Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture
(N3AF)
Opinion

Fertilisation azotée et climat : faut-il réviser les lignes directrices du GIEC pour les pays à climat tempéré humide ?

Nitrogen fertilization and climate: should the IPCC guidelines be revised for wet temperate climate countries?

Philippe Stoop

Membre de l'Académie d'agriculture de France, directeur recherche et innovation, Société ITK, 45 allée Yves Stourdzé, 34830 Clapiers, Tél : +33(0) 6 70 02 90 17

Correspondance : philippe.stoop@itk.fr

Résumé

Choisir des engrais émettant moins de protoxyde d'azote (N_2O) pourrait être un levier pour réduire les émissions de gaz à effet de serre agricoles. D'après les lignes directrices 2019 (LD2019) du GIEC, les engrais minéraux émettent 2,7 fois plus de N_2O que les engrais organiques, en climat humide. Toutefois plusieurs publications récentes suggèrent que ces valeurs conviennent mal aux climats tempérés, et que les calculs fondés sur ces lignes directrices pourraient générer des réductions fictives d'émissions de N_2O. Une synthèse bibliographique des données disponibles serait nécessaire pour vérifier la validité de ces lignes directrices en France, ou les remplacer par des valeurs nationales plus pertinentes. Compte tenu des données récentes obtenues en Europe, une révision des LD2019 pour les climats tempérés semblerait préférable pour une estimation plus réaliste des émissions dans ces régions.

Abstract

Choosing fertilizers that emit less nitrous oxide (N_2O) could be a lever for reducing agricultural greenhouse gas emissions. According to the 2019 IPCC Guidelines (2019GL), mineral

fertilizers emit 2.7 times more N_2O than organic fertilizers, in humid climates. However, several recent publications suggest that these values are ill-suited to temperate climates, and that calculations based on these guidelines could generate fictitious reductions in N_2O emissions. A bibliographic synthesis of the data available would be necessary to verify the validity of these guidelines in France, or to replace them with more relevant national values. Given recent data obtained in Europe, a revision of the 2019 GL for temperate climates would seem preferable for a more realistic estimate of emissions in these regions.

Mots clés
azote, facteur d'émission, fertilisation, gaz à effet de serre, GIEC, N_2O

Keywords
N2O, emission factor, fertilizer, nitrogen, greenhouse gas, IPCC

Introduction

L'agriculture est une des principales activités humaines source de gaz à effet de serre (GES) : en France, elle est responsable de 19 % de ces émissions, dont 13 % sous forme de dioxyde de carbone (CO_2), 45 % de méthane, et 42 % de protoxyde d'azote N_2O (CGDD, 2021). Le méthane étant surtout émis par l'élevage, le N_2O émis par les sols agricoles est de loin la plus forte contribution des productions végétales au changement climatique. En effet, bien que les quantités émises soient modestes, son impact sur l'effet de serre atmosphérique est majeur, car son pouvoir de réchauffement global (PRG) à 100 ans est 273 fois supérieur à celui du CO_2, d'après le sixième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2021).

Réduire les émissions de N_2O est donc le principal levier dont disposent les agriculteurs pour réduire leur impact sur le changement climatique. Malheureusement ces émissions sont très variables et difficiles à mesurer ; elles dépendent essentiellement de facteurs climatiques et pédologiques sur lesquels les agriculteurs ont peu de prise (documents supplémentaires 1 et 4). Privilégier les engrais les moins émetteurs serait le levier le plus facile à mettre en œuvre, mais les études de terrain permettant de comparer les émissions de différents types de fertilisants sont peu nombreuses et donnent des résultats apparemment contradictoires, difficiles à synthétiser dans des règles simples. Ce sujet est extrêmement complexe, notamment parce qu'il faut distinguer trois types d'émissions de N_2O : les émissions directes (le N_2O produit directement par la biodégradation des engrais azotés dans le sol de la parcelle), les émissions indirectes (le N_2O émis après volatilisation, lessivage ou percolation des éléments fertilisants), et les émissions induites lors de la fabrication des engrais ou lors du traitement des produits agricoles fertilisés.

Malgré la complexité de ce sujet, la conviction que les émissions de N_2O sont essentiellement, voire exclusivement, dues aux engrais de synthèse (ou minéraux) est très présente dans les médias (*Le Monde* 2021a ; 2021b) et, même, dans le débat politique français. Suite à la Convention citoyenne pour le climat de 2020, l'amendement 6442 à la loi climat soumis à l'Assemblée nationale en avril 2021 mentionnait explicitement que « *42 % des émissions agricoles sont des émissions de protoxyde d'azote, liées à l'utilisation d'engrais azotés de synthèse* » et visait à augmenter la taxation de cette seule forme d'engrais. Cet amendement fut finalement repoussé, mais il pourrait resurgir. En effet, les articles 62 et 63 de la loi climat prévoient qu'une redevance sur les engrais azotés minéraux (et eux seuls) pourrait être relancée, si l'objectif de réduction

de 15 % des émissions de N_2O en 2030 par rapport à 2015 n'est pas atteint (Sénat, 2019).
Ce rôle prédominant prêté aux engrais minéraux est-il conforme aux connaissances scientifiques ? La principale source qui étaye cette opinion est le GIEC. En effet, ses lignes directrices 2019 (LD2019) pour l'évaluation des émissions de GES attribuent aux engrais minéraux, quand ils sont utilisés en climat humide, un facteur d'émissions directes (FE1, c'est-à-dire la part de l'azote épandu qui se transforme directement en N_2O dans le sol) 2,7 fois plus élevé qu'aux engrais organiques. Il en résulte que remplacer les engrais minéraux par des engrais organiques, à dose d'azote égale, serait un levier majeur pour réduire les émissions agricoles de N_2O.
Ces LD2019, dites de Tier 1 (niveau 1), ont été créées pour permettre des calculs d'émissions de N_2O cohérents au niveau mondial. Sur un sujet aussi complexe, il s'agit nécessairement de règles approximatives, destinées à être remplacées, quand les connaissances scientifiques le permettent, par des règles dites de niveau 2 (c'est-à-dire des règles plus précises localement, par exemple à l'échelle nationale, définies empiriquement à partir des données existantes) et, si possible, par des règles de niveau 3 (c'est-à-dire par des modèles déterministes permettant d'estimer en n'importe quel point les émissions, en fonction de leur principaux déterminants climatiques et agronomiques) (UNFCC, 2002).
Plusieurs pays (dont nous verrons le détail dans la suite) ont entrepris des travaux pour définir des FE1 nationaux de niveau 2, et ils observent souvent que les LD2019 sont assez éloignées de la réalité pour plusieurs pays européens. En particulier, l'écart d'émissions entre engrais organiques et minéraux y est souvent plus faible, voire non significatif. Si c'est bien le cas, l'application des LD2019 dans ces régions du monde pourrait donc conduire à des réductions fictives d'émissions de N_2O, dans le cas où des agriculteurs remplaceraient des engrais azotés minéraux par des engrais organiques à dose d'azote égale, sans autre changement de pratiques.
Dans cet article, nous rappellerons dans un premier temps l'histoire des évolutions des lignes directrices du GIEC. Nous examinerons ensuite l'impact de l'adoption des LD2019 sur l'évaluation des émissions directes de N_2O, aux échelles nationale (inventaires nationaux des émissions de N_2O) et locale (estimation des émissions de GES des exploitations agricoles) ; puis nous examinerons quelques exemples de travaux sur la définition de LD de niveau 2 dans divers pays à climat tempéré. Nous n'aborderons pas ici le sujet de l'évolution des facteurs d'émissions indirectes, qui ont également changé avec les LD2019, mais nous verrons en conclusion que ce sujet mériterait probablement d'être étudié lui aussi.

Les lignes directrices du GIEC et leurs évolutions successives

Dans ses lignes directrices de 1996, le GIEC attribuait un FE1 de 0,0125 à tous les engrais azotés, quelle que soit la région du monde (GIEC, 1996). Cela revenait donc à considérer que 1,25 % de l'azote épandu devait produire du N_2O.
Lors de la mise à jour de ces lignes directrices en 2006, le GIEC a ramené ce FE1 à 1 %, toujours sans distinguer les types d'engrais ni les régions du monde (GIEC, 2006). À cette époque, de nombreuses publications avaient déjà suggéré des différences d'émissions en fonction du climat et des formes d'engrais, mais avec des résultats trop disparates pour en tirer des règles claires. Il était donc logique de rester sur un FE1 identique pour tous les engrais : il s'agissait d'une approximation peu satisfaisante sur le plan scientifique, mais inévitable vu l'état des connaissances de l'époque, qui ne permettait pas d'être plus précis.
En 2019, le GIEC a actualisé ses lignes directrices pour intégrer les nouvelles connaissances scientifiques acquises depuis 2006 (GIEC, 2019). Pour la première fois, il a

Tableau 1. Facteurs d'émission de N_2O désagrégés des engrais azotés, d'après les lignes directrices 2019 du GIEC (pour la définition des régions sèches et humides, voir GIEC 2019, 13).

Désagrégation	Valeur par défaut	Intervalle de confiance
Engrais N minéral, ou mélange engrais minéral+organique, en climat humide	0,016	0,013-0,019
Engrais N organique, en milieu humide	0,006	0,001-0,011
Tout engrais N, en climat sec	0,005	0,001-0,011

désagrégé (c'est-à-dire différencié) les FE1 en fonction du climat et du type d'engrais, en distinguant :

1. Deux zones climatiques à l'échelle mondiale (régions à climat humide ou sec). L'Europe de l'Ouest est en large part classée comme humide, à l'exception des régions les plus sèches des pays méditerranéens et d'Europe centrale (NEXT).
2. Deux types d'engrais : d'une part les engrais organiques, d'autre part les engrais minéraux et les mélanges engrais organiques + engrais minéraux. Cette distinction, qui n'est appliquée que dans les régions du monde à climat humide, aboutit aux lignes directrices indiquées dans le Tableau 1.

Il en résulte que, dans les régions humides, tout engrais minéral, et tout mélange entre un engrais minéral et un fertilisant organique, quelles que soient les proportions de ce mélange, a un facteur d'émission directe 2,7 fois supérieur à un engrais purement organique (1,6 / 0,6 = 2,6666). C'est donc un changement de paradigme considérable par rapport aux lignes directrices antérieures, qui ne faisaient pas de différence entre les formes d'engrais. Cette décision était assez inattendue, car, prise séparément, aucune des huit publications dont le GIEC a repris les données pour établir ces LD n'arrivait à de tels résultats (Document supplémentaire 2). De plus, leurs conséquences sont parfois surprenantes sur le plan scientifique :

- d'un point de vue biochimique, il est difficilement explicable que les purins et lisiers (engrais organiques où l'azote est essentiellement présent sous forme d'urée) aient un FE1 2,7 fois inférieur à celui de l'urée de synthèse ;
- de même, on s'explique mal qu'un mélange organique + minéral ait systématiquement le FE1 élevé d'un engrais minéral, quelle que soit la proportion du mélange. Il faut d'ailleurs noter que, dans l'analyse statistique réalisée par le GIEC, les références sur ces mélanges étaient peu nombreuses (49, contre 607 pour les engrais minéraux et 163 pour les engrais organiques). En conséquence, même s'ils ont bien un FE1 moyen très proche des engrais minéraux (1,4 % et 1,3 % respectivement), la différence avec le FE1 moyen des engrais organiques (0,7 %) n'est pas significative pour les mélanges, alors qu'elle l'est pour les engrais minéraux.

Il n'en reste pas moins que ces LD s'appuient sur une analyse statistique indiscutable, et sont confirmées par une méta-analyse indépendante qui aboutit à des résultats proches (Charles *et al.*, 2016). Par ailleurs, les LD2019 contenaient quelques modifications en ce qui concerne les facteurs d'émission indirects (GIEC 2006, 27, et GIEC 2019, 26), mais ces modifications avaient moins d'impact sur la comparaison entre engrais organiques et minéraux :

- les FE4 (émissions dues à la volatilisation) ont été désagrégées pour distinguer les régions humides et sèches, mais sans faire de distinction selon la nature de l'engrais apporté.
- le $Frac_{GASF}$ (facteur d'émission indirecte propre aux engrais de synthèse) a été désagrégé pour distinguer différentes formes

d'azote minéral, mais sans modification majeure en moyenne : le $Frac_{GASF}$ agrégé (moyen) est simplement passé de 0,10 à 0,11.
- le $Frac_{GASM}$ (facteur d'émission équivalent au $Frac_{GASF}$ pour les engrais organiques) a connu une augmentation voisine, passant de 0,20 à 0,21.

Un changement de règles lourd de conséquences

En ce qui concerne les inventaires nationaux des émissions de N_2O, l'adoption des LD2019 a eu peu d'impact en France, qui est à cheval sur les deux zones climatiques du GIEC : le FE global pondéré des engrais minéraux et organiques (hors excrétions des animaux à la pâture) est simplement passé de 1 à 0,94 %. Pour les engrais minéraux, l'augmentation de 60 % de leur FE1 dans les régions humides est presque compensé par la baisse de 40 % dans les régions sèches, si bien que leur FE1 global est simplement passé de 1 à 1,03 % (Citepa, 2024).
En revanche, ce changement de lignes directrices a un effet assez radical sur les mesures que l'on peut recommander pour réduire les émissions de N_2O des sols agricoles dans les régions classées humides. Avec les lignes directrices précédentes, la nature de l'engrais utilisé n'influait pas sur le calcul des émissions. Pour les agriculteurs qui pratiquent déjà des bilans azotés, afin de ne pas utiliser d'azote en excès, les seuls leviers restants pour les cultures non légumineuses étaient ceux répertoriés par l'Inrae comme relevant des sous-actions C « Améliorer l'efficacité de l'azote » (Recous *et al.*, 2014) :
- C1 : décaler le premier apport d'azote sur les cultures d'hiver,
- C2 : utiliser des inhibiteurs de nitrification (toutes grandes cultures),
- C3 : enfouir les engrais dans le sol, pour les cultures de printemps.
Or ces mesures n'ont qu'un impact irrégulier car il dépend fortement des conditions climatiques au moment de l'application de l'engrais (C1), ou du type d'engrais et d'inhibiteur, et qui reste de toute façon inférieur à l'effet prêté au type d'engrais dans les LD2019.
En revanche, d'après ces nouvelles lignes directrices du GIEC, l'agriculture conventionnelle dispose d'un levier considérable, et d'application relativement facile, pour réduire fortement ses émissions de N_2O : en effet, remplacer un engrais minéral par un engrais organique, à dose d'azote égale, permet de diviser par 2,7 les émissions directes de N_2O calculées. C'est une très bonne nouvelle pour les démarches bas carbone, même si elle doit être relativisée pour deux raisons :
- du fait que les engrais organiques ont des facteurs d'émission indirecte plus élevés que les engrais minéraux (mais c'était déjà le cas avec les LD2006, de ce point de vue le changement de LD ne change rien),
- du fait qu'ils ont généralement un coefficient apparent d'utilisation plus faible que les engrais minéraux, ce qui oblige à appliquer des doses d'azote plus élevées en organique qu'en minéral pour maintenir le même niveau de rendement. Encore faut-t-il s'assurer que ces réductions d'émissions sont réelles.
Pour l'agriculture bio, qui n'utilise que des engrais organiques, les nouvelles lignes directrices n'apportent pas de nouveau levier d'action, mais elles ont permis d'apaiser une critique émergente contre cette filière : son bilan carbone jugé jusqu'alors médiocre. En effet, à la fin des années 2010, un consensus scientifique commençait à se dessiner, selon lequel les émissions de GES de l'agriculture bio, ramenées au kg d'aliment produit, étaient en moyenne supérieures à celles de l'agriculture conventionnelle, quand on les mesure par la méthodologie classique des analyses de cycle de vie (ACV) (Meier *et al.*, 2015). On pouvait s'attendre à ce que ce changement de lignes directrices modifie considérablement les résultats de ces ACV dans un sens favorable à l'agriculture

biologique, puisqu'il augmente de 60 % le FE1 des engrais minéraux, qui ne sont employés qu'en agriculture conventionnelle, et réduit de 40 % celui des engrais organiques, les seuls qu'utilise l'agriculture biologique. Dans une note de 2020, l'Institut technique de l'agriculture biologique (Itab) réclamait d'ailleurs que la base de données d'ACV Agribalyse, gérée par l'Ademe et l'Inrae, mette à jour au plus vite ses calculs pour intégrer ces nouvelles lignes directrices (Itab, 2020). Cette mise à jour fut réalisée lors du passage d'Agribalyse de la version 3.0.1 à sa version 3.1. Le document supplémentaire 3 montre l'impact de ce changement de version sur l'empreinte carbone de quelques grandes cultures majeures, en bio et en conventionnel. On constate qu'après cette mise à jour, l'empreinte carbone des grandes cultures majeures est devenue plus faible en bio qu'en conventionnel, alors que la version précédente d'Agribalyse donnait le classement inverse (Document supplémentaire 3).

Une autre conséquence plus indirecte est que ces lignes directrices n'incitent pas à approfondir les recherches sur l'identification, ou la conception, de formes d'engrais organiques minimisant les émissions de N_2O. C'est regrettable, car la plupart des publications ayant comparé différentes formes d'engrais organiques ont observé des différences importantes entre elles, avec en particulier une tendance assez récurrente à trouver des émissions plus élevées pour les engrais organiques liquides que pour les solides, sauf s'ils sont associés à des inhibiteurs de nitrification (Document supplémentaire1).

En conclusion, le passage des LD2006 aux LD2019 a eu peu d'impact sur l'évaluation des émissions nationales de N_2O par les sols agricoles, dans le cas de la France. En revanche, à l'échelle des exploitations agricoles, il a une grande influence sur le choix des pratiques agricoles que l'on peut recommander pour réduire ces émissions. Il est donc crucial de s'assurer à l'échelle locale que ces nouvelles lignes directrices correspondent bien à la réalité du terrain, pour ne pas risquer d'entraîner les opérations de décarbonation de la production agricole sur de mauvaises pistes, voire de générer des réductions fictives d'émissions de N_2O. Pour l'Europe et l'Amérique du Nord, on pouvait supposer que les LD2019 sont pertinentes, car le jeu de données utilisé par le GIEC pour définir ces règles accordait une large part à ces deux régions du monde (34 % et 28 % respectivement), tout comme la méta-analyse de Charles *et al.* (2016), qui donnait des résultats voisins (48 % et 32 % respectivement). Toutefois plusieurs études récentes incitent à revérifier ce postulat.

Des résultats européens de niveau 2 peu cohérents avec le niveau 1 du GIEC

De nombreux travaux ont été lancés pour définir des règles de niveau 2, plus précises à l'échelle nationale, et trois pays européens se fondent actuellement sur ce type de règles pour le calcul de leurs émissions : l'Allemagne, les Pays-Bas, le Royaume-Uni (Unfcc, 2023a ; 2023b ; 2023c). Nous citerons ici les principales publications qui ont conduit à ces règles :

- Pour les engrais minéraux, Cowan *et al.* (2020) annoncent pour le Royaume-Uni et l'Irlande un FE1 de 1,1 % en moyenne pour l'ammonitrate, et 0,6 à 0,7 % pour l'urée. Il apparaît aussi que les FE seraient fortement influencés par la culture sur laquelle l'engrais est appliqué. Le FE1 moyen de l'ammonitrate était de 0,6 % sur les grandes cultures, et 1,3 % sur les prairies.
- Pour les engrais organiques au Royaume-Uni, Thorman *et al*. (2020) trouvent un FE de 1,52 % pour le fumier de volailles, contre 0,72 % pour le lisier de porc, et 0,37 % pour les effluents d'élevage bovin.
- En Allemagne, Mathivanan *et al.* (021) recommandent, pour les estimations de niveau 2 des FE1 différenciées par district administratif, avec des valeurs variant de

0,38 % à 0,92 %, et une moyenne nationale à 0,62 %. Dans ces travaux, il n'a pas été jugé pertinent de différencier les formes d'engrais. Cette publication a servi de base pour définir les FE1 de niveau 2 qui font désormais référence en Allemagne.

- Les Pays-Bas se sont fondés sur le modèle NEMA développé par l'université de Wageningen (van der Zee *et al.,* 2021). Ce modèle tient compte de la nature des sols, en distinguant sols organiques (histosols et tourbes, riches en matière organique et souvent hydromorphes) et sols minéraux (tous les autres sols), et les modes de culture (prairies ou sols arables). L'écart des FE est faible entre les engrais organiques et minéraux quand ils sont appliqués sur des grandes cultures sur sols minéraux (0,6 % et 0,7 % respectivement), mais se creuse quand on les applique sur des prairies, en sol minéral (0,1 % et 0,8 %), ou sur sol organique (0,5 % et 3 %). Ces résultats montrent l'importance de la part des sols organiques fertilisés dans les émissions de N_2O. Or ces sols, fréquents dans les régions boréales (agrégées avec les régions tempérées dans les LD2019), sont beaucoup moins fréquents et plus rarement cultivés dans les pays à climat plus clément et sec comme la France, où les sols minéraux sont très prédominants.

Dans ces trois pays, les FE de niveau 2 qui font désormais foi diffèrent donc sensiblement des LD2019 : d'une part, ils arrivent à des facteurs d'émission moyens nettement plus bas (ce qui amène à réviser à la baisse les émissions nationales N_2O des sols agricoles). D'autre part, ils ne trouvent pas d'écart significatif entre les engrais minéraux et les engrais organiques, la variabilité des résultats étant trop grande à l'intérieur de chaque groupe.

Une étude danoise récente, bien que de moins grande ampleur, incite aussi à remettre en cause la hiérarchie des émissions entre engrais organiques et minéraux (Petersen *et al.*, 2023) : en moyenne sur quatre sites et deux années, les auteurs trouvaient des FE1 de 1,02 % pour les engrais organiques, contre 0,15 % pour les engrais de synthèse. Rappelons que c'était le cas également dans l'étude van der Weerden *et al.* (2016) pour la Nouvelle-Zélande (en climat tempéré humide), bien qu'elle ait été citée comme source bibliographique pour les LD2019. Une autre étude ultérieure de la même équipe néo-zélandaise (Luo *et al.*, 2023) a également observé des FE1 nettement inférieurs à ceux des LD2019 pour trois engrais de synthèse : l'urée (0,132 %), le sulfate d'ammonium (0,104 %) et le phosphate de diammonium (DAP) (0,069 %).

Sur ce sujet, on peut également citer une étude réalisée aux États-Unis (Xia *et al.*, 2024), en vue de proposer des règles de niveau 2 pour les émissions de N_2O des sols agricoles : pris globalement, les engrais de synthèse génèrent moins d'émissions que les engrais organiques, et les mélanges organiques + synthèse. Quand on détaille davantage les types d'engrais employés, l'ammonitrate et l'urée (engrais de synthèse) et les effluents d'élevage solides sont ceux qui émettent le moins, alors que les deux types d'engrais les plus émetteurs sont l'ammoniac anhydre (synthèse) et les effluents d'élevage liquides (organiques). Dans cette étude aussi, la nature organique ou synthétique de l'azote apporté ne serait donc pas un facteur déterminant des FE.

En France, les projets Nogas (2009-2012) et le projet Nogas2 qui a suivi les premiers ont visé à établir des LD nationales de niveau 2. Une proposition de modèle de niveau 2 a été présentée par l'équipe Nogas 2 en 2015, mais ses résultats ont été jugés insuffisants pour que ce modèle soit adopté tel quel, et ces travaux n'ont pas été repris depuis (Comifer, 2015). Il en résulte que l'inventaire des émissions de N_2O des sols français, ainsi que le label bas carbone grandes cultures (Soenen *et al.*, 2021) sont, actuellement encore, fondés sur les LD2019. L'absence de LD françaises de niveau 2 est particulièrement regrettable, car notre pays est à la limite des zones humides et sèches selon le GIEC.

Utiliser les LD2019 telles quelles génère donc des hétérogénéités très abruptes dans l'évaluation des émissions, à la limite entre ces deux zones (Document supplémentaire 2). De plus, les données du projet Nogas suggéraient déjà que les LD2006 surestimaient les émissions françaises, surestimation aggravée en zone humide par le passage aux LD2019 (Document supplémentaire 4). Il est donc regrettable que les paramètres du modèle Nogas2 n'aient pas été publiés à l'époque, ce qui empêche de voir s'ils se rapprochaient des LD2019 ou s'en éloignaient fortement.

Faut-il réviser les lignes directrices du GIEC pour les climats tempérés ?

Cette note n'a pas pour ambition de faire une synthèse exhaustive des travaux récents sur les facteurs d'émission de N_2O. Toutefois les références citées suffisent pour montrer que les FE de niveau 2 qui commencent à être adoptées dans les pays à climat tempéré humide divergent nettement des LD2019, avec des facteurs d'émission globalement inférieurs, et que la nature organique ou minérale de l'azote apporté n'est pas déterminante à elle seule. Cette situation n'est évidemment pas satisfaisante sur le plan scientifique. De plus, elle crée des distorsions entre pays : à mode de culture égal, des produits agricoles cultivés en Allemagne (avec des FE1 moyens de 0,62 %) sont réputés avoir une empreinte carbone plus faible que ceux qui sont produits en France (avec des FE1 moyens de 1,03 %), ce qui est peu vraisemblable, la France ayant en moyenne un climat plus sec. Par ailleurs, les LD de niveau 2 allemandes, fondées essentiellement sur des critères pédoclimatiques, laissent peu de latitude aux agriculteurs allemands pour réduire leurs émissions de N_2O ; à l'inverse, les agriculteurs conventionnels français peuvent, d'après les LD2019, et donc le label bas carbone français, réduire considérablement leurs émissions en remplaçant tout ou partie de leurs engrais minéraux par des engrais organiques… si tant est que cette réduction soit réelle.

Laisser perdurer cette situation pourrait à terme décrédibiliser les démarches de décarbonation de l'agriculture, en particulier celles qui reposent sur les LD2019 dans des contextes où elles seraient inadaptées. Pour éclaircir la situation, il paraît indispensable que la France se saisisse de ce sujet, pour définir des lignes directrices de niveau 2 appropriées à son climat et ses sols. Ce travail peut interférer avec beaucoup d'intérêts économiques contradictoires, en raison de ses conséquences sur l'impact environnemental attribué aux engrais de synthèse, mais aussi sur la crédibilité des crédits carbone attribués à l'agriculture, et sur les allégations environnementales de l'agriculture biologique. Il serait donc préférable que ce soit la recherche publique qui s'empare de ce sujet, pour éviter tout soupçon de conflit d'intérêt.

Depuis 2015, la recherche française a bien sûr continué de travailler activement, seule ou au sein d'équipes internationales, sur l'évaluation des émissions de N_2O des sols agricoles français (voir quelques exemples non exhaustifs dans le document supplémentaire 5). Toutefois ces travaux n'avaient pas pour objet de définir des lignes directrices de niveau 2, mais portaient plutôt sur des questions de méthodologie de mesure des émissions, ou sur les stratégies d'atténuation de ces émissions. Les données qu'ils ont générées seraient toutefois précieuses pour compléter les données déjà accessibles à l'époque des programmes Nogas et Nogas2, qui n'étaient pas alors assez nombreuses. En faisant la synthèse de toutes les données disponibles, à la fois dans les organismes de recherche et chez les instituts techniques agricoles, il serait sans doute possible de définir rapidement des lignes directrices françaises de niveau 2, non seulement pour les émissions directes, mais aussi indirectes (Document supplémentaire 5).

Au-delà du cas de la France, il semble également important d'envisager une mise à

jour assez rapide des lignes directrices de niveau 1 du GIEC. Pour toutes les raisons vues précédemment, il est inévitable que ces LD de niveau 1 soient approximatives, mais il est aussi nécessaire de veiller à ce qu'elles ne divergent pas trop des modèles nationaux de niveau 2 ou 3 qui commencent à se mettre en œuvre dans différents pays. Cela suppose d'intégrer régulièrement les nouvelles données parues depuis 2019 et, aussi, de tester de nouvelles approches de désagrégation plus fine des données, afin de réduire l'écart entre ces LD de niveau 1 et les LD de niveau 2 déjà reconnues. D'après les exemples que nous avons vus, cela nécessiterait de distinguer des contextes pédoclimatiques plus différenciés qu'actuellement. Il serait peut-être pertinent de désagréger les données des climats humides tempérés et boréals, contrairement à ce qui a été fait en 2019, et probablement aussi de distinguer engrais organiques liquides et solides, comme le suggèrent plusieurs études. Par ailleurs, maintenant que des lignes directrices de niveau 2 sont validées, il serait préférable d'organiser les désagrégations géographiques à venir pour le Tier 1 du GIEC, de façon à minimiser les écarts avec les niveaux 2 existants.

Théoriquement l'adoption d'un modèle mécaniste de niveau 3 serait la solution la plus satisfaisante sur le plan scientifique, mais elle se heurte à des obstacles pratiques : en effet de tels modèles sont si complexes que, le plus souvent, on ne dispose pas de données d'entrée suffisamment précises pour les utiliser correctement. À titre d'exemple, les États-Unis ont défini un modèle de niveau 3 scientifiquement correct (une adaptation du modèle Daycent), mais faute de pouvoir l'utiliser à grande échelle il est nécessaire d'y développer tout de même des règles de niveau 2 (Xia *et al.,* 2024).

Cet ajustement des LD du GIEC aux climats tempérés est nécessaire pour éviter des discordances croissantes entre pays, incompréhensibles aussi bien pour les agriculteurs que les consommateurs. En tant que grand pays agricole, situé à la limite entre les zones humides et sèches selon le GIEC, la France devrait jouer un rôle majeur pour clarifier ce débat scientifique. Définir enfin des FE1 de niveau 2 pour la France permettra d'assurer la crédibilité des efforts de décarbonation de l'agriculture. Cela permettra aussi aux décideurs politiques français, s'ils souhaitent pénaliser fiscalement les engrais les plus émetteurs de N_2O, d'être sûrs de viser les bonnes cibles.

Remerciements

L'auteur remercie Cécile Le Gall, de Terres Inovia, pour ses précisions sur l'historique des projets Nogas et Nogas 2, et les membres de la section 9 de l'Académie d'agriculture de France qui l'ont conseillé pour la rédaction de cet article.

Conflits d'intérêt

L'auteur est salarié de la société ITK, filiale du groupe coopératif Innoval, qui développe notamment des outils d'aide à la décision pour la fertilisation des cultures, et pour la réduction de l'empreinte carbone des productions agricoles.

Références

Ademe. 2024a. https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.57745/IX0U1R, dernier accès 2025-01-26.

Ademe. 2024b. https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.57745/B5DTRR, dernier accès 2025-01-26.

Albanito F, Lebender U, Cornulier T, Sapkota TB, Bentrup F. 2017. Direct Nitrous Oxide Emissions from Tropical and Sub-Tropical Agricultural Systems - A Review and Modelling of Emission Factors, *Scientific Reports,* 7, 44235.

DOI : 10.1038/srep44235, dernier accès 2025-12-14.

Cayuela ML, Aguilera E, Sanz-Cobena A, Adams DC, Abalos D, Barton L, Ryals R, Silver WL, Alfaro MA, Pappa VA, Smith P, Garnier J, Billen G, Bouwman L, Bondeau A, Lassaletta L. 2017. Direct nitrous oxide emissions in Mediterranean climate cropping systems: Emission factors based on a meta-analysis of available measurement data, *Agriculture, Ecosystems & Environment,*238, 25 - 35.

CGDD. 2021. https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/climat/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-et-l-empreinte-carbone-ressources/article/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-de-l-agriculture#Le-CH4-et-le-N2O-emis-par-l-agriculture, dernier accès 2025-01-26.

Charles A, Rochette P, Whalen JK, Angers DA, Chantigny MH, Bertrand NI. 2016. Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 236, 88-98.
DOI : 10.1016/j.agee.2016.11.021

Citepa, 2015. Vers une méthode de niveau 2 pour estimer les émissions de N_2O des sols cultivés ? https://comifer.asso.fr/wp-content/uploads/2023/03/Nov2015-Comifer-Gemas-RESUME-LEGALL.pdf, dernier accès 2025-01-26.

Citepa. 2024. *Rapport National d'Inventaire pour la France au titre de la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*, 587. https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/ccnucc/CCNUCC_france_2024.pdf, dernier accès 2025-01-26.

Comifer. 2015. https://comifer.asso.fr/wp-content/uploads/2023/03/Nov2015-Comifer-Gemas-ARTICLE-LEGALL.pdf, dernier accès 2025-01-26.

Cowan N, Carnell E, Skiba U, Dragosits U, Drewer J, Levy P. 2020. Nitrous oxide emission factors of mineral fertilisers in the UK and Ireland: A Bayesian analysis of 20 years of experimental data, *Environment International*, 135.
DOI : 10.1016/j.envint.2019.105366.

GIEC. 1996. 11. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/pdfiles/fren4-3.pdf, dernier accès 2025-01-26.

GIEC. 2006. 12. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O&CO2.pdf, dernier accès 2025-01-26.

GIEC. 2019. 13. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch11_Soils_N2O_CO2.pdf, dernier accès 2025-01-26.

GIEC. 2021. 1739. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf, dernier accès 2025-01-26.

GIS Sol. 2025. 24 https://www.gissol.fr/donnees/cartes/lestimation-annuelle-des-emissions-de-n2o-par-les-grandes-cultures-en-france-metropolitaine-2235, dernier accès 2025-11-24.

Grace P, Shcherbak I, MacDonald B, Scheer C, Rowlings D. 2016. Emission factors for estimating fertiliser-induced nitrous oxide emissions from clay soils in Australia's irrigated cotton industry, *Soil Research,* 54(5), 598-603.
DOI : 10.1071/SR16091.

ITAB. 2020. Questions sur la pertinence des données Agribalyse 3.0 pour l'évaluation environnementale des produits agricoles et l'affichage environnemental des produits alimentaires. https://www.interbev.fr/fiche/questions-sur-la-pertinence-des-donnees-agribalyse-3-0-pour-levaluation-environnementale-des-produits-agricoles-et-laffichage-environnemental-des-produits-alimentaires/, 12, dernier accès 2025-01-26.

Le Gall C, Jeuffroy MH, Hénault C, Python Y, Cohan JP, Parnaudeau V, Mary B, Compere P, Tristant D, Duval R, Cellier P. 2014. Analyser et estimer les émissions de N_2O dans les systèmes de grandes cultures français, *Innovations Agronomiques*, 12, 97-112.

Le Gall C, Groleau C, Cheron G. 2015. Fertilisation azotée & émissions de N_2O: quel impact des produits organiques pour le colza d'hiver. https://comifer.asso.fr/wp-content/uploads/2015/04/Resume-poster-Cecile-LEGALL.pdf , dernier accès 2025-01-26.

Le Monde. 2021a. La face cachée des engrais azotés. https://www.lemonde.fr/planete/article/2021/04/08/pollution-la-face-cachee-des-engrais-azotes_6075943_3244.html, dernier accès 2025-01-26.

Le Monde. 2021b. Notre surconsommation d'engrais azotés de synthèse est un désastre écologique, social et économique. https://www.lemonde.fr/idees/article/2021/04/08/notre-surconsommation-d-engrais-azotes-de-synthese-est-un-desastre-ecologique-social-et-economique_6075962_3232.html, dernier accès 2025-01-26.

Luo J, van der Weerden T, Saggar S, Di HJ, Podolyan A, Adhikari K, Ding K, Lindsey S, Luo D, Ouyang L, Rutherford A. 2023. Nitrous oxide emission factors for fertiliser ammonium sulphate, diammonium phosphate, and urea, *New Zealand Journal of Agricultural Research*. DOI : 10.1080/00288233.2023.2277916.

Mathivanan GP, Eysholdt M, Zinnbauer M, Rösemann C, Fuss R. 2021. New N_2O emission factors for crop residues and fertiliser inputs to agricultural soils in Germany, *Agriculture, Ecosystems and Environment,* 322. DOI: 10.1016/j.agee.2021.107640;

Meier MS, Stoessel F, Jungbluth N, Juraske N, Schader C, Stolze M. 2015. Environmental impacts of organic and conventional agricultural products: Are the differences captured by life cycle assessment?, *Journal of Environmental Management*, 149, 193-208. DOI : 10.1016/j.jenvman.2014.10.006.

NEXT. 2025. IPCC Climate Zones. https://abc-map.users.earthengine.app/view/next-ipcc-climate-zones, dernier accès 2025-01-26.

Petersen SO, Peixoto LEK, Sorensen H, Tariq A, Braendholt A, Vinther Hansen L, Abalos D, Thoft Christensen A, Skov Nielsen C, Pullens JWM, Bruun S, Stoumann Jensen L, Olesen JE. 2023. Higher N_2O emissions from organic compared to synthetic N fertilisers on sandy soils in a cool temperate climate, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 358. DOI : 10.1016/j.agee.2023.108718.

Recous S, Jeuffroy MH, Hénault C, Bamière L. 2014. Réduire le recours aux engrais azotés de synthèse : quel potentiel et quel impact sur les émissions de N_2O à l'échelle France ?, *Innovations Agronomiques*, 37, 11-22. DOI 10.17180/j6kk-ff53. https://hal.science/hal-01186906/document, dernier accès 2025-01-26.

Rochette P, Liang BC, Pelster DE, Bergeron

O, Lemker RL, Kroebel R, Macdonald D, Yan W, Flemming C. 2018. Soil nitrous oxide emissions from agricultural soils in Canada: Exploring relationships with soil, crop and climatic variables, *Agriculture Ecosystems and Environment*, 254, 69-81.
DOI : 10.1016/j.agee.2017.10.021

Sénat. 2019. https://www.senat.fr/leg/pjl20-551.html, dernier accès 2025-01-26.

Soenen B, Henaff M, Lagrange H, Lanckriet E, Schneider A, Duval R, Streibig JL. 2021. Label Bas Carbone, Grandes Cultures (version 1.0), 41. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/M%C3%A9thode%20LBC%20Grandes%20cultures.pdf, dernier accès 2025-01-26.

Stehfest E, Bouwman AF. 2006. N_2O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions, *Nutrient cycling in agroecological systems* 74, 207-228.
DOI : 10.1007/s10705-006-9000-7.

Thorman RE, Nicholson FA, Topp CFE, Bell MJ, Cardenas LM, Chadwick DR, Cloy JM, Misselbrook TH, Rees RM, Watson CJ, Willimas, JR, 2020. Towards Country-Specific Nitrous Oxide Emission Factors for Manures Applied to Arable and Grassland Soils in the UK, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 62.
DOI : 10.1016/j.envint.2019.105366.

UNFCCC. 2002. Directives pour l'établissement des communications nationales des parties non visées à l'annexe 1 de la convention. https://unfccc.int/resource/docs/french/sbi/02l26a01f.pdf, 4, dernier accès 2025-01-26.

UNFCC. 2023a. Germany. 2023 National Inventory Report (NIR), 501. https://unfccc.int/documents/627785, dernier accès 2025-01-26.

UNFCC. 2023b. Methodology for the calculation of emissions from agriculture, 132. https://unfccc.int/documents/627759, dernier accès 2025-01-26.

UNFCC. 2023c. United Kingdom. 2023 National Inventory Report (NIR), https://unfccc.int/documents/627789, dernier accès 2025-01-26.

Van der Weerden TJ, Cox N, Luo J, Di HJ, Podolyan A, Philipps RL, Saggar S, de Klein CAM, Ettema P, Rys G, 2016. Refining the New Zealand nitrous oxide emission factor for urea fertiliser and farm dairy effluent, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 222, 133-137.
DOI : 10.1016/j.agee.2016.02.007

Van der Zee T, Bannink A, Van Bruggen C, Groenestein K, Huijsmans J, Van der Kolk J, Lagerwerf L, Luesink H. Velthof G, Vonk J. 2021. Methodology for estimating emissions from agriculture in the Netherlands, 242. https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2021-0008.pdf.

Van Lent J, Hergoualc'h K, Verchot LV. 2015. Reviews and syntheses. Soil N_2O and NO emissions from land use and land-use change in the tropics and subtropics: a meta-analysis, *Biogeosciences*, 12, 7299–7313.
DOI : 10.5194/bg-12-7299-2015.

Xia Y, Kwon H, Wander M. 2024. Estimating soil N_2O emissions induced by organic and inorganic fertilizer inputs using a Tier-2, regression-based meta-analytic approach for U.S. agricultural lands, *Science of the Total Environment*, 927.
DOI : 10.1016/j.scitotenv.2024.171930

Rubrique
Cet article a été publié dans la rubrique « Opinion » des *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France.*

Reçu
9 février 2025

Accepté
20 novembre 2025

Publié
20 décembre 2025

Édité par
Joël Lorgeoux, Académie d'agriculture de France (section 1)

Rapporteurs
1. Sylvie Recous, Académie d'agriculture de France.
2. Anthony Uijttewaal, responsable du service Agronomie, Economie, Environnement, Direction R&D Arvalis.

Citation
Stoop P. 2025. Fertilisation azotée et climat : faut-il réviser les lignes directrices du GIEC pour les pays à climat tempéré ?, *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF),* 20(1) , 6, 1-20. https://doi.org/10.58630/pubac.not.a126955.

Philippe Stoop est membre de l'Académie d'agriculture de France, directeur recherche et innovation de la Société ITK,

Document supplémentaire 1

Les difficultés de l'évaluation des facteurs d'émission de N_2O par les sols agricoles dans les conditions du terrain : exemple sur un essai du projet Biogas

Pour illustrer les difficultés de l'évaluation des émissions de N_2O sur le terrain, prenons l'exemple d'une expérimentation sur 2 ans (campagnes 2010/2011 et 2011/2012) réalisée sur des cultures de colza dans le cadre du projet Nogas (Le Gall *et al.*, 2015). Dans cet essai, on comparait 4 modalités de fertilisation azotée, conformes aux pratiques du terrain : trois types d'engrais organiques (fientes de volailles, compost de fientes de volaille, lisier de porc) complétés par des apports minéraux au printemps, un engrais de synthèse (dont la nature exacte n'était pas précisée), et une modalité sans fertilisation azotée.

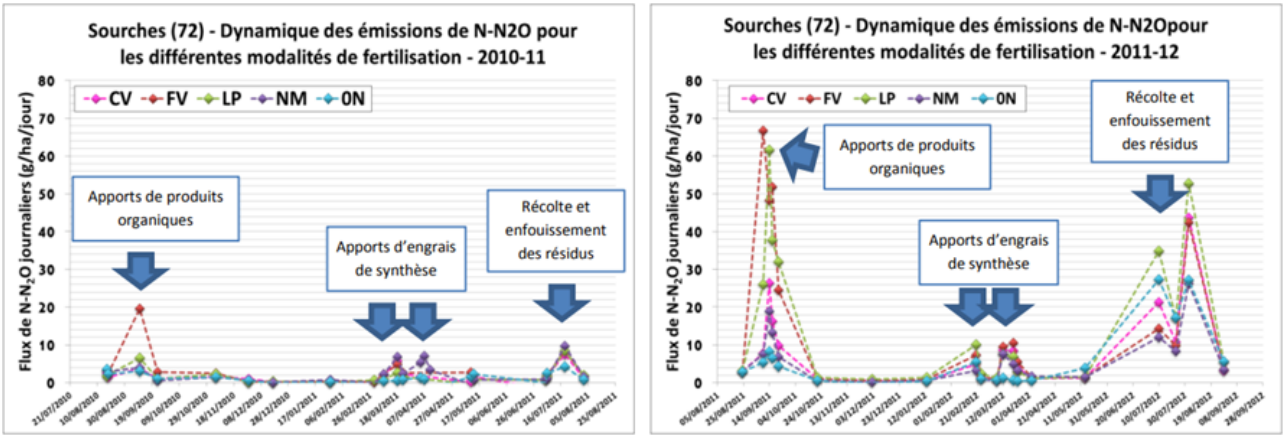
* Le suivi temporel des émissions de N_2O sur les deux campagnes montre qu'il y a bien des pics d'émission après les apports d'engrais azotés.

* Toutefois on note aussi que ces émissions dépendent fortement des conditions climatiques : elles sont beaucoup plus fortes pendant la campagne humide de 2011/2012 que pendant la campagne plus sèche de 2010/2011.

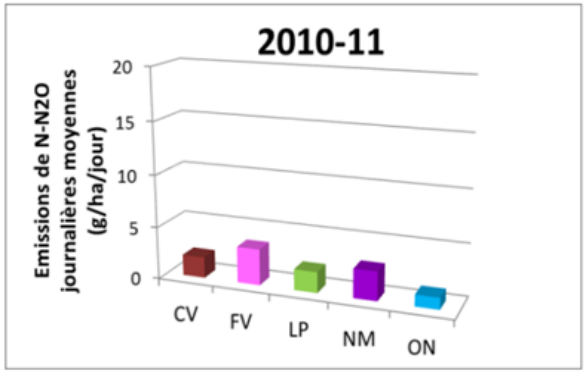
* L'enfouissement des résidus de la culture après récolte provoque un pic d'émission du même ordre de grandeur que ceux générés en période de fertilisation. Par ailleurs, on note aussi que la parcelle non fertilisée a également des émissions de N_2O non négligeables, de l'ordre de la moitié de celles des parcelles fertilisées, ce qui complique l'estimation des quantités de N_2O qui sont réellement dues à l'apport d'engrais.

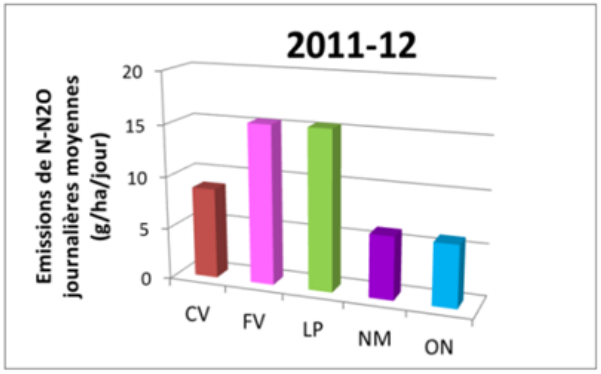
* Au total, l'écart entre les deux années est bien supérieur aux différences entre les formes d'engrais utilisées, qui ne sont pas statistiquement significatives, à l'exception de l'écart entre les deux extrêmes (fientes de volailles et engrais de synthèse).

* Cet effet prédominant du climat brouille les comparaisons entre les formes d'engrais, quand ceux-ci sont testés à leur stade normal d'application, comme c'est le cas ici. En effet, vu leur caractère pondéreux, les engrais organiques sont généralement appliqués avant la levée de la culture, alors que les engrais de synthèse (qui sont soit liquides, soit solides sous forme de petits granulés qui n'abîment pas la végétation quand on les applique) sont généralement appliqués plus tard en saison, pour mieux suivre les périodes



Dynamique des émissions de N_2O au cours des deux campagnes sur les différentes modalités testées (CV : compost de fientes de volailles ; FV : fientes de volaille ; LP : lisier de porc ; NM : azote minéral, 0N : témoin sans fertilisation (Le Gall et al., *2015).*





Émissions journalières moyennes sur les deux campagnes en fonction des modalités testées (Le Gall et al.*, 2015)*

de besoin en azote de la culture. Il en résulte qu'en pratique les deux formes d'engrais ne sont pas exposées aux mêmes conditions climatiques. De plus, toujours afin de correspondre aux pratiques du terrain, la dose totale d'azote appliquée était plus faible sur la modalité avec de la fertilisation minérale seule : en effet, lors d'un apport de produits organiques, seule une partie de l'azote est directement disponible pour la culture, le reste devant passer par le processus de minéralisation pour être rendu disponible. Le colza valorisant néanmoins très bien les apports d'azote à l'automne (minéraux ou organiques), l'apport des produits organiques a à chaque fois conduit à une dose d'azote apportée au printemps – en complément des apports organiques d'automne – plus faible que la modalité en fertilisation minérale seule (d'où des pics d'émissions sur le printemps plus faibles sur ces modalités). Mais si on cumule les quantités d'azote totale apportée, elles étaient plus fortes sur les modalités avec apports de produits organiques à l'automne (et complément sous forme minérale au printemps) que sur la modalité avec fertilisation minérale seule.

* Ces différences des doses totales d'azote apportées font que la hiérarchie des modalités obtenues sur la base des flux mesurés ne correspond pas forcément avec celle des facteurs d'émissions. Les facteurs d'émissions étaient en moyenne assez proches une année donnée. En revanche, les facteurs d'émissions calculés ont varié considérablement d'une année à l'autre (pour les engrais minéraux, on a enregistré une variation de +/- 1 % entre les deux années d'étude – et pour les produits organiques, une différence de +/- 0,2 % à +/- 2 % selon les produits) du fait des différences de conditions climatiques.

Document supplémentaire 2

Mode de calcul des LD2019 du GIEC

Le GIEC a défini ces nouvelles lignes directrices en regroupant des données issues de 8 études antérieures (Stehfest & Bouwman, 2006 ; van Lent *et al.*, 2015 ; Grace *et al.,* 2016 ; van der Weerden *et al.*, 2016 ; Albanito *et al.,* 2017 ; Cayuela *et al.*, 2017, Liu *et al.,* 2017, Rochette *et al.,* 2018). D'après ces références, on comprend facilement le choix du GIEC de retenir pour les régions sèches un FE de 0,5 %, quel que soit le type d'engrais : cela correspond assez bien aux résultats des deux références en climat sec (Grace *et al.* 2016 ; Cayuela *et al.* 2017. En revanche, les résultats obtenus pour les régions humides sont plus inattendus : les différentes références traitant de ces régions donnent des résultats contradictoires en ce qui concerne les différences éventuelles entre types d'engrais, et aucune ne suggère un rapport aussi élevé que 2,7 entre le FE1 des engrais de synthèse et celui des engrais organiques.

Il faut toutefois noter que le GIEC a opéré une sélection parmi les données de ces 8 publications, afin de ne retenir que les études réalisées au champ, publiées dans une revue à comité de lecture, et en retirant quelques situations particulières (prairies pâturées, culture de riz par exemple) devant être traitées par d'autres méthodes (GIEC 2019, 11.29 et 11.30). C'est probablement cette sélection des données de référence utilisées qui explique les divergences apparentes entre les LD2019 et les publications initiales dont sont issues les données. Les résultats du GIEC ne sont d'ailleurs pas complètement isolés : une autre méta-analyse, non citée dans la bibliographie du GIEC, donne des résultats proches (Charles *et al,* 2017). Dans cette méta-analyse à objectif mondial, et avec des critères d'inclusion voisins de ceux du GIEC, on obtenait des FE1 proches de ceux des LD2019 : 0,57 à 0,71 % pour les engrais organiques, selon le mode de pondération des données retenues, 1,01 à 1,76 % pour les engrais minéraux, et 0,88 à 1.6 % pour les mélanges organique+minéral.

Publication	**Zone géographique couverte**	**Objectifs et principaux résultats en rapport avec LD2019**
Stehfest E, Bouwman AF, 2006	Monde	Synthèse au niveau mondial sur les émissions de N_2O des sols, agricoles ou naturels. Les auteurs identifient des différences significatives entre formes d'engrais, mais plus complexes qu'une simple opposition minéral/organique (l'engrais aux émissions les plus fortes est un engrais minéral, l'ammonitrate calcium ; celui qui a les émissions les plus faibles est un autre engrais minéral, l'ammonitrate phosphate, et il n'y a aucune différence significative entre tous les autres fertilisants testés). Les résultats ne sont pas exprimés en facteur d'émission
Van Lent J *et al.*, 2015	Pays tropicaux	Calculs des émissions de N_2O des sols tropicaux, cultivés ou non. Pas de calcul de FE des engrais dans cette publication.
Grace P *et al.*, 2016	Australie (climat sec)	FE de 0,55% en moyenne pour les engrais utilisés sur la culture du coton, sans différence entre engrais minéraux et organiques.
Van der Weerden TJ *et al.*, 2016	Nouvelle-Zélande (climat humide)	Actualisation des FE1 néo-zélandais de niveau 2 pour l'urée (0.6%) et les effluents d'élevage (0.3%). On trouve donc bien un rapport de 1 à 2 environ, entre l'engrais de synthèse et l'engrais organique, mais à des niveaux 2 fois plus bas que dans les LD2019.
Albanito F, *et al.*, 2017	Pays tropicaux	Calcul des émissions de N_2O des sols tropicaux. Dans cette publication, les auteurs n'opposent pas les engrais organiques et de synthèse : ils distinguent 3 catégories d'engrais : ammonitrate (FE 1,8%), urée avec retardateur de nitrification (FE 0,8%), et tous les autres engrais (ce qui comprend aussi bien des engrais organiques que des engrais minéraux autres que les deux cités ci-avant), avec un FE de 1%.
Cayuela ML et al., 2017	Régions à climat méditerranéen (Europe, Californie, Chili, Australie)	FE moyen de l'ordre de 0,5% (0,19% pour les engrais organiques solides, 0,5% pour les engrais minéraux et les mélanges organique+minéral, et 0,85% pour les engrais organiques liquides)
Liu et al. 2017	Monde	Méta-analyse sur 114 études mesurant les émissions de NO et N_2O des sols à travers le monde. Les données concernant des parcelles cultivées, donc susceptibles d'avoir reçu des engrais, sont majoritairement situées en climat tempéré humide (Est des USA, Europe de l'Ouest et Nord-Est de la Chine). Les facteurs d'émission moyens trouvés sont de 1,15% pour les engrais minéraux, et 1,81% pour les engrais organiques (différence statistiquement significative à 5%).
Rochette P *et al.*, 2018	Canada	Définition de modèles de Tier 2 pour calculer les facteurs d'émission en fonction du climat, du sol, de la culture et du type d'engrais au Canada. Les paramètres d'entrée de ces modèles ne sont pas les mêmes pour les engrais organiques et minéraux, ce qui montre bien la difficulté à leur attribuer des facteurs d'émission fixes et reposant simplement sur la nature de l'engrais. Les auteurs ne présentent une comparaison minéral/organique que pour l'est du Canada. Ils trouvent des FE un peu plus élevés pour les engrais de synthèse par rapport aux organiques sur les cultures annuelles (2,11% et 1,77% respectivement), mais très voisins et beaucoup plus faibles sur les cultures pérennes (0,41 et 0,44% respectivement).

Document supplémentaire 3

Évolution de l'empreinte carbone de diverses cultures annuelles bio et conventionnelles, entre la version 3.0.1 de la base de données Agribalyse, basée sur les LD2006 du GIEC (Ademe, 2024 a), et la version 3.1, basée sur les LD2019 (Ademe,2024b).

Le passage des LD2006 aux LD2019 n'était pas le seul changement intégré lors de ce changement de version d'Agribalyse. On observe toutefois que, pour la plupart des grandes cultures majeures, cette mise à jour a fait augmenter sensiblement l'empreinte carbone calculée pour les produits de l'agriculture conventionnelle, au point de dépasser celle des produits bio pour la même culture, ce qui inverse donc le classement des deux modes de culture en ce concerne leur empreinte carbone, sauf pour le maïs. On n'observe pas la même inversion pour les cultures légumineuses (qui n'ont pas besoin d'engrais azoté). L'évolution des cultures non légumineuses est cohérente avec l'impact des LD2019, qui ont fait augmenter de 60 % les émissions de N_2O attribuées aux engrais de synthèse, et baisser de 40 % celles des engrais organiques. On note toutefois que les légumineuses ont aussi subi des changements sensibles d'empreinte carbone entre ces deux versions d'Agribalyse, mais dans un sens variable selon les espèces. Cela montre bien que l'effet du changement de FE1 des engrais azotés n'était pas le seul facteur influant les variations entre les deux versions d'Agribalyse, mais il a très probablement joué un rôle important.

	Emissions de GES (en kg eq CO2/kg produit)		
Cultures non légumineuses	**Agribalyse 3.0**	**Agribalyse 3.1**	**Evolution**
Blé tendre d'hiver conventionnel (moyenne de 3 scenarios)	0,33	0,53	61%
Blé tendre d'hiver Bio (moyenne de 18 scenarios)	0,46	0,4	-13%
Colza conventionnel (moyenne de 4 scenarios)	0,62	1,04	68%
Colza bio	1,40	0,65	-54%
Maïs grain conventionnel, moyenne de 2 scenarios	0,26	0,39	50%
Maïs grain bio, moyenne de 3 scenarios	0,19	0,24	26%
Tournesol conventionnel, moyenne de 4 scenarios	0,44	0,84	91%
Tournesol bio, moyenne de 4 scenarios	0,51	0,44	-14%
Moyenne conventionnel	0,41	0,7	**67%**
Moyenne bio	0,64	0,43	**-14%**
Légumineuses			
Féverolle de printemps conventionnelle (moyenne de 2 scenarios)	0,18	0,295	64%
Féverolle de printemps bio (moyenne de 2 scenarios)	2,14	0,69	-68%
Soja conventionnel	0,26	0,46	77%
Soja bio	0,63	0,63	0%
Luzerne conventionnel (moyenne de 3 scenarios)	0,18	0,21	17%
Luzerne bio (moyenne de 5 scenarios)	0,1	0,2	100%
Moyenne conventionnel	0,21	0,32	**52%**
Moyenne bio	0,96	0,51	**11%**

En vert : mode de culture avec la plus faible empreinte carbone, en rouge, avec la plus forte empreinte.

Document supplémentaire 4

Recherches pour la définition de lignes directrices de niveau 2 en France : les projets Nogas et Nogas2

En France, le projet CASDAR Nogas (2009-2012), piloté par des équipes de l'INRAE et de Terres Inovia, a permis d'identifier et hiérarchiser les principaux facteurs pédoclimatiques conditionnant les émissions de N_2O des sols agricoles dans le contexte français. Un des facteurs les plus déterminants est l'hydromorphie des sols : dans une même parcelle partiellement drainée, située en Loire-Atlantique, pendant une année pluvieuse, les émissions cumulées de N_2O étaient environ 4 fois plus élevées dans la partie non drainée que dans la partie drainée. Le pH du sol, et, dans une moindre mesure, son taux de matière organique, ont également un effet significatif sur les émissions de N_2O, qui sont supérieures dans les sols acides (Le Gall *et al.,* 2014).
Ces résultats sont cohérents avec ceux de la bibliographie internationale, et confirment donc que l'effet des facteurs pédoclimatiques fait l'objet d'un consensus scientifique clair. Malheureusement, ils ne permettent d'identifier des leviers d'action contre les émissions de N_2O que dans des contextes bien spécifiques : drainer les parcelles hydromorphes, et chauler les parcelles aux sols les plus acides. Mais ils ne donnent aucune piste actionnable pour la grande majorité des agriculteurs.
Le projet Nogas n'avait pas pour but de déterminer des facteurs d'émission différenciés en fonction du type d'engrais azotés utilisés. Il donnait toutefois un résultat intéressant par rapport aux lignes directrices du GIEC de l'époque (celles de 2006, soit un FE1 de 1 % pour tous les types d'engrais en toute région). Les chercheurs avaient constaté que les émissions de N_2O mesurées sur leurs sites expérimentaux étaient nettement inférieures à celles estimées avec ce facteur d'émission de 1 %, en particulier en année sèche (le facteur d'émission moyen étant de 0,62 % toutes parcelles confondues – résultats établis sur 59 parcelles suivies dans le projet). Cette observation est d'autant plus importante que 90 % des parcelles suivies avaient reçu des engrais de synthèse. Avec les LD2019, ces parcelles se seraient vu attribuer un facteur d'émission de 1,6 % au lieu de 1 %, la surestimation des émissions réelles par les lignes directrices du GIEC aurait donc été encore plus forte.
Cette première étape a été suivie par le projet Nogas2, financé par le ministère de l'Agriculture et piloté par Terres Inovia et le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (Citepa). Ce nouveau projet avait pour objectif de définir des FE de niveau 2 pour la France, en s'appuyant sur les données générées par le projet Nogas, ainsi que des données françaises antérieures. Ces travaux ont abouti à un modèle statistique dont les résultats ont été présentés en 2015. Le modèle ne visait pas à calculer des facteurs d'émissions mais à donner une estimation « directe » des émissions de N_2O annuelles. Les facteurs pris en compte dans ce modèle étaient : la pluviométrie annuelle cumulée, le pH, la quantité d'azote apportée par les engrais organiques et la quantité d'azote apportée par les engrais minéraux. Ce modèle donnait une erreur de prédiction moyenne de 1.23 kg de N_2O/ha/an, ce qui est élevé par rapport à la valeur des émissions (qui varient le plus souvent entre 0,5 et 4 kg/ha/an (GIS Sol), mais était nettement inférieur à l'erreur des LD2006 du GIEC, ainsi qu'à celle des trois autres modèles disponibles dans la bibliographie (Comifer, 2015). Ces résultats ont été jugés insuffisants, et les travaux pour un modèle de niveau 2 en France n'ont pas été repris depuis.

Document supplémentaire 5

Quelques exemples récents d'études françaises, ou études internationales intégrant des données françaises, sur les émissions de N_2O des sols agricoles.

La bibliographie sélective donnée ici ne vise pas l'exhaustivité, mais illustre la diversité des travaux de la recherche française récente (parus depuis 2019, et donc non pris en compte lors de la définition des LD2019). Ces travaux n'avaient pas pour objet la définition de LD de niveau 2 pour la France, mais les données qu'ils ont permis d'accumuler, ajoutées à celles déjà rassemblées à l'époque du projet Nogas2, faciliteraient le développement de ces LD, aussi bien pour les facteurs d'émission indirecte que directe. Plusieurs de ces travaux pourraient également contribuer à développer un modèle de niveau 3, ce qui serait la solution idéale sur le plan scientifique, mais constitue un objectif ambitieux de long terme.

Etudes méthodologiques et modélisation à l'échelle globale :

Tallec T *et al.*. 2019. N_2O flux measurements over an irrigated maize crop: a comparison of three methods. *Agricultural and Forest Meteorology,* 264, 56-72. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.0

Tian H *et al.* 2019. Global soil nitrous oxide emissions since the preindustrial era estimated by an ensemble of terrestrial biosphere models, *Global Change Biology,* 25(2), 640-659. https://doi.org/10.1111/gcb.14514

Impact des systèmes de culture sur les émissions de N_2O, et voies de mitigation

Garnier J *et al.* 2024. Six years of nitrous oxide emissions from temperate cropping systems under real-farm rotational management, *Agricultural and Forest Meteorology,* 354. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110085

Abalos D *et al*. 2022a. A review and meta-analysis of mitigation measures for nitrous oxide emissions from crop residues, *Science of the Total Environment,* 828, 154388. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154388.

Abalos D *et al*. 2022b. Predicting field N_2O emissions from crop residues based on their biochemical composition, *Science of the Total Environment,* 812, 152532. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152532.

Maaz TM *et al*. 2021. Meta-analysis of yield and nitrous oxide outcomes for nitrogen management in agriculture, *Global Change Biology,* 27(11), 2343-2360.

Hénault C *et al*. 2019. Management of soil pH promotes nitrous oxide reduction and thus mitigates soil emissions of this greenhouse gas, *Scientific Reports,* 9, 20182. https://doi.org/10.1038/s41598-019-56694-3

Olesen JE *et al*. 2023. Challenges of accounting nitrous oxide emissions from agricultural crop residues, *Global Change Biology,* 29, 6846-6855. https://doi.org/10.1111/gcb.16962