

CONTRIBUTION DES RESIDUS DE CULTURES AUX EMISSIONS DE N₂O : IMPACT DE LEURS CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

P. Thiébeau^{1*}, G. Lashermes¹, P. Laville², D. Abalos³, T. Rittl⁴, S. Hansen⁴, S. Recous¹

¹ INRAE, UMR FARE, 51100 Reims (F) ; ² INRAE, UMR ECOSYS, 78850 Thiverval-Grignon (F) ; ³ Aarhus University, 8830 Tjele (DK) ; ⁴ NORSOK, 6630 Tingvoll (NO).

* Auteur correspondant: pascal.thiebeau@inrae.fr

Contexte

L'incorporation des résidus de cultures et de couverts végétaux au sol est une pratique adoptée par les agriculteurs pour accroître le stock de matières organiques des sols et recycler les nutriments. Mais la décomposition des résidus est une source d'émissions plus ou moins importante de gaz à effet de serre, comme le protoxyde d'azote (N₂O). C'est pourquoi, l'étude des caractéristiques des résidus enfouis au regard des pratiques culturales réalisées, doit permettre de mieux gérer ces restitutions afin d'en limiter les conséquences sur l'environnement. Les émissions de N₂O sont estimées dans les inventaires d'émissions selon la méthode IPCC (2019)¹. Celle-ci est basée sur l'estimation des quantités d'azote recyclées par les résidus de culture (parties aériennes et souterraines) affectées d'un **facteur d'émission (EF)** standard pour tous types de cultures, qui est de **0.005 à 0.006 kg N-N₂O par kg N recyclé** ; l'azote recyclé étant calculé à partir de la quantité de biomasse recyclée et de la richesse en azote de cette biomasse (**Fig. 1**).

$$\begin{aligned} & \text{EQUATION 11.6 (UPDATED)} \\ & \text{N FROM CROP RESIDUES AND FORAGE/PASTURE RENEWAL (TIER 1)} \\ F_{CR} = \sum_T \left\{ \left[AGR_{(T)} \cdot N_{AG(T)} \cdot \left(1 - \text{Frac}_{\text{Remove}(T)} - \left(\text{Frac}_{\text{Burnt}(T)} \cdot C_f \right) \right) \right] + \left[BGR_{(T)} \cdot N_{BG(T)} \right] \right\} \end{aligned}$$

avec : F_{CR} = Quantité annuelle d'azote des résidus (parties aériennes et racinaires), incluant l'azote fixé des végétaux, et pour les fourrages/prairies, l'azote restitué au sol, en kg N an⁻¹

$AGR_{(T)}$ = Quantité annuelle totale de résidus aériens de la culture T, kg MS an⁻¹

$N_{AG(T)}$ = Azote contenu dans les résidus aériens de la culture T, kg N (kg MS)⁻¹

$\text{Frac}_{\text{Remove}(T)}$ = Fraction des résidus aériens de la culture T exportée annuellement.

$\text{Frac}_{\text{Burnt}(T)}$ = Fraction de la superficie annuelle de la culture T brûlée.

C_f = Facteur de combustion.

$BGR_{(T)}$ = Quantité annuelle totale de résidus racinaires de la culture T, kg MS an⁻¹

$N_{BG(T)}$ = Azote contenu dans les résidus racinaires de la culture T, kg N (kg MS)⁻¹

Figure 1 : Equation 11.6 IPCC (2019) permettant d'estimer l'azote provenant des résidus de cultures (F_{CR}) et cultures ou prairies fourragères lors de leur renouvellement.

Le travail présenté a été réalisé dans le cadre du projet *ResidueGas* (programme européen ERA-GAS²) dont INRAE était partenaire. L'objectif global du projet était d'améliorer l'estimation de la contribution des résidus de cultures aux émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture. Nous présentons trois résultats principaux de ce projet.

1. Collecte et mise à disposition des données relatives aux résidus de cultures

Une première tâche du projet a été d'améliorer l'accessibilité de données relatives aux résidus de cultures, au niveau européen, notamment celles concernant la composition ou qualité chimique des résidus.

Une analyse bibliographique quasi-exhaustive a été conduite, intégrant des travaux publiés et des données de rapports d'études menées sur le continent européen : travaux fournissant des valeurs de teneur en azote, en carbone, ou rapport C/N, et chaque fois que possible : composition biochimique des résidus de cultures, exprimée par les fractions soluble, et non solubles (hémicellulose, cellulose et lignine) des résidus. Le jeu de données collectées (plus de 2300 occurrences résultant de 177 documents dont 158 articles scientifiques, 17 pays représentés) a été organisé selon l'usage des cultures : cultures principales (24% des occurrences), cultures prairiales et fourragères (21% des occurrences), engrais verts et cultures dérobées (30% des occurrences), cultures légumières (5% des occurrences), et cultures destinée à la production d'énergie (21% des occurrences). Cette base de données, ouverte à tout utilisateur, agriculteur, enseignant, chercheur, est disponible gratuitement sur le site Data INRAE³ (Fig. 2).

The screenshot shows the Data INRAE portal interface. At the top, there is a header with the 'data INRAE' logo and navigation links for 'Portail Data INRAE (INRAE)' and 'Génération datapaper'. The main title of the dataset is 'Biomass and chemical quality of crop residues from European areas', with a version indicator 'Version 1.0'. Below the title, there is a citation for Thiébeau, Pascal; Jensen, Lars Stoumann; Ferchaud, Fabien; Recous, Sylvie, 2021, 'Biomass and chemical quality of crop residues from European areas', with a DOI link. There are buttons for 'Citer le dataset', 'Modalités d'accès au dataset', 'Modifier le dataset', 'Lier le dataset', 'Contact', and 'Partager'. A 'Description' section provides details about the dataset's content, including carbon and nitrogen contents and biochemical composition. 'Subject' is listed as 'Agricultural Sciences' and 'Mot-clé' includes 'Main crop, Forage, Pasture, Green manure, Vegetable crop, Energy crop, Crop residue, Chemical quality'. On the right, there is a 'Statistiques d'utilisation sur les datasets' section showing '62 téléchargements'.

Figure 2 : Page d'accueil du jeu de données relatif aux biomasses et qualités chimiques des résidus de cultures Européen du site Data INRAE (<https://doi.org/10.15454/LBI3U7>).

L'article⁴ décrivant la structure de cette base de données est en accès libre dans la revue *Data In Brief*. Cette base est structurée en deux types de fichiers :

Des fichiers de données brutes où toutes les données collectées dans chaque document sont mentionnées, avec les références de leurs auteurs. On trouvera les renseignements suivants pour chaque catégorie de plante :

- **Espèce** : nom commun, nom latin, variété, nom de famille ;
- **Conditions de croissance** : partie de la plante, stade de récolte, date de semis, date de récolte, fertilisation azotée, pays (région ou ville), et origine (champ, serre, lysimètre) ;
- **Matière sèche** : tonne/hectare et % de la matière fraîche ;
- **Composition biochimique** (Van Soest, 1963 et 1967)^{5,6} : Soluble au détergent neutre (NDS), hémicellulose + cellulose, hémicellulose, cellulose, lignine, LCI (Index ligno-cellulosique = lignine/(lignine + cellulose + hémicellulose)), C soluble à l'eau (WSC), C total, N total, ratio C:N ;
- **Propriétés du sol** : Texture, Densité apparente, Horizon, pH, N total, C organique, et la classification du sol selon leurs auteurs ;
- **Références** : Auteurs (année de publication), Revue de publication (nom, pagination), Identifiant digital pérenne (DOI).

Des fichiers de données moyennes fournissant les informations agrégées suivantes :

- **Espèces** : Nom commun, Nom latin et Nom de famille ;
- **Conditions de croissance** : partie de la plante et stade de récolte ;
- **Matière sèche** : Tonne par hectare et % de la matière fraîche ;
- **Composition biochimique** : NDS, hémicellulose + cellulose, hémicellulose, cellulose, lignine, LCI, WSC, C total, N total, ratio C:N.

Ce travail propose des exemples d'utilisation de la base, dont la **Figure 3** est extraite. Dans le cas présent, nous avons collecté les teneurs en azote et rapport C:N de la catégorie « grandes cultures ».

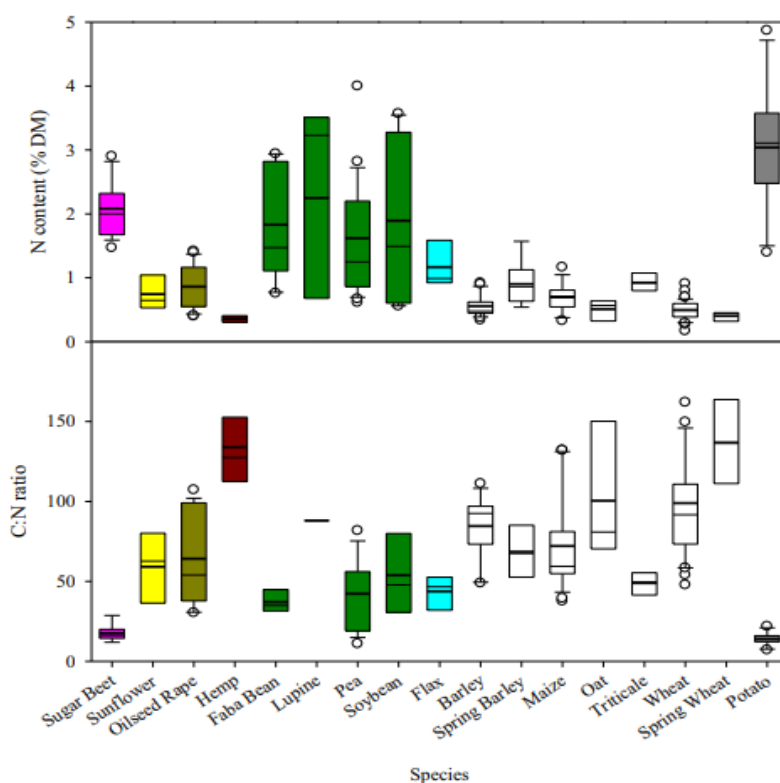


Figure 3 : Distribution du ratio C:N et de la teneur en N (% MS) des résidus aériens pour la catégorie « grandes cultures ». Données représentées : points (dispersion des données) ; barres d'erreur (10^{ème}-90^{ème} pourcentil) ; boîte (25^{ème}-75^{ème} pourcentil) ; moyenne (ligne épaisse) ; médiane (ligne fine). Les couleurs correspondent aux familles d'espèces : rose (amaranthaceae), jaune (asteraceae), vert (brassicaceae), maron (cannabaceae), vert foncé (fabaceae), bleu (linaceae), blanc (poaceae), gris (solanaceae) (Thiébeau et al., 2021)⁴

Plus le nombre de données recueillies par type de résidu est élevé, plus la valeur moyenne proposée sera robuste et pourra remplacer une analyse d'échantillon végétal souvent non disponible. Nous avons pour objectif de mettre à jour annuellement ces données en poursuivant la collecte de données de travaux déjà publiés et des travaux nouveaux.

2. Analyse des facteurs déterminant les émissions de N₂O des résidus au champ

Une méta-analyse⁷ de la littérature rapportant des mesures d'émissions de N₂O au champ, liées à la gestion des résidus de cultures, a été réalisée. Elle regroupe 78 études issues de 19 pays. La base de données élaborée permet de comparer 346 couples de données avec et sans résidus. L'analyse combine les données de mesures d'émissions de N₂O, les caractéristiques pédo-climatiques et agronomiques des essais, les caractéristiques des résidus (biomasse présente, azote apporté en cours de culture, caractéristiques biochimiques des résidus et localisation). Les résultats montrent qu'en moyenne, toutes situations confondues, l'incorporation de résidus de cultures au sol augmente les émissions de N₂O du sol de 44% par rapport aux mêmes situations avec résidus exportés. Mais dans les situations où les résidus sont exportés, les résultats sont très variables car il est observé à la fois des augmentations et des réductions d'émissions de N₂O.

La méta-analyse a été réalisée par la méthode Metaforest (Van Lissa, 2017)⁸ : il s'agit d'une approche classique en méta-analyse qui permet d'identifier les prédicteurs les plus importants des éléments de l'analyse. Parmi les 21 variables testées, deux apparaissent très pertinentes ($r > 0.8$, fixé par la méthode) pour prédire les émissions de N₂O par les résidus de cultures : la quantité d'azote restituée par les résidus et la teneur en carbone soluble à l'eau des résidus (WSC) (**Fig.4**). Les variables d'intérêts suivantes sont relatives à la qualité chimique des résidus : teneurs en lignine, hémicellulose, cellulose et fraction soluble Van Soest.

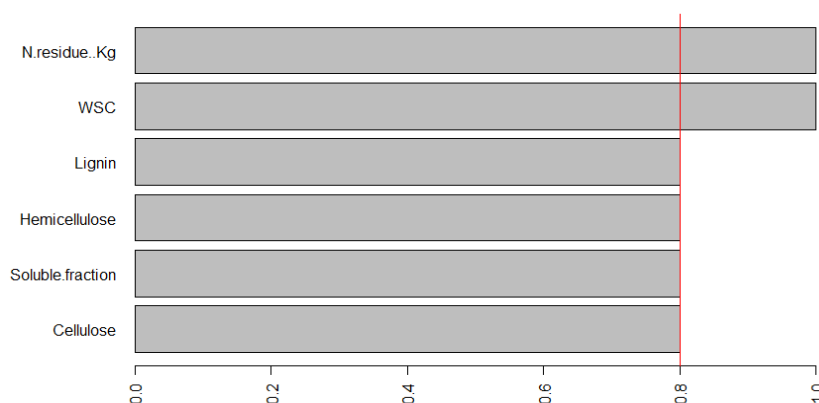


Figure 4 : Identification des prédicteurs les plus influents des émissions de N₂O par les résidus de cultures par la méthode MetaForest (Abalos et al., soumis).

Le critère « maturité physiologique » de la plante dont sont issus les résidus, a fourni l'approche la plus robuste et simple pour catégoriser les résidus en fonction de leur potentiel à favoriser les émissions de N₂O (**Fig. 5 et 6**). Les résidus « immatures » tels que ceux de couverts intermédiaires, fauches de prairie, collets et verts de betterave, etc. (teneurs en C soluble, NDS soluble et N total élevés, teneurs en cellulose, hémicellulose et lignine faibles, et rapport C :N bas) stimulent fortement les émissions de N₂O, tandis que les résidus « matures » (ex. : pailles de céréales, feuilles sénescents) aux caractéristiques opposées, ont des effets marginaux sur la production de N₂O. Ceci suggère la possibilité d'améliorer les facteurs d'émissions des résidus végétaux, en utilisant une typologie simple de classification des résidus de cultures relative au risque d'émission.

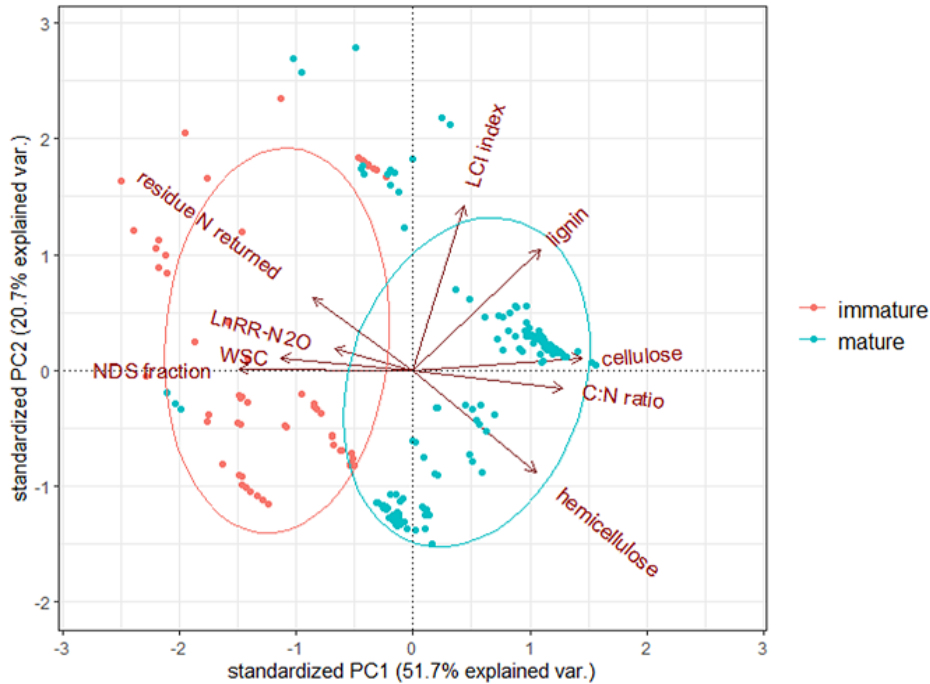


Figure 5 : Analyse en composante principale des caractéristiques biochimiques des plantes selon leur classe de maturité. Les ellipses indiquent l'intervalle de confiance à 95%. (Abalos et al., soumis)⁷

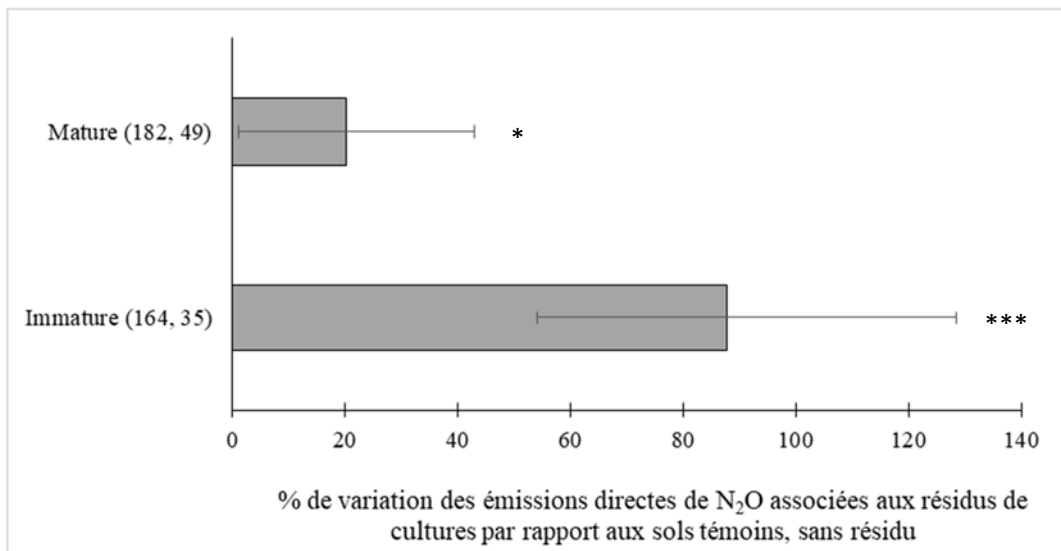


Figure 6 : Propension des résidus de cultures à favoriser les émissions de N₂O selon leur classe de maturité (nombre d'échantillons, nombre d'essais) (Abalos et al., soumis)⁷

3. Rôle de la composition chimique des résidus sur les émissions de N₂O

Afin de clarifier l'influence des caractéristiques de résidus de cultures sur le N₂O émis au cours de la décomposition, une étude a été menée en conditions contrôlées de laboratoire (température de 15°C, humidité du sol de 25%, résidus incorporés dans la couche 0-4 cm du sol, densité du sol de 1.2 g cm⁻³)⁹. Ce travail a été conduit avec les résidus de parties aériennes (feuilles, tiges, collets) de 9 espèces végétales, couvrant une large gamme de composition biochimique et de degré de maturité (**Fig. 7**). Deux sols ont été utilisés pour les incubations : un premier originaire du bassin parisien limono-argilo-calcaire (GRI, pH 8.3) ; un second originaire de Suède, limono-sableux (SLU, pH 6.2). Les données de cette étude sont ouvertes à tout utilisateur, sur le site Data INRAE¹⁰.

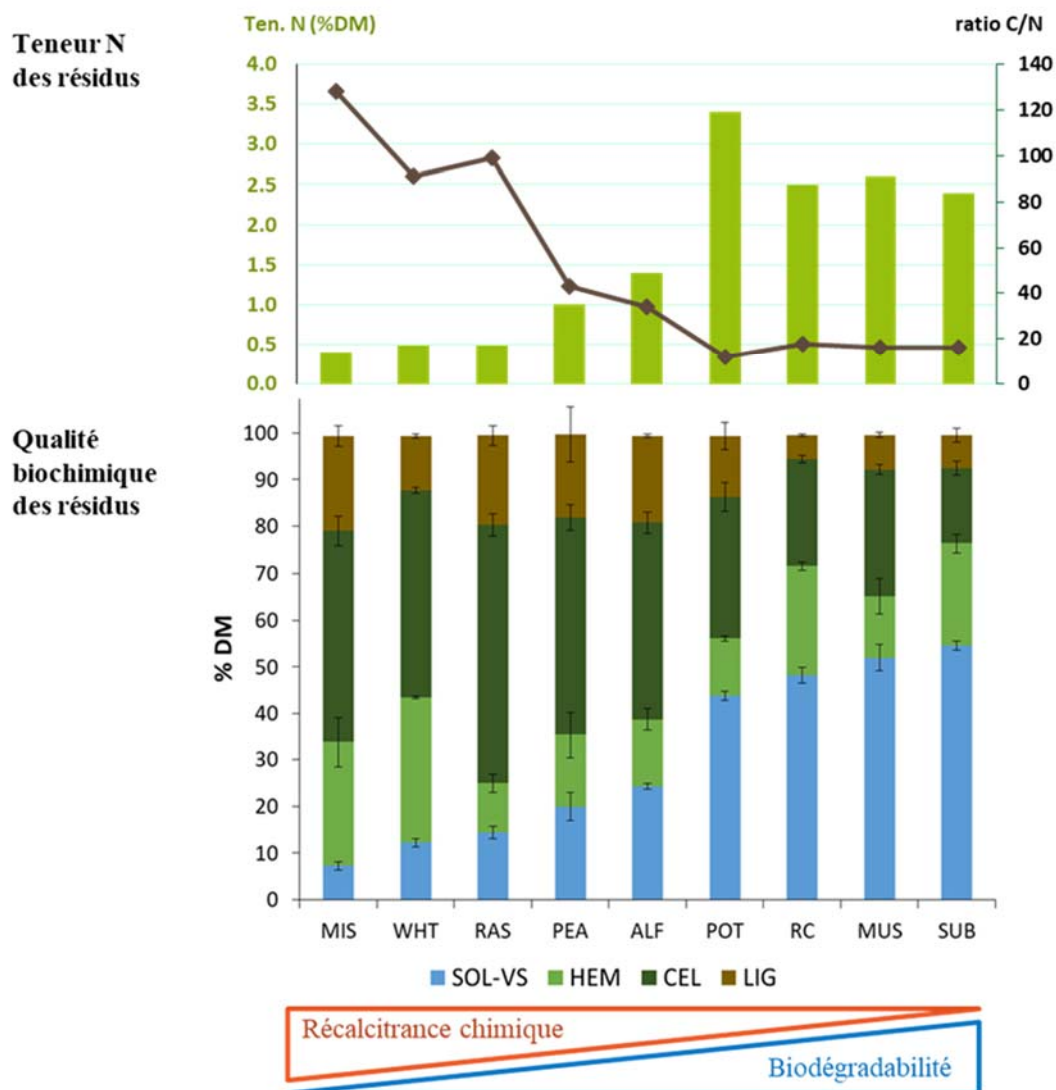


Figure 7 : Composition biochimique des 9 résidus de cultures dont la dégradation a été étudiée en conditions contrôlées au laboratoire (parties aériennes de : MIS : miscanthus ; WHT : blé ; RAS : colza ; PEA : pois ; ALF : luzerne ; POT : pomme de terre ; RC : trèfle violet ; MUS : moutarde ; SUB : betterave sucrière ; SOL-VS : soluble NDS déterminé selon la méthode Van Soest ; HEM : hémicellulose ; CEL : cellulose ; LIG : lignine ; %DM : % de la matière sèche) (adapté de Lashermes et al., 2021)^{9,10}

L'expérimentation a montré que l'émission cumulée de N₂O répond selon une relation exponentielle à la concentration initiale en composés solubles des résidus (SOL-VS). Les résidus les plus immatures, ayant une teneur de la fraction soluble de leurs tissus supérieure à 25% de la matière sèche, émettent le plus de N₂O (**Fig. 8**). L'étude montre aussi que ces émissions surviennent dans les tout premiers jours de la décomposition, lorsque l'activité microbienne de dégradation est intense. Ensuite, les microorganismes qui décomposent les résidus assimilent l'azote minéral du sol, ce qui limite les émissions.

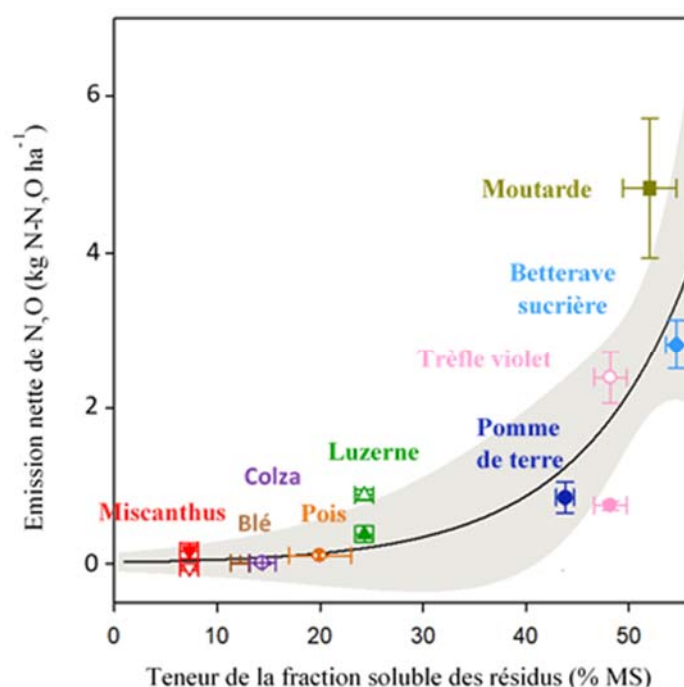


Figure 8 : Relation exponentielle entre l'émission nette cumulée de N₂O au cours de la décomposition des résidus de culture (0-60 jours à 15°C) et la teneur initiale de la fraction soluble (SOL-VS) des résidus. Les symboles représentent les données observées, accompagnées de leur erreur standard. Les symboles ouverts représentent les incubations dans le sol SLU (suède) et les symboles fermés dans le sol GRI (région parisienne). La ligne représente le tracé de l'ajustement exponentiel ($R^2=0.71$, $P<0.002$) ; la zone grisée représente l'intervalle de confiance (95%) de l'ajustement (adapté de Lashermes et al., 2021)⁹

L'analyse statistique réalisée sur le facteur d'émission, calculé pour chacun des 9 résidus étudiés (N-N₂O, % de l'azote des résidus), montre une émission significativement supérieure des résidus de moutarde, de betterave sucrière et de trèfle violet (**Fig. 9**). Pour ces résidus, le N-N₂O net cumulé émis après 60 jours était de 4.8 ± 0.1 kg/ha pour la moutarde, de 2.8 ± 0.3 kg/ha pour la betterave sucrière et de 2.5 ± 1.2 kg/ha pour le trèfle violet pour 4 t MS.ha⁻¹ restitués. Les autres résidus provoquent des émissions beaucoup plus faibles, inférieures à 0.2 kg/ha de N-N₂O.

Après conversion tenant compte de la masse molaire de N-N₂O en N₂O, les quantités d'azote en jeu sont équivalentes respectivement à 15,1, 8,8 et 7,9 kg de N₂O ha⁻¹ pour les résidus de moutarde, betterave sucrière et trèfle violet. Ces quantités restent faibles en termes d'azote. Cependant, le pouvoir de réchauffement global à 100 ans du N₂O étant 265 fois supérieur à celui du CO₂ (ADEME)¹¹, elles représentent de 2 à 4 t ha⁻¹ équivalent CO₂ émis au terme de 60 jours d'incorporation de ces 3 résidus de culture au sol, en conditions contrôlées. Les conséquences sur l'environnement sont donc potentiellement importantes. Dans le même laps de temps, la minéralisation du carbone de ces résidus a été d'environ 1 kg de C-CO₂ ha⁻¹, soit 3,7 kg ha⁻¹ de CO₂ pour 4 t MS restitués.

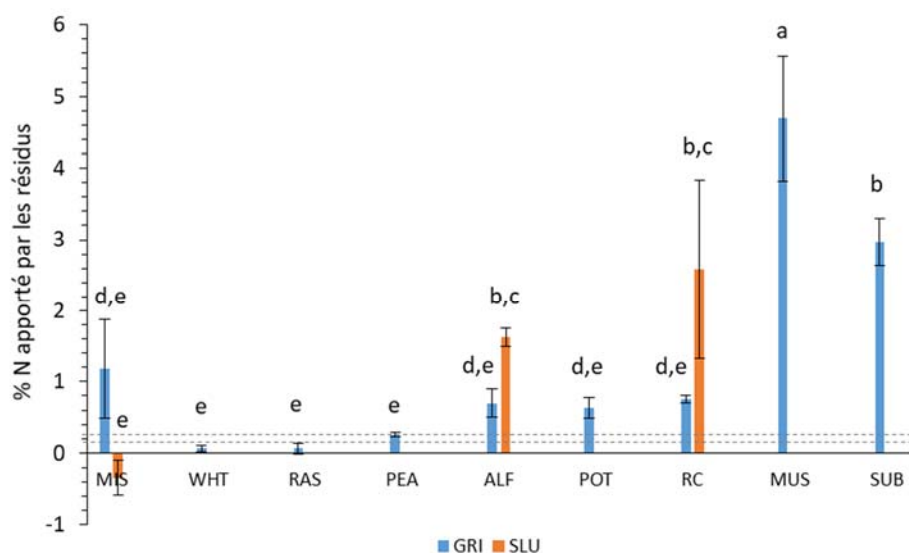


Figure 9 : Facteurs d'émissions de N₂O des résidus de cultures étudiés, en % de l'azote apporté par chacun d'eux. GRI : sol de Grignon (région Parisienne) ; SLU : sol de Akarp (Suède) ; MIS : miscanthus, WHT : blé ; RAS : Colza ; PEA : pois ; ALF : luzerne ; POT : pomme de terre ; RC : trèfle violet ; MUS : moutarde ; SUB : betterave sucrière (adapté de Lashermes et al., 2021)⁹

Conclusion

Cette étude indique que les situations de restitutions de résidus végétaux jeunes de type immature (CIPAN, résidus de cultures légumières, etc.) sont des situations à risques du point de vue des émissions de N₂O. Elles peuvent donc provoquer des épisodes d'émissions ponctuels mais intenses de N₂O, notamment lorsque les conditions environnementales sont réunies (sols humides). D'autres études, conduites dans des conditions de sol, de climat et de gestion différentes sont nécessaires pour confirmer ces données et les mettre en parallèle aux autres avantages que ces résidus apportent en matière de stockage de carbone, de stimulation de la vie microbienne, de rétention de nitrate et de limitation de l'érosion par la couverture du sol.

Ces travaux montrent également que l'IPCC devrait réviser les facteurs d'émission des résidus de culture, en tenant compte de leur nature, pour mieux évaluer leurs impacts pour l'agriculture et l'environnement.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'ERA-NET FACCE ERA-GAS dans le cadre du projet "Amélioration de l'estimation et atténuation des émissions d'oxyde nitreux et du stockage de carbone dans le sol à partir des résidus de culture (ResidueGas). La subvention française de l'Agence Nationale de la Recherche est ANR-17-EGAS0003.

Références

- ¹ IPCC (2019). Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Chapter 11 : N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application (https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O&CO2.pdf)
- ² ERA-GAS (2017-2021). <https://www.eragas.eu/en/eragas/research-projects/residuegas.htm> (28/10/21)
- ³ Thiébeau et al. (2021). Biomass and chemical quality of crop residues from European areas. Portail data INRAE, V1, (<https://doi.org/10.15454/LBI3U7>)

- ⁴ Thiébeau et al. (2021). Dataset of biomass and chemical quality of crop residues from European areas. Data In Brief (<https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107227>)
- ⁵ Van Soest (1963). Use of detergents in analysis of fibrous feeds. 2. A rapid method for determination of fiber and lignin, J. Assoc. Official Agric. Chem. 46 (5) 825-835. (<https://doi.org/10.1093/jaoac/73.4.487>)
- ⁶ Van Soest (1967). Development of a comprehensive system of feed analyses and its application to forages, J. Anim. Sci. 26 (1) 119-128. (<https://doi.org/10.2527/jas1967.261119x>)
- ⁷ Abalos et al. (soumis). Predicting field N₂O emissions from crop residues based on their biochemical composition : a meta-analytical approach. Sci. Tot. Env.
- ⁸ Van Lissa (2017). MetaForest: exploring heterogeneity in meta-analysis using random forests. (<https://doi.org/10.31234/osf.io/myg6s>)
- ⁹ Lashermes et al. (2021). N₂O emissions from decomposing crop residues are strongly linked to their initial soluble fraction and early mineralization dynamics. Sci. Tot. Env. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150883>)
- ¹⁰ Lashermes et al. (2021). Data for: Decomposition and N₂O emissions of nine crop residues incubated under controlled conditions in two soils, V1 ed. Portail Data INRAE. (<https://doi.org/10.15454/8ASYPC>)
- ¹¹ ADEME, https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?prg.htm (28/10/21)