC (Venterea et Stanenas, 2008 ; Jacobs et al., 2009 ; van Groenigen et al., 2010).

Une séquestration significative du carbone, due à la diminution de la décomposition de la MOS, n'est généralement observée qu'après une mise en œuvre prolongée du TRS (Six et Paustian, 2014 ; Bai et al., 2019 ; Li et al., 2020).

L'impact de la RT sur les émissions de N_2O est généralement décrit comme défavorable, certaines méta-analyses faisant état d'augmentations (Feng et al., 2018 ; Mei et al., 2018) et d'autres ne constatant aucun changement significatif (van Kessel et al., 2013 ; Young et al., 2021). Il est à noter que les systèmes de RT de plus de 10 ans tendent à réduire les émissions de N_2O (Six et al., 2004 ; van Kessel et al., 2013), bien qu'il existe des exceptions (Feng et al., 2018). L'effet à long terme de la RT sur les émissions de N_2O pourrait provenir de modifications de la composition des communautés microbiennes, de la stratification du sol (van Kessel et al., 2013 ; Wang et al., 2019) ou d'une amélioration de la structure du sol due à l'accumulation de matière organique du sol, qui compense les effets du tassement naturel du sol en cas de réduction du décompactage mécanique (Blanco-Canqui et al., 2009, 2022).

Le biochar, produit de pyrolyse riche en carbone, pourrait offrir un potentiel de séquestration du carbone plus immédiat (Smith, 2016 ; Greenberg et al., 2019 ; Giannetta et al., 2024).

L'amendement des sols au biochar, pratique largement étudiée (Wu et al., 2019), peut améliorer la structure du sol, la rétention des nutriments et le pH du sol (Kammann et al., 2017 ; Tan et al., 2017).

De nombreuses études ont démontré le potentiel du biochar pour réduire les émissions de N_2O (Cayuela et al., 2014 ; Shakoar et al., 2021 ; Young et al., 2021 ; Kaur et al., 2023), bien que son efficacité dépende des propriétés du biochar (par exemple, la matière première et la température de pyrolyse, la taille des particules, le pH) et des conditions d'application (par exemple, le taux d'application, le type de sol, le type d'engrais) (Borchard et al., 2019 ; He et al., 2022 ; Lataf et al., 2022).

Les mécanismes proposés par lesquels le biochar réduit les émissions de N_2O comprennent l'adsorption chimique ou le piégeage physique des composés azotés, diminuant leur accessibilité pour les microbes (Kizito et al., 2015 ; Kalu et al., 2021 ; Rasse et al., 2022), les propriétés redox du biochar favorisant la réduction du N_2O en N_2 (Bergaust et al., 2010 ; Cayuela et al., 2013 ; Kammann et al., 2017), sa porosité et ses effets stabilisateurs d'agrégats améliorant la structure et l'aération du sol (Blanco-Canqui, 2017 ; Verheijen et al., 2019) et la modulation globale de la composition et de l'activité du microbiome (Harter et al., 2014 ; Kammann et al., 2017 ; Liao et al., 2021).

Il est essentiel de comprendre comment les pratiques agricoles visant la séquestration du carbone affectent les émissions de N_2O afin de garantir que les réductions du CO_2 atmosphérique ne soient pas compensées par une augmentation de la production de N_2O , qui peut être favorisée par des teneurs plus élevées en matière organique du sol (Komatsuzaki et Ohta, 2007 ; Guenet et al., 2021 ; Jerray et al., 2024).

Bien que les effets du labour réduit et de l'amendement au biochar sur les émissions de N_2O aient été largement étudiés, la variabilité des résultats souligne la nécessité de poursuivre les recherches.

Notamment, aucune étude n'a spécifiquement examiné l'effet à long terme du labour réduit sur les émissions de N_2O , bien que des recherches connexes aient été menées sur des sols non labourés (Bista et al., 2015).

Un seul passage de labour dans un sol géré par labour réduit aère et mélange la couche arable, perturbant la stratification et le tassement associés à ce type de sol, ainsi que leurs effets sur la production de N_2O .

L'étude de la persistance, à long terme, des mécanismes sous-jacents à la réduction du N_2O dans les sols RT après une telle perturbation pourrait permettre de mieux comprendre les principaux facteurs d'atténuation.

Enfin, l'exploration de l'effet combiné de l'amendement au biochar et des sols présentant différents historiques de travail du sol sur les émissions de N_2O pourrait révéler des dynamiques néfastes ou des synergies intéressantes liées aux pratiques agricoles durables.

Nous avons mené une étude en pots sous serre pendant 36 jours afin de quantifier les émissions de NH_3 , N_2O et CO_2 d'un sol ayant subi des pratiques culturales traditionnelles (travail du sol traditionnel et labour conventionnel) et fertilisé soit avec du digestat de biogaz seul, soit avec du digestat enrichi en biochar.

Outre les émissions gazeuses, nous avons également mesuré les concentrations de NH_4^+ et NO_3^- , l'absorption d'azote par les plantes et d'autres propriétés du sol.

Cette étude visait à (1) quantifier l'impact et l'interaction de l'apport de biochar et des pratiques culturales traditionnelles sur les émissions de N_2O des sols fertilisés au digestat et (2) explorer les mécanismes sous-jacents.

Extraits de section, propriétés du sol

Le sol utilisé pour l'expérience en pots provenait du site expérimental de longue durée « Hohes Feld » à Nörten-Hardenberg (51°37'14,3"N 9°56'29,3"E), près de Göttingen. La pluviométrie annuelle moyenne locale est de 624 mm et la température moyenne de 9,51 °C (moyennes annuelles 1993-2023 de la station météorologique de Göttingen, fournies par le Deutscher Wetterdienst (DWD)). Ce sol, issu d'un matériau parental loessique (Sielhorst, 2015), est classé comme Luvisol haplique (FAO, 2006).

Température du sol et de l'air

Les températures moyennes de l'air et du sol pendant toute la durée de l'expérience étaient respectivement de 22,3 °C et 20,7 °C.

Les températures maximales de l'air et du sol ont atteint respectivement 39,6 °C et 33,9 °C. La température minimale mesurée pendant l'expérience était de 11,1 °C pour l'air et le sol.

Les températures ont eu tendance à être plus basses pendant la seconde moitié de l'expérience (Fig. S1).

Émissions de NH_3

Les traitements sans fertilisation n'ont pas émis de NH_3 au-delà de la limite quantifiable de 0,1 ppm. Les émissions de NH_3 des traitements fertilisés ont atteint un pic le jour de

Émissions de N₂O provenant des engrais à base de digestat de biogaz

Nos résultats montrent que les pertes d'azote dues aux émissions cumulées de N₂O représentent 0,12 à 0,3 % de l'azote fertilisé avec le digestat, ce qui correspond aux valeurs rapportées dans la littérature (Wolf et al., 2014 ; Nicholson et al., 2017 ; Sánchez-Rodríguez et al., 2018).

Cependant, il est possible que nous ayons sous-estimé les émissions de N₂O en raison de la fréquence réduite des mesures dans PP2 et des émissions continues après la fin de l'expérience sur DAF 35.

De manière générale, les émissions de N₂O rapportées pour la dénitrification ne reflètent pas les taux de dénitrification, puisque N₂O

Conclusion

Nos résultats montrent des effets variables de l'héritage RT et de l'amendement au biochar sur les émissions de N₂O des sols fertilisés au digestat de biogaz entre PP1 et PP2, caractérisés respectivement par une faible et une forte teneur en eau.

Les émissions cumulées de N₂O sur l'ensemble de l'expérience étaient significativement plus faibles dans le sol RT que dans le sol CT, mais cette réduction s'est principalement produite lors de PP1. En revanche, l'amendement au biochar a réduit significativement les émissions de N₂O uniquement lors de PP2, l'effet le plus marqué étant observé dans le sol RT. Nous avons constaté que l'héritage RT

Déclaration de contribution à l'auteur CRediT

Lara Hauck : Rédaction (première version), visualisation, validation, logiciel, méthodologie, investigation, analyse formelle, gestion des données, conceptualisation. **Shiwei Li** : Rédaction (révision et correction), méthodologie, investigation, analyse formelle, gestion des données. **Klaus Dittert** : Rédaction (révision et correction), supervision, ressources. **Haitao Wang** : Rédaction (révision et correction), supervision, ressources, gestion de projet, obtention de financement, conceptualisation.

Déclaration de conflit d'intérêts

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts financiers ou personnels connu susceptible d'avoir influencé les travaux présentés dans cet article.

Remerciements

Cette étude a bénéficié du soutien du projet Zeomin de la Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (subvention n° 2222WD002A). Nous remercions également Arne Gull, Ulf Jaeger, Ulrike Kierbaum, Heiko Hartmann et Marlies Niebuhr pour leur précieuse collaboration. Le financement de l'accès libre a été rendu possible et organisé par le projet DEAL.

Références (144)

- JA Alburquerque *et al.*
[Propriétés chimiques des digestats anaérobies affectant la dynamique du C et du N dans les sols amendés](#)
Agric. Ecosyst. Environ.
(2012)
- CR Anderson *et al.*
[Changements induits par le biochar sur la communauté microbienne du sol : implications pour les cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote et du phosphore](#)
Pédobiologie
(2011)

- H. Blanco-Canqui *et al.*

[Comment le semis direct affecte-t-il la compactibilité du profil du sol à long terme ?](#)

Géoderme

(2022)

- N. Borchard *et al.*

[Interactions entre le biochar, le sol et l'utilisation des terres qui réduisent le lessivage des nitrates et les émissions de N₂O : une méta-analyse](#)

Sci. Total Environ.

(2019)

- CJ Bracken *et al.*

[Partitionnement des sources à l'aide des isotopomères de N₂O et de la teneur en eau du sol pour établir les voies de production de N₂O dominantes à partir de différentes compositions de prairies](#)

Sci. Total Environ.

(2021)

- ML Cayuela *et al.*

[Rôle du biochar dans la réduction des émissions d'oxyde nitreux du sol : revue et méta-analyse](#)

Agric. Ecosyst. Environ.

(2014)

- OA Daraghme *et al.*

[Stabilité de la structure du sol sous labour conventionnel et réduit dans un sol sablo-limoneux](#)

Géoderme

(2009)

- M. Drame *et al.*

[Effets de conditions plus chaudes et plus sèches sur les pertes gazeuses des engrais azotés](#)

J. Environ. Manag.

(2023)

- B. Giannetta *et al.*

[Répartition du carbone organique du sol entre les fractions particulaires et minérales, sous l'effet du biochar et de son application conjointe avec d'autres amendements.](#)

Agric. Ecosyst. Environ.

(2024)

- I. Greenberg *et al.*

[Le remplacement des engrais minéraux par du digestat de biogaz additionné de biochar augmente la teneur en carbone du sol physiquement stabilisé, mais pas la biomasse des cultures, lors d'un essai en plein champ.](#)

Sci. Total Environ.

(2019)