

Les émissions de protoxyde d'azote (N₂O) d'origine agricole.

Évaluation au niveau du territoire français

J.-Cl. Germon⁽¹⁾, C. Hénault⁽¹⁾, P. Cellier⁽²⁾, D. Chèneby⁽¹⁾, O. Duval⁽³⁾, B. Gabrielle⁽²⁾,
P. Laville⁽²⁾, B. Nicoulaud⁽³⁾ et L. Philippot⁽¹⁾

(1) INRA / Université de Bourgogne, UMR Microbiologie et Géochimie des Sols, 17 rue Sully, BP 86 510, 21065 Dijon Cedex

(2) INRA / INAPG, UMR Environnement et Grandes Cultures, 78850 Thiverval Grignon, France

(3) INRA Unité de Science du Sol, BP 20619, Ardon, 45166 Olivet Cedex – France

RÉSUMÉ

L'évaluation des émissions de N₂O au niveau du territoire français au titre de la Convention des Nations Unies sur le Changement Climatique est réalisée actuellement à l'aide de la méthodologie proposée par l'IPCC ; les émissions comptabilisées ne prennent en compte que celles découlant des activités humaines et sont estimées à 259 10³ t/an dont 176 10³ t, soit 68 %, sont issues des activités agricoles. Au niveau du territoire français, N₂O est considéré responsable de 15 % de la contribution à l'accroissement de l'effet de serre, et vient ainsi en second après CO₂ (68 %) et devant CH₄ (14 %). Cette évaluation découle d'une approche globale qui demande à être affinée pour mieux analyser l'origine des émissions et dégager des méthodes permettant de les réduire. Il est rappelé l'importante incertitude sur les évaluations définies par cette méthode. Les mesures actuellement disponibles à partir du territoire français laissent penser que les émissions directes à partir des apports de fertilisants sont vraisemblablement surestimées et qu'il convient d'acquiescer des données complémentaires pour proposer une évaluation alternative à celle définie par la méthodologie IPCC. La comparaison des contributions respectives au potentiel de réchauffement global des émissions de N₂O d'une part, et des capacités de déstockage et de restockage de carbone d'autre part, souligne la place déterminante de N₂O dans la contribution des sols à l'effet de serre et l'impérative nécessité de s'intéresser à la maîtrise des émissions de ce gaz dans la définition de stratégies visant à limiter la contribution de l'agriculture au réchauffement climatique.

Mots clés

Protoxyde d'azote, N₂O, effet de serre, émissions, fertilisants azotés, changement climatique.

SUMMARY

NITROUS OXIDE (N₂O) EMISSIONS FROM AGRICULTURE: estimation from France territory.

N₂O emissions from France are estimated according to the United Nation's Framework Convention on Climate Change by the IPCC methodology. Only anthropogenic emissions are considered and evaluated to be 259 10³ t per year with 176 10³ t, i.e. 68 %, originating from

agricultural activities. For France, N_2O is held responsible for 15 % of the national contribution to the increase of the greenhouse effect and it is in the second position after CO_2 (68 %) but before CH_4 (14 %). This estimation is given by a global approach and has to be refined in order to obtain a better analysis of emissions and to propose possible mitigations. The very large uncertainty on these estimations due to the methodology is mentioned. Actually, the measurements established for France suggest that direct emissions based on the use of fertilizers are probably overestimated and that complementary data have to be established in order to allow an alternative evaluation to the IPCC methodology. Comparing the respective part in global warming potential of N_2O emissions on the one hand, and the potential for carbon storage/distorage in the soils on the other hand, highlights the importance of N_2O for the soil contribution to the greenhouse effect. It underlines the necessary interest for N_2O emission management with a view of defining strategies to mitigate the agricultural contribution to climate change.

Key-words

Nitrous oxide, N_2O , greenhouse effect, emission, nitrogen fertilizers, climate change.

RESUMEN

LAS EMISIONES DE PROTÓXIDOS DE NITRÓGENO (N_2O) DE ORIGEN AGRÍCOLA: Evaluación al nivel del territorio francés

La evaluación de las emisiones de N_2O al nivel del territorio francés al título de la convención de las naciones unidas sobre el cambio climático se realiza actualmente con ayuda de la metodología propuesta por l'IPCC; las emisiones contabilizadas toman en cuenta solamente las que derivan de las actividades humanas y son estimadas a $259 \cdot 10^3$ t/ha cuyo 176 $\cdot 10^3$ t, o sea 68 % provienen de las actividades agrícolas. Al nivel del territorio francés, N_2O es considerado como responsable de 15 % de la contribución al acentuación del efecto de invernadero, y llega así segundo después del CO_2 (68 %) y adelante del CH_4 (14 %). Esta evaluación proviene de un global que conviene precisar para analizar el origen de las emisiones y proponer métodos que permiten reducirlas. La importante incertidumbre sobre las evaluaciones definidas por este método son evocadas. Las medidas actualmente disponibles a partir del territorio francés dejan pensar que las emisiones directas a partir de los aportes de fertilizantes son verosimilmente sobrestimadas y que se necesita adquirir datos complementarios para proponer una evaluación alternativa a la que se define por la metodología IPCC. De una parte la comparación de las contribuciones respectivas al potencial de calentamiento global de las emisiones de N_2O , y de otra parte de las capacidades de de-almacenaje y de re-almacenaje del carbono subraya el lugar determinante de N_2O en la contribución de los suelos al efecto de invernadero y la necesidad imperativa de interesarse a la maestría de las emisiones de este gas en la definición de estrategias que quieren limitar la contribución de la agricultura al calentamiento climático.

Palabras clave

Protóxidos de nitrógeno (N_2O), efecto de invernadero, emisiones, fertilizantes nitrogenados, cambios climáticos.

La mise en application du protocole de Kyoto, ratifié par l'Union Européenne en mars 2002, conduit les pays signataires à faire l'inventaire de leurs émissions des 6 principaux gaz responsables de l'augmentation de l'effet de serre, et en particulier celles de N₂O, pour lesquelles des méthodologies d'évaluation standardisées ont été définies par l'IPCC (1997).

Le protoxyde d'azote (N₂O) est 1000 fois moins concentré dans la troposphère que le gaz carbonique. Son coefficient de forçage radiatif dans les conditions actuelles a été évalué environ 200 fois supérieur à celui de CO₂ (IPCC, 1995), ce qui lui confère un potentiel de réchauffement global (PRG) sur un siècle d'environ 300 fois celui de ce même gaz (tableau 1).

La concentration atmosphérique en N₂O est passée de 275 à 314 ppb au cours des deux derniers siècles, et l'essentiel de cette augmentation s'est produite depuis 50 ans. Sa durée de vie dans l'atmosphère est de l'ordre de 120 ans (tableau 2). Le mécanisme majeur de son élimination est sa photodissociation par le rayonnement solaire dans la stratosphère, où il est impliqué dans la chimie de la couche d'ozone et la décomposition de celle-ci. La contribution de N₂O a été évaluée à 6,1 % du forçage radiatif des gaz mélangés de façon homogène dans la troposphère à l'échelle du globe terrestre (tableau 2, IPCC, 2001).

L'ÉVALUATION DES ÉMISSIONS À L'ÉCHELLE DE LA PLANÈTE : LA CONTRIBUTION DES SOLS

Les évaluations actuelles des émissions de N₂O à l'échelle de la planète visent à équilibrer globalement le puits stratosphérique et l'augmentation du stock troposphérique (tableau 3: IPCC, 2001); elles montrent le rôle déterminant attribué aux sols qui contribuent à près de 70 % des sources estimées, complété par une part significative affectée aux océans alors que les émissions industrielles pèsent peu dans ce bilan global.

Tableau 1 - Potentiel de réchauffement global (PRG) de CH₄ et N₂O évalué sur une base massique et par comparaison au CO₂, sur différentes échelles de temps (IPCC, 2001)

Table 1 - CH₄ and N₂O Global Warming Potential (GWP) evaluated on a mass basis and expressed relative to that for CO₂ on different time scales (IPCC, 2001)

Gaz	Echelles de temps		
	20 ans	100 ans	500 ans
CO ₂	1	1	1
CH ₄	62	23	7
N ₂ O	275	296	156

LES MÉCANISMES DE PRODUCTION ET DE CONSOMMATION DE N₂O DANS LES SOLS

Les émissions de N₂O dans les sols ont été principalement attribuées à la dénitrification biologique: la réduction des nitrates en azote gazeux est accompagnée d'une proportion variable de N₂O: une estimation américaine ancienne (Pratt *et al.*, 1977) considérait que 5 à 10 % de l'azote dénitrifié étaient émis sous forme de N₂O. D'autres travaux (Aulack *et al.*, 1992) ont souligné la grande variabilité de cette proportion (0 à 100 %), sans proposer de nouvelle valeur guide. Hénault *et al.* (2001) ont mesuré des ratios allant de 9 à 90 % en condition de laboratoire sur un ensemble de sols du territoire français et soulignent que ces ratios sont des indicateurs du fonctionnement émetteur *in situ*.

L'oxydation de l'ammonium lors de la nitrification s'accompagne aussi d'une production de N₂O (Bremner et Blackmer, 1981), et accessoirement de NO. Des relations quantitatives ont pu être établies entre l'activité nitrifiante et l'intensité de ces émissions; Garrido *et al.* (2001) montrent que lors de la nitrification, les émissions de N₂O peuvent atteindre 1 % de l'azote oxydé dans un sol calcaire mais sont inférieures à 0,1 % dans d'autres sols, ce qui ne permet pas de définir une proportion de caractère général.

On peut encore mentionner que du N₂O est émis lors de la réduction dissimilatrice du nitrate en ammonium, transformation qui s'effectue en anaérobiose dans les milieux riches en matières organiques (Fazzolari *et al.*, 1990), dans les sols de marécage ou dans l'appareil digestif des animaux.

La littérature indique que les émissions de N₂O dans les sols de régions chaudes sont très dépendantes de la minéralisation d'azote qui conditionne le développement de la nitrification et de la dénitrification, tandis que sous climat tempéré et relativement humide, les conditions culturales et l'usage des fertilisants amènent à considérer la dénitrification comme la principale source d'émission (Smith et Arah, 1990).

LES MÉTHODES DE MESURE ET D'ÉVALUATION DES ÉMISSIONS DE N₂O

Différentes méthodes de mesures sont utilisables pour évaluer les émissions de N₂O à partir des sols (Bouwman, 1996). La plus utilisée demeure la méthode des chambres statiques installées sur le sol en place, avec des adaptations selon le couvert végétal. L'accumulation de N₂O sur une durée de l'ordre d'une heure permet d'évaluer des flux ponctuels dont le caractère fortement dispersé tant dans l'espace (distributions souvent log-normales) que dans le temps (forte variation avec la disponibilité en azote minéral et les conditions climatiques) oblige à multiplier les mesures. L'intégration de ces données dans le temps et l'espace constitue cependant la base des estimations d'émission à partir des espaces agricoles: la

Tableau 2 - Evolution de la concentration des principaux gaz à effet de serre mélangés de façon homogène à la troposphère et affectés par l'activité (d'après IPCC, 2001).**Table 2** - Evolution of concentration of the main well-mixed greenhouse gases resulting of human activities and estimation of their radiative

	CO ₂ Dioxyde de carbone	CH ₄ Méthane	N ₂ O Protoxyde d'azote	CFC-11 Chlorofluoro carbure-11	CFC-12 Chlorofluoro carbure-12
Concentration pré-industrielle	280 ppmv	700 ppbv	275 ppbv	0	0
Concentration en 1998	365 ppmv	1745 ppbv	314 ppbv	268 pptv	533 pptv
Augmentation annuelle	1,5 ppmv an ⁻¹ 0,4 % an ⁻¹	7 ppbv an ⁻¹ 0,4 % an ⁻¹	0,8 ppbv an ⁻¹ 0,25 % an ⁻¹	-1,4 pptv an ⁻¹ -0,5 % an ⁻¹	4,4 pptv an ⁻¹ 0,8 % an ⁻¹
Durée de vie (années)	5-200	12	114	45	100
Contribution au forçage radiatif ⁽¹⁾	1,46 W m ⁻² 60,0 %	0,48 W m ⁻² 19,8 %	0,15 W m ⁻² 6,1 %	0,07 W m ⁻² 2,9 %	0,17 W m ⁻² 7,0 %

ppmv, ppbv, pptv : respectivement partie par million en volume (10⁶), par milliard (10⁹) ou par trillion (10¹²). - ⁽¹⁾ : forçage radiatif global estimé à 2,43 W m⁻²

majorité des données d'émission actuellement disponibles dans la littérature repose sur cette méthodologie (Bouwman, 1996; de Klein *et al.*, 2001; Flessa *et al.*, 2002).

La mise au point et le développement des méthodes micrométéorologiques au cours des 10 dernières années ont permis de réaliser des chroniques de mesures intégrant mieux les variabilités temporelles et spatiales des émissions. Les comparaisons méthodologiques ont démontré que les deux méthodes conduites en parallèle donnent des résultats similaires (tableau 4). Les méthodes micrométéorologiques permettent de s'affranchir des problèmes de variabilité spatiale aux petites échelles, tandis que la méthode des chambres offre actuellement une meilleure sensibilité et permet de caractériser plus finement les effets des facteurs du milieu.

La grande variabilité des mesures d'émission de N₂O à partir des situations expérimentales, liée à la régulation des mécanismes mis en jeu, conduit à deux types de conséquences :

- d'une part la nécessité de mettre en place des expérimentations lourdes pour obtenir des estimations avec un degré de fiabilité suffisant : les données utilisées pour l'élaboration des facteurs d'émission reposent exclusivement sur des chroniques de données établies sur des durées couvrant l'année complète, voire sur plusieurs années, pour permettre d'intégrer les fluctuations temporelles (Bouwman, 1996; Flessa *et al.*, 2002);

- d'autre part la nécessité de développer des outils de modélisation permettant de rendre compte de cette variabilité du milieu.

Pour évaluer les émissions à l'échelle de larges territoires, notamment dans le cadre des inventaires nationaux, la méthode proposée par l'IPCC (1997) vise à estimer les seules émissions d'origine anthropique, c'est-à-dire suscitées par les activités humaines. Pour les émissions liées à l'agriculture, cette méthode repose sur la définition de facteurs d'émission applicables aux quantités d'azote

Tableau 3 - Estimation des différentes sources de N₂O au plan mondial, de l'accumulation troposphérique et du puits stratosphérique (e. m. : estimation moyenne et i. i. : intervalle d'incertitude en Tg ou 10⁶ t/an; IPCC, 2001, d'après Mosier *et al.*, 1998 et Kroeze *et al.*, 1999)**Table 3** - Estimation of different N₂O sources on the world, tropospheric accumulation and stratospheric well (average estimation and intervals of uncertainty in Tg or 10⁶ t yr⁻¹; IPCC, 2001, after Mosier *et al.*, 1998 and Kroeze *et al.*, 1999)

Sources	e. m.	i. i.
Sources Naturelles	3	1-5
Océans	0,6	0,3 – 1,2
Atmosphère (Oxydation de NH ₃)		
Sols tropicaux	3	2,2 – 3,7
Forêts humides	1	0,5 – 2,0
Savanes sèches		
Sols tempérés		
Forêts	1	0,1 – 2,0
Prairies	1	0,5 – 2,0
Sous total Sources Naturelles	9,6	4,6 – 15,9
Sources Anthropiques		
Sols agricoles	4,2	0,6 – 14,8
Combustion de biomasse	0,5	0,2 – 1,0
Sources industrielles	1,3	0,7 – 1,8
Animaux (pâturage)	2,1	0,6 – 3,1
Sous total Sources Anthropiques	8,1	2,1 – 20,7
Total des Sources	17,7	6,7 – 36,6
Accumulation (troposphère)	3,8	3,1 – 4,7
Puits totaux (stratosphère)	12,6	9 - 16

humaine; évaluation de leur contribution respective au forçage radiatif

forcing contribution (after IPCC, 2001)

HCFC-22 Hydrochloro fluorocarbure-22	HFC-23 Hydrofluoro carbure- 23	CF ₄ Fluorure de méthane (Per-fluorocarbure)	SF ₆ Hexafluorure de Soufre
0	0	40 pptv	0
132 pptv	14 pptv	80 pptv	4,2 pptv
5 pptv an ⁻¹	0,55 pptv an ⁻¹	1 pptv an ⁻¹	0,24 pptv an ⁻¹
3,8 % an ⁻¹	3,9 % an ⁻¹	1,2 % an ⁻¹	5,7 % an ⁻¹
12	260	> 50000	3200
0.03 W m ⁻²	0.002 W m ⁻²	0.003 W m ⁻²	0.002 W m ⁻²
1,2 %	< 0,1 %	0,1 %	< 0,1 %

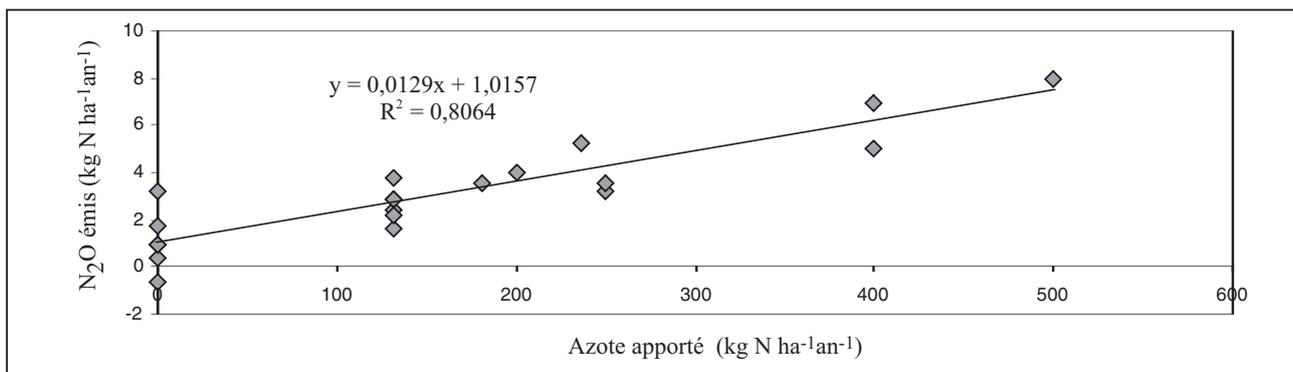
Tableau 4 - Comparaison des émissions de N₂O (g N-N₂O.ha⁻¹.j⁻¹) évaluées par méthodes des chambres et méthodes micrométéorologiques au cours de 3 campagnes de mesure (d'après Laville *et al.*, 1997; Laville *et al.*, 1999; Hénault *et al.*, à paraître)

Table 4 - comparison of N₂O emissions (g N-N₂O.ha⁻¹.d⁻¹) estimated by static chamber method and by micromet methods on 3 different series of measurement (after Laville *et al.*, 1997; Laville *et al.*, 1999; Hénault *et al.*, to be published)

Site	Méthodes		Méthode	
	micrométéorologiques		des chambres	
	Flux moyen	Variabilité	Flux moyen	Variabilité
Bourgogne	7,8	3,4 (44%)	6,9	4,3 (63%)
Landes	108,8	17,3 (22 %)	90,7	40,6 (42 %)
Faux Perche	52,7	25,9 (49%)	50,1	28,5 (57%)

Figure 1 - Emissions de N₂O en fonction des apports d'azote dans différentes expérimentations sur une année (sols non organiques, en cultures ou en prairies fauchées, recevant au plus 500 kg N.ha⁻¹.an⁻¹; d'après Bouwman, 1996)

Figure 1 - N₂O emissions in relation with nitrogen applications on one year in different experimental situations (non organic soils cultivated or in mown grassland and receiving no more than 500 kg N ha⁻¹ yr⁻¹; after Bouwman, 1996)



apportées au sol par les pratiques agricoles sur le territoire concerné au cours d'une année. Cette méthode découle de l'observation de relations de proportionnalité entre ces quantités d'azote apportées et l'intensité des émissions de N₂O. La relation établie par Bouwman (1996), sur un ensemble de données restreintes et après élimination des données jugées peu fiables (*figure 1*), est à la base du facteur d'émission de 1,25 (+/-1) % appliqué aux fertilisants azotés minéraux et organiques. Mosier *et al.* (1998) mentionnent que la fourchette de valeurs encadrant ce coefficient permet de rendre compte de 90 % des évaluations faites à partir des mesures disponibles. Cette méthode de base n'inclut pas les émissions des milieux non perturbés, ou faiblement perturbés par les activités humaines: ces émissions doivent être prises en compte si l'on veut évaluer la totalité des émissions issues d'un territoire.

Les compartiments azotés auxquels sont appliqués les facteurs d'émission sont évalués au niveau du pays ou de la région concernée selon des règles standardisées (IPCC, 2000). Le mode de calcul retenu actuellement prend en compte 3 types de sources de N₂O selon l'équation:

$$N_2O \text{ total} = N_2O \text{ direct sols} + N_2O \text{ direct animaux} + N_2O \text{ indirect}$$

avec:

- *N₂O direct sols*: émissions de N₂O issues des fertilisants minéraux et organiques, de la fixation biologique de l'azote et des résidus de récolte,
- *N₂O direct animaux*: émissions de N₂O par les pâturages et par la gestion des effluents hors épandages considérés comme fertilisants,
- *N₂O indirect*: émissions de N₂O issues principalement des dépôts atmosphériques et lors des transferts d'azote en solution (lessivage, ruissellement...).

Tableau 5 - Equations définies par Freibauer pour un inventaire régionalisé des émissions de N₂O par l'agriculture au niveau de l'Europe. (Freibauer, 2002)

Table 5 - Equations defined by Freibauer for a regionalised inventory of N₂O emissions from European agriculture. (Freibauer, 2002)

- | |
|---|
| <p>(1) En sols arables non organiques des régions sous climat océanique tempéré ou méditerranéen :</p> $E_{N_2O} = 0,6 (+/- 0,5) + 0,002 (+/- 0,002) N \text{ fertilisant} + 12,7 (+/- 2,8) C \text{ sol} - 0,24 (+/- 0,05) \text{ sable}$ <p>(2) En sols arables non organiques des régions sous climat pré-alpin, alpin ou sub-boréal :</p> $E_{N_2O} = 1,3 (+/- 2,1) + 0,03 (+/- 0,008) N \text{ fertilisant} + 280 (+/- 130) N \text{ sol}$ <p>(3) En sols de prairie non organiques des régions sous climat tempéré ou sub-boréal :</p> $E_{N_2O} = 2,4 (+/- 0,7) + 0,015 (+/- 0,003) N \text{ fertilisant}$ <p>(4) En sols organiques cultivés en prairie ou en céréales :</p> $E_{N_2O} = 7 (6-9) \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1} N-N_2O$ <p>(5) En sols organiques cultivés avec des cultures légumières ou des plantes à racines :</p> $E_{N_2O} = 20 (10-30) \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1} N-N_2O$ |
|---|

La taille de chaque compartiment azoté et les coefficients d'émission correspondants ont été définis à partir d'avis d'experts et des données scientifiques disponibles.

Cette méthode de base, dite par défaut, laisse aux organismes chargés des évaluations nationales la possibilité d'utiliser des méthodologies alternatives, qui doivent reposer sur des bases scientifiques et méthodologiques justifiées. En ce qui concerne les sols, Freibauer (2002) propose une méthode d'évaluation basée sur une série de 5 équations tirées d'une analyse statistique de l'ensemble des données d'émission collectées sur le territoire de l'Europe de l'Ouest (tableau 5). Cette méthode permet de prendre en compte quelques grandes caractéristiques du milieu : les grands types de climat et les principales variables du sol corrélables aux émissions. Freibauer propose cette méthode comme une alternative à la méthode IPCC pour l'évaluation des émissions au niveau de la communauté européenne.

L'ÉVALUATION DES ÉMISSIONS DE N₂O AU NIVEAU DU TERRITOIRE FRANÇAIS

Les données d'émission disponibles

En France les mesures d'émissions sont peu abondantes : jusque dans les années 1990, seules quelques données rapportaient des mesures d'émission de l'ordre de 100 g N.ha⁻¹ entre mars et septembre sur des sols cultivés en blé et de 1,1 à 2,6 kg N.ha⁻¹ sur les

mêmes sols en prairies (Germon et Couton, 1989). Des émissions dépassant 10 kg N.ha⁻¹ ont été mesurées au cours d'un cycle de maïs irrigué sur un sol sableux des Landes, qui réunissait des conditions particulièrement favorables à la dénitrification et aux émissions d'oxydes d'azote au cours de cette transformation (sol irrigué, riche en matière organique et de pH acide ; Jambert *et al.*, 1993). Dans un ensemble d'expérimentations récentes sur cultures de colza et de blé (tableau 6) Hénault *et al.* (1998 a & b) ont montré que les facteurs d'émission évalués sur la période où l'intensité des émissions est la plus forte sont plutôt dans la partie basse de la fourchette donnée par l'IPCC. Ces données indiquent par ailleurs (i) l'absence d'un effet de la forme des fertilisants azotés utilisés dans les essais, (ii) l'absence d'une différence d'émission sous 2 cultures (blé et colza) soumises à des fertilisations azotées et à des dynamiques de nutrition azotée comparables, (iii) l'existence d'une forte fluctuation inter-annuelle pour des mesures en un même site et en conditions semblables, (iv) un rôle important du facteur sol sur l'intensité des émissions qui sont significativement plus importantes dans un sol lessivé à caractère hydromorphe (Luvisol) que dans les autres sols de la même région. Ces caractéristiques d'émission ont été confirmées dans une série de mesures réalisées en Beauce et dans le Faux Perche limitrophe : les émissions sous culture de blé dans les sols limoneux de la Beauce centrale (Calcisols et Néoluvissols, AFES 1995) sont dans la partie basse des valeurs relevées dans la littérature (de l'ordre d'un kg N.ha⁻¹an⁻¹) et sont significativement plus élevées dans un Luvisol rédoxique représentatif du Faux Perche (Hénault *et al.*, à paraître).

Evaluation actualisée par la méthode IPCC

L'évaluation des émissions reposant sur la méthode IPCC est réalisée au niveau du territoire national et est régulièrement mise à jour par le CITEPA (Cellier et Laville, 1999 ; CITEPA 2002 ; tableau 7). Cette estimation fait ressortir trois postes prépondérants : les émissions directes liées aux apports de fertilisants minéraux qui représentent près d'un quart du total des émissions anthropiques ; l'ensemble des émissions à partir des déjections animales qui atteignent 54 Gg, soit près d'un tiers des émissions totales ; les émissions indirectes au cours du transfert vers les aquifères de surface ou profonds qui ont été estimées à 51 Gg, soit un autre tiers. Les émissions directes représentent la moitié des émissions totales.

Cette méthode d'évaluation appliquée depuis les années 1990 (tableau 8) indique une stabilité des estimations d'émission de N₂O liées à l'agriculture et une augmentation de leur part dans la production globale de N₂O, passée de 60 à près de 70 % au cours des dernières années à la suite d'une réduction des émissions liées à l'industrie.

Pertinence et limites de la méthode d'évaluation de l'IPCC ; les perspectives d'amélioration

Cette méthode a été élaborée pour évaluer les émissions à l'échelle de larges territoires et plus particulièrement pour l'élaboration des inventaires nationaux. Elle offre l'avantage d'une méthode de référence, à partir de laquelle les estimations obtenues peuvent être comparées à celles calculées à l'aide d'autres méthodes d'évaluation, éventuellement plus pertinentes. Les facteurs d'émission proposés et les coefficients utilisés pour estimer les différentes sources d'azote à prendre en compte sont proposés "par défaut", c'est-à-dire en l'absence de facteurs spécifiques ou d'autres modes d'évaluation mieux adaptés et vérifiés pour la région considérée. Ces paramètres sont susceptibles d'évoluer en fonction de l'état des connaissances. Pour relativiser les estimations réalisées avec cette méthode, il importe d'en rappeler la pertinence et les limites.

L'incertitude sur l'estimation des émissions est importante et découle principalement de celle sur les coefficients d'émission (+/- 80 %) à laquelle s'ajoutent les incertitudes sur les quantités d'azote auxquelles s'appliquent ces coefficients. Les experts de l'IPCC ont proposé d'augmenter les marges d'incertitude sur les coefficients d'émission pour prendre en compte le caractère lognormal des distributions de mesures observées; les limites de l'intervalle de confian-

ce au seuil de probabilité de 95 % pour le facteur de 1,25 sont proposées à 0,25 et 6 % (IPCC, 2000). Plusieurs remarques confortent cependant cette méthode de base : (i) celle de Mosier *et al.* (1998) déjà mentionnée, indiquant que 90 % des données d'émission directe observées se situent dans l'intervalle défini autour du coefficient d'émission (1,25 +/- 1 %); (ii) le travail de Freibauer (2002) dont la méthodologie proposée donne une estimation à partir de l'agriculture de l'Union Européenne de 37 % supérieure à celle obtenue par la méthode IPCC; compte tenu d'un certain nombre de données volontairement sous estimées, les deux valeurs apparaissent en bon accord. En ce qui concerne l'évaluation à partir du territoire français les résultats sont identiques avec ces deux méthodologies de calcul (0,17 Tg.an⁻¹).

En ce qui concerne les limites de la méthodologie IPCC, elles sont inhérentes à certains choix initiaux et à sa conception. Ainsi les émissions à partir des sols sont considérées comme la résultante d'un niveau de base, correspondant à l'activité biologique d'un sol non perturbé, augmenté des émissions dérivant des activités humaines, dues à la fertilisation ou aux pratiques agricoles perturbant cette activité biologique. L'équation de Bouwman (1996, figure 1), reprise par

Tableau 6 - Effets comparés de différents facteurs agronomiques sur la proportion d'azote appliquée émise sous forme de N₂O au cours des 5 mois suivant l'apport des fertilisants

Table 6 - Comparison of the effect of different agricultural factors on the proportion of applied nitrogen lost as N₂O over a five month period following the N fertilization

Facteurs étudiés*			% de N appliqué émis en N ₂ O
agronomique	climatique	pédologique	
Effet de la forme des fertilisants azotés apportés			
Colza fertilisé (170 kg N ha ⁻¹) - nitrate d'ammonium - sulfate d'ammonium - urée - nitrate de potassium	Nord Est de la France - 1997	Luvisol ⁽¹⁾	0,53 0,55 0,42 0,42
Effet du niveau de fertilisation azotée apportée			
Colza fertilisé, dose - suboptimale - suboptimale + 100 kg ha ⁻¹	Nord Est de la France - 1995	Moyenne de 3 types de sols différents	0,33 0,53
Effet des fluctuations interannuelles (conditions climatiques liées à l'année)			
Colza avec fertilisation suboptimale	Nord Est de la France - 1995 - 1997	Luvisol ⁽¹⁾	2,49 0,53
Effet lié aux caractéristiques des sols			
Colza avec fertilisation suboptimale	Nord Est de la France - 1995	Luvisol ⁽¹⁾ Rendosol ⁽¹⁾ Calcosol ⁽¹⁾	2.49 0.18 0.66

* : les facteurs étudiés sont mentionnés en caractères gras.

(1) Luvisol : sol lessivé ; Rendosol : sol superficiel sur craie ; Calcosol : sol brun superficiel sur plateau calcaire.

Tableau 7 - Evaluation des émissions de N₂O (exprimées en N₂O) à partir des sols agricoles, calculées par la méthodologie IPCC (1997) à l'échelle planétaire et pour la France (année 2001)

¹ d'après Mosier *et al.* (1998); ² estimation 2001, d'après CITEPA (2002; S. Béguier, communication personnelle); ³ Tg ou millions de t; ⁴ Gg ou milliers de t; ⁵ facteur d'émission porté de 5 à 8 kg N.ha⁻¹ (IPCC 2000); ⁶ facteur d'émission variable selon le mode de gestion des effluents

Table 7 - Estimation of N₂O emissions (expressed in N₂O) from agricultural soils in accordance with the IPCC methodology (1997) on the world and on the France territory (in 2001)

¹ after Mosier *et al.*, (1998); ² estimation in 2001, after CITEPA (2002; S. Béguier, personal communication); ³ Tg: 10⁶ t; ⁴ Gg: 10³ t; ⁵ emission factor increased from 5 to 8 kg N ha⁻¹ (IPCC 2000); ⁶ emission factor variable with the effluent management methods

	Facteurs d'émission ⁽¹⁾ (%)	Emissions globales ⁽¹⁾ (Tgan ⁻¹) ⁽³⁾	Emissions pour la France ⁽²⁾ (Ggan ⁻¹) ⁽⁴⁾
Emissions directes par les sols agricoles			
Fertilisants minéraux	1,25 (0,25 – 2,25)	0,9 (0,18 – 1,6)	40,95 (8,2 – 73,7)
Epannage des effluents d'élevage	1,25 (0,25 – 2,25)	0,6 (0,12 – 1,1)	25,0 (5 – 45)
Fixation symbiotique	1,25 (0,25 – 2,25)	0,1 (0,02 – 0,2)	7,45 (1,5 – 13,4)
Résidus de culture	1,25 (0,25 – 2,25)	0,4 (0,07 – 0,7)	9,6 (1,9 – 17,3)
Sols organiques cultivés ⁽⁵⁾	8 kg N ha ⁻¹ an ⁻¹	0,1 (0,02 – 0,2)	0
Total		2,1 (0,4 – 3,8)	83 (16,6 – 149,4)
Productions animales			
Pâturage	2,0 (0,5 - 3)	2,1 (0,5 – 3,1)	19,1 (4,8 – 28,7)
Gestion des effluents ⁽⁶⁾	0,01 – 2,0		9,4 (-, -)
Total		2,1 (0,6 – 3,1)	28,5 (14,2 – 38,1)
Emissions indirectes			
Dépôts atmosphériques	1,0 (0,2 – 2,0)	0,3 (0,06 – 0,6)	9,9 (1,9 – 19,8)
Lessivage de nitrates et ruissellement	2,5 (0,2 – 12)	1,6 (0,13 – 7,7)	50,9 (4,1 – 244,3)
Traitement des eaux	1,0 (0,2 – 12)	0,2 (0,04 – 2,6)	0,9 (0,2 – 6)
Total		2,1 (0,23 - 10,9)	61,7 (6,2 – 270,1)
Autres sources (territoires d'Outre Mer...)			2,6 (-)
Total général		6,3 (1,2 – 17,9)	175,8 (37 – 457,6)

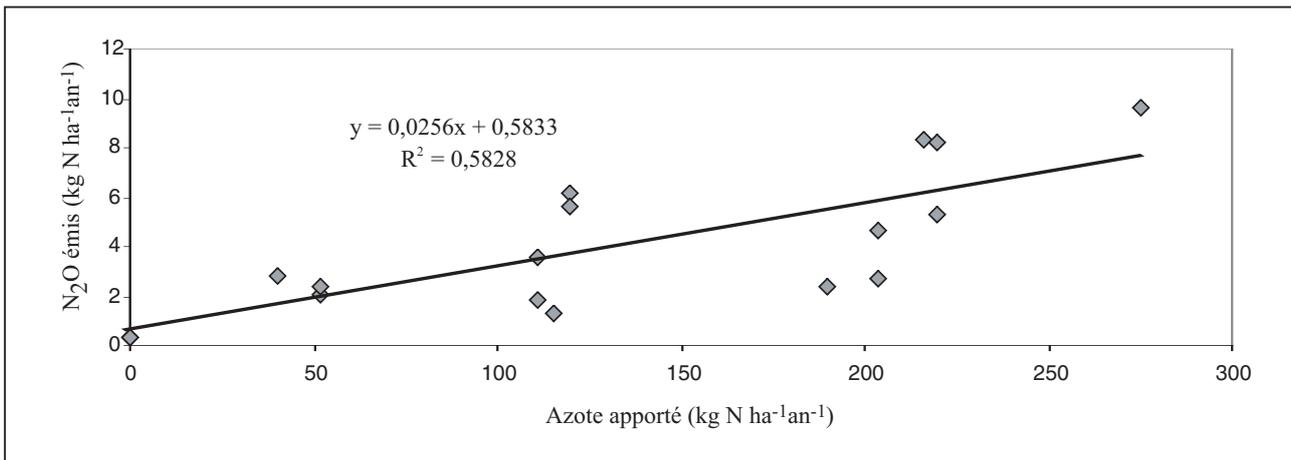
Tableau 8 - Evaluation des émissions annuelles de N₂O au niveau du territoire français depuis 1990 selon la méthode IPCC (en Gg ou milliers de t de N₂O; CITEPA, mise à jour 2002).

Table 8 - Annual evaluation of N₂O emissions for France territory since 1990 according to the IPCC methodology (Gg or 10³ t N₂O; CITEPA, 2002)

Années	Total National	Part de l'agriculture		Part du changement d'utilisation des sols et de la sylviculture	
	10 ³ tan ⁻¹	10 ³ tan ⁻¹	% total	10 ³ tan ⁻¹	% total
1990	306	190	62,1	17,4	5,7
1995	305	179	58,7	17,4	5,7
1997	311	184	59,2	17,4	5,6
1998	288	183	63,5	17,4	6,0
1999	270	183	67,8	17,4	6,4
2000	262	180	68,7	17,4	6,6
2001	259	176	68,0	17,4	6,7

Figure 2 - Emissions de N₂O en fonction des apports d'azote dans différentes situations expérimentales en Allemagne sur une année (d'après Flessa *et al.*, 2002)

Figure 2 - N₂O emissions in relation with nitrogen applications on one year in different experimental situations in Germany (After Flessa *et al.*, 2002)



Mosier *et al.* (1996) admet un niveau de base des émissions dans les sols non fertilisés de 1 kg N-N₂O.ha⁻¹an⁻¹. Au niveau du territoire français si l'on prend ce niveau d'émission pour les sols cultivés et les prairies, ce sont potentiellement 47000 t de N₂O qui ainsi ne sont pas comptabilisées dans les bilans d'émission à partir des seuls sols agricoles, soit de l'ordre d'un quart des estimations attribuées à l'agriculture.

La principale limite dans l'évaluation des émissions par la méthodologie IPCC découle de l'application généralisée d'un coefficient d'émission unique (1,25 +/- 1 %) qui apparaît contradictoire avec certaines données régionalisées des émissions montrant la nécessité d'une prise en compte des conditions liées à l'environnement physique (sol et climat) ou aux systèmes de culture. La prise en compte d'un facteur d'émission largement applicable présente un grand intérêt dans une démarche d'évaluation globale ; le besoin de coefficients diversifiés en fonction des situations, devient indispensable dès que l'on se place dans une démarche d'analyse des émissions et de définition d'une stratégie pour les limiter.

La nécessité d'une approche régionalisée des émissions en fonction du milieu physique ressort notamment des travaux synthétisés par Flessa *et al.* (2002) dans le Sud Ouest de l'Allemagne qui permettent de définir un facteur d'émission de 2,5 % obtenu à partir d'une vingtaine de situations expérimentales (*figure 2*), laissant penser que les conditions de cette région sont plus favorables aux émissions que les conditions moyennes de l'échantillon retenu par Bouwman (1996). Cette même nécessité de prise en compte des caractéristiques du milieu, et notamment des conditions climatiques, ressort de l'approche de Freibauer (2002) qui est amenée à distinguer les zones sous climat océanique tempéré ou méditerranéen d'une part, et les zones sous climat pré-alpin, alpin ou sub-boréal d'autre part : dans les sols de ces zones sou-

mis régulièrement au gel une part importante des émissions se produit lors du dégel du sol au printemps. La distinction de ces deux zones se traduit par un rôle différent des apports de fertilisants azotés dans l'évaluation des émissions (équations 1 et 2, *tableau 5*). L'impact du milieu sol/climat sur les capacités d'émission des sols ressort aussi des quelques travaux conduits sur les capacités d'émission des sols tropicaux : selon Prather *et al.* (IPCC 2001), les travaux de Hall et Matson (1999) indiquent que dans certains sols où la productivité est principalement limitée par la disponibilité en phosphore, les émissions de N₂O et de NO peuvent être de 10 à 100 fois plus importantes pour une même quantité d'azote apportée que dans les sols sous climats tempérés où la productivité est principalement limitée par l'azote. La mise en évidence de capacités d'émission diversifiées en fonction de propriétés intrinsèques des sols est soulignée dans d'autres travaux : ainsi Lemke *et al.* (1998) dans l'Ouest canadien soulignent que les propriétés liées au sol ont un impact plus marqué que les paramètres climatiques ou les pratiques culturales. A partir du territoire français, Hénault *et al.* (1998, 2001) ont montré la variabilité des capacités d'émission de quelques sols, attribuée principalement à la plus ou moins grande capacité de leurs microflores à transformer N₂O en N₂. Ces caractéristiques devraient pouvoir être prises en considération dans les outils d'évaluation de ces émissions à des échelles agronomiques allant de la parcelle à la région (Hénault *et al.*, à paraître).

Les émissions liées à l'agriculture peuvent aussi apparaître fortement dépendantes de la conduite des cultures. Les travaux réalisés sur les prairies principalement en Europe du Nord ont conduit à retenir un facteur d'émission de 2 % pour l'azote excrété par les animaux au pâturage (Mosier *et al.*, 1998). Ces facteurs d'émission sont fortement dépendants du mode d'exploitation de la prairie et des

Tableau 9 - Facteurs d'émission pour différents types de culture en Grande Bretagne (Cellier et Laville, 1999, d'après Skiba *et al.*, 1996)**Table 9** - Emissions factors for different crops in Great Britain (Cellier and Laville, 1999, after Skiba *et al.*, 1996)

Cultures	Facteurs d'émission (%)	Cultures	Facteurs d'émission (%)
Blé d'hiver	0,5	Prairie pâturée	3,1
Orge d'hiver ⁽¹⁾	0,5	Prairie fauchée	1,0
Colza ⁽¹⁾	0,5	Pomme de terre	1,6
Orge de printemps	0,8	Betterave à sucre ⁽³⁾	1,6
Autres céréales ⁽²⁾	0,8	Cultures maraîchères ⁽³⁾	1,6
		Cultures fourragères ⁽³⁾	1,6

⁽¹⁾: *idem blé d'hiver*; ⁽²⁾: *idem orge de printemps*; ⁽³⁾: *idem pomme de terre*

⁽¹⁾: *as winter wheat*; ⁽²⁾: *as spring barley*; ⁽³⁾: *as potatoes*

Tableau 10 - Evaluation des émissions directes de N₂O au niveau du territoire français à partir des fertilisants minéraux azotés, à l'aide des facteurs d'émission proposés par Skiba *et al.*, (1996). (Hypothèses: les prairies permanentes sont pâturées et les prairies temporaires sont fauchées: le facteur d'émission des autres cultures est celui de l'IPCC, 1,25 %)**Table 10** - Evaluation of N₂O direct emissions for France territory from nitrogenous mineral fertilizers according to the emission factors proposed by Skiba *et al.*, (1996). (Hypotheses: permanent grassland are grazed and temporary grasslands are mown; the emission factor for the other crops is 1,25 %)

Cultures	Surfaces (*)	N apporté (*)	Facteurs d'émission	N – N ₂ O émis
	(10 ³ ha)	(10 ³ t)		(10 ³ t)
Blé tendre	4 897	835	0,005	4,175
Maïs grain	1 754	276	0,008	2,208
Prairies permanentes	6 912	267	0,031	8,277
Colza	1 176	203	0,005	1,015
Orge – escourgeon	1 522	195	0,005	0,975
Prairie temporaire	2 873	181	0,01	1,810
Maïs fourrage	1 385	103	0,008	0,824
Blé dur	339	57	0,005	0,285
Betterave industrielle	409	51	0,016	0,816
Autres cultures	3 958	201	0,0125	2,512
Ensemble	25 225	2 369		22,897

(*) sources: Agreste, Ministère Agriculture, 2003

conditions de tassement des sols liées au pâturage. Cette distinction transparaît dans la synthèse de Skiba *et al.* (1996) qui partant de mesures sur quelques grands types de cultures au Royaume Uni, - prairies, blé d'hiver, orge de printemps et pomme de terre – établissent des facteurs d'émission pour chacun d'eux et les extrapolent aux principales cultures, regroupant ainsi les plantes qui ont des dynamiques semblables de développement et de nutrition azotée (tableau 9); ces données indiquent que sous cultures de céréales dont la fertilisation vise à couvrir des besoins azotés importants sur une courte période au printemps, les émissions sont moins élevées que pour des plantes dont le développement et la nutrition azotée sont plus étalés sur l'année. Cette tendance est confirmée par Flessa *et al.* (2002) qui observent des facteurs d'émission sensiblement plus élevés sous cultures de pommes de terre que sous cultures de céréales. Cette typologie est une voie possible pour affiner l'évaluation des émissions en fonction des couverts végétaux et des

pratiques culturales associées.

L'application au niveau du territoire français des coefficients d'émission définis par Skiba *et al.* (1996) conduit à une estimation des émissions directes à partir des fertilisants minéraux de 22,9 10³ t d'azote ou 36 10³ t de N₂O (tableau 10), soit une diminution de 15 % par rapport à l'estimation de 40,95 10³ t de N₂O sur la base du mode de calcul de l'IPCC (tableau 7): la diminution des émissions évaluées sur cultures de céréales est compensée par l'estimation sur les prairies permanentes. Cette comparaison montre l'intérêt de renforcer nos bases de données pour avoir d'une part une idée plus précise de la pertinence des évaluations faites actuellement, et pour définir d'autre part les marges de manœuvre possibles en matière de limitation de ces émissions.

Deux autres postes dans l'évaluation des émissions de N₂O attirent plus particulièrement l'attention: la contribution des déjections animales qui peut être à l'origine de larges surestimations: Van

Moortel *et al.* (2000) ont évalué à près de 50 % cette surestimation pour l'ensemble du territoire belge. Dans le cas présent les rejets animaux qui servent de base au calcul conduisent à un rejet azoté annuel à partir du territoire français de 2,2 10⁶ t d'azote. Une analyse plus fine du cheptel et de ses rejets d'une part, de leur mode de gestion et de répartition sur les sols d'autre part, pourrait conduire à une révision des émissions qui en sont issues, sans toutefois en changer l'ordre de grandeur.

Une source considérée comme très importante dans les bilans nationaux est le poste affecté aux émissions lors du transfert des produits azotés dans les eaux souterraines ou de surface ; il admet un entraînement de 30 % de l'azote apporté vers ces eaux avec un coefficient d'émission de 2,5 %. Les bases de cette estimation apparaissent peu fournies ; la vérification expérimentale de ces données s'avère indispensable.

Ce constat d'un mode d'estimation des émissions trop global conduit actuellement à tenter de mettre au point d'autres outils d'évaluation ou de prévision du fonctionnement émetteur des sols : l'utilisation de modèles apparaît indispensable pour avoir à la fois une évaluation des émissions sans avoir à multiplier les mesures et une caractérisation de la dynamique, très fluctuante, des émissions pour tenter de les maîtriser : la mise au point de modèles robustes à caractère opérationnel se développe à différentes échelles agronomiques, de la parcelle à l'échelle régionale (Li *et al.*, 1996 ; Renault *et al.*, 1999 ; Conen *et al.*, 2000 ; Hénault *et al.*, à paraître).

LES ÉMISSIONS DE N₂O ET LE BILAN DE CARBONE DES SOLS

L'effet des pratiques de préservation ou de restockage de carbone : le non travail du sol

Au plan fonctionnel les émissions de N₂O sont en interaction avec le cycle du carbone à plusieurs niveaux. Dans les sols où les émissions sont liées à la dénitrification, l'intensité de cette transformation est directement dépendante de la quantité de carbone assimilable. La disponibilité en matière organique apparaît comme un élément favorisant l'intensité des émissions de N₂O dans différentes situations. La relation statistique de Freibauer (2002) établie à partir d'un ensemble de données européennes relie directement l'intensité des émissions à la teneur en carbone organique des sols ; de même, l'intensité des émissions est plus importante en sols de prairie que dans des sols cultivés de même texture, mais généralement moins riches en matière organique (Germon et Couton, 1989 ; Hénault *et al.*, 2001). Cependant la disponibilité en carbone peut aussi favoriser la réduction de N₂O en N₂ : cet effet éventuellement contradictoire sur la production de N₂O par les sols est actuellement l'objet de travaux complémentaires.

On peut aussi mentionner que la disponibilité du milieu en carbone fermentescible est un élément favorable à la réduction dissi-

milatrice du nitrate en ammonium, transformation qui peut entrer en compétition avec la dénitrification dans les milieux riches en matière organique, et qui conduit aussi à une production secondaire de N₂O (Fazzolari *et al.*, 1990).

Le non travail du sol, ou les techniques simplifiées de travail du sol, sont présentés comme des voies possibles d'augmentation des capacités de stockage de carbone dans la couche de surface (Richard *et al.*, 2002). La question est posée de l'impact sur les capacités d'émission de N₂O. Différents travaux ont montré que le non travail du sol est souvent accompagné d'une stimulation marquée de la dénitrification (Germon *et al.*, 1994), qui peut induire une augmentation des émissions de N₂O : au Canada, dans deux essais sur 3 ans, Mac Kenzie *et al.* (1998) ont observé une augmentation moyenne de 2,65 kg N-N₂O ha⁻¹an⁻¹ en système labouré à 4,8 kg N-N₂O ha⁻¹an⁻¹ en système de non labour dans la première situation, et de 2,05 à 2,45 N-N₂O ha⁻¹an⁻¹ dans l'autre. Dans un autre essai de longue durée (9 ans) aux USA, l'augmentation d'émission dans le sol non labouré est moins marquée : moins de 10 % (Robertson *et al.*, 2000). Dans un travail de modélisation à l'échelle des USA, Mummey *et al.* (1998) confortent l'idée d'une plus grande capacité d'émission de N₂O en conditions de non travail du sol.

Les émissions de N₂O dans le bilan du potentiel de réchauffement global des sols cultivés : équivalence en capacité de déstockage de carbone

Le *tableau 11* rapporte les contributions respectives au pouvoir de réchauffement global (PRG) des 3 principaux gaz à effet de serre évaluées à partir de la méthode IPCC au niveau du territoire français. Avec 15,2 % de participation au PRG, N₂O apparaît ainsi le second gaz contributeur à l'effet de serre, précédant le méthane dont la contribution est évaluée à 14,1 %.

La contribution estimée des émissions agricoles aux émissions anthropiques totales de N₂O (hors changement d'usage des sols, *tableau 8*) est de 68 % et ces émissions sont pratiquement toutes issues du sol. Cette contribution doit être replacée dans le cadre global de la contribution des sols à l'effet de serre, et notamment dans celui de la gestion des stocks de carbone (Arrouays *et al.*, 2002). Le PRG des 176 10³ t de N₂O d'origine agricole émises annuellement est équivalent à celui de 52 10⁶ t de CO₂ soit 14,2 10⁶ t de C, ce qui correspond à un déstockage annuel de près de 510 kg C.ha⁻¹ de terre agricole¹ : si on ajoute les 47 10³ t de N₂O qui seraient émises naturellement et qui sont non comptabilisées, les quantités correspondantes sont alors de 18 10⁶ t de C soit l'équivalent de près 650 kg C.ha⁻¹ de terre agricole et par an. Si l'on raisonne uniquement sur les émissions directes de N₂O (sols et productions animales), sur lesquelles on pense pouvoir intervenir par des pratiques culturales,

1 : sur la base de 27 856 000 ha de Surface Agricole Utilisée (Agreste, 2003)

Tableau 11 - Contribution des émissions de CO₂, CH₄ et N₂O au pouvoir de réchauffement global (PRG) au niveau du territoire français et évolution au cours de la dernière décennie. (D'après CITEPA, 2002).

Définition des équivalences de CH₄ et N₂O en CO₂ et en C (Tg ou millions de t; Gg ou milliers de t), et évaluation de leur contribution au réchauffement global (PRG sur 100 ans avec CO₂ = 1, CH₄ = 23 et N₂O = 296 ; UTCF : Utilisation des Terres, Changement et Forêts)

Table 11 - Contribution of CO₂, CH₄ and N₂O emissions to the GWP for France territory between 1990 and 2001. (After CITEPA, 2002).

Equivalence between CH₄ and N₂O in CO₂ and C (Tg or 10⁶ t; Gg or 10³ t), and evaluation of their contribution to the Global Warming Potential (GWP for 100 yr with CO₂ = 1, CH₄ = 23 and N₂O = 296 ; UTCF : Land Use, Land Use Change and Forestry)

Années	1990	2001
CO₂ net UTCF inclus		
Tg CO ₂	340	345
Tg équiv C	93	94
% de PRG	65,90 %	68,30 %
CH₄ net UTCF inclus		
Gg CH ₄	3345	3082
Tg équiv CO ₂	77	71
Tg équiv C	21	19
% de PRG	14,90 %	14,10 %
N₂O net UTCF inclus		
Gg N ₂ O	306	259
Tg équiv CO ₂	91	77
Tg équiv C	24	21
% de PRG	17,60 %	15,20 %
Autres gaz UTCF inclus		
Tg équiv CO ₂	7,7	11,8
Tg équiv C	2,1	3,2
% de PRG	1,50 %	2,30 %
PRG net UTCF inclus		
Tg équiv CO ₂	516	505
Tg équiv C	141	138

Remarque : les inventaires d'émissions réalisées dans le cadre de l'UNFCCC utilisent encore les équivalences CO₂ = 1, CH₄ = 21 et N₂O = 310, résultant des précédents rapports de l'IPCC (1995).

Remarque : Emission inventories realised for UNFCCC are using the previously defined equivalences (IPCC, 1995) :

CO₂ = 1, CH₄ = 21 et N₂O = 310

les émissions estimées correspondantes sont de 111,5 10³ t soit l'équivalent d'un déstockage de 9106 t de C ou 320 kg C.ha⁻¹ de terre agricole et par an. Ces quelques chiffres soulignent le poids des émissions de N₂O dans le PRG lié au fonctionnement des sols et de l'agriculture : la réduction des émissions de N₂O peut peser au moins autant sinon plus que les éventuelles capacités de restockage de carbone, avec un caractère définitif que n'ont pas ces capacités de restockage ; cela renforce l'intérêt à porter aux possibilités de réduction des émissions de N₂O dans les scénarii de lutte contre l'accroissement de l'effet de serre.

VERS DES STRATÉGIES DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE N₂O

Les stratégies de réduction des émissions de N₂O à partir des sols ont été déjà examinées, montrant que des mesures techniques peuvent être proposées (Germon *et al.*, 1999). De façon globale, toutes les mesures conduisant à ajuster la fertilisation azotée aux seuls besoins de la végétation et à éliminer la présence d'azote minéral excédentaire dans le sol apparaissent favorables à la réduction des émissions. Une conséquence abusive du mode d'évaluation des émissions basé uniquement sur les apports d'azote est de laisser penser que les stratégies pour les limiter ne peuvent passer que par une diminution des apports d'azote et que l'on néglige de ce fait celles qui pourraient faire appel à la connaissance des plus ou moins grandes capacités émettrices des sols et aux modifications possibles des modes de gestion.

Cependant étant donné (i) les interactions entre la dynamique du carbone et les émissions de N₂O, (ii) les interactions entre les capacités d'oxydation du méthane et le cycle de l'azote, et (iii) le poids des pratiques culturales et de la fertilisation dans la consommation de carburants fossiles, il apparaît indispensable de prendre en considération les émissions de N₂O dans le cadre d'un bilan de réchauffement global des systèmes de culture. Nous présentons en conclusion une telle synthèse réalisée par une équipe américaine à partir d'essais de longue durée (tableau 12).

Ce tableau apporte des indications sur le poids de différentes pratiques culturales et montre (i) que le passage d'un système «conventionnel» à des pratiques moins intensives se traduit par un moindre déstockage de carbone plutôt que par un restockage : (ii) que certaines pratiques, et notamment la mise en place de cultures pérennes, dont on peut discuter de l'intérêt, peuvent engendrer un effet positif sur le bilan de réchauffement global (c'est à dire un PRG négatif) ; (iii) que l'effet bénéfique enregistré par la remise en forêt de sols cultivés s'atténue avec le temps : important les premières années il devient pratiquement nul lorsque la forêt vieillit. Chacune des don-

Tableau 12 - Décomposition du pouvoir de réchauffement global (PRG) d'une rotation de différents systèmes de culture en fonction des pratiques agricoles et des modes de gestion des sols (équivalents C : kg ha⁻¹an⁻¹) (d'après G.P. Robertson, E.A. Paul et R.R. Harwood, 2000)

Table 12 - GWP decomposition for different crop rotations with different agricultural practices and different soil managements in C equivalent (kg ha⁻¹yr⁻¹) (after G.P. Robertson, E.A. Paul et R.R. Harwood, 2000)

Mode de gestion	Poids des composantes impliquées dans le PRG (équivalents kg C ha ⁻¹ an ⁻¹)						PRG Net
	Carbone du sol (1)	Engrais (2)	Chaulage azotés (2)	Carburants (2)	N ₂ O (3)	CH ₄ (3)	
Rotation maïs-soja-blé							
Système conventionnel	0	74	63	44	142	- 11	311
Semis direct	- 300	74	93	33	153	- 14	38
Faibles intrants	- 109	24	52	54	164	- 14	172
Système organique	- 79	0	0	52	153	- 14	112
Cultures pérennes							
Luzerne	- 439	0	218	22	161	- 16	- 54
Peuplier	- 319	14	0	5	27	- 14	- 286
Retour de terres agricoles vers la forêt							
Retour récent	- 600	0	0	0	41	- 16	- 575
Retour ancien	0	0	0	0	57	- 68	- 11

(1) : C du sol stocké ou déstocké par les pratiques culturales : (2) équivalents de carbone du sol déstocké par les apports d'intrants : (3) émission de N₂O ou consommation de CH₄ (émissions négatives) par les sols, transformées en équivalents C.

(1) : soil C stored or released by agricultural practices : (2) equivalent of released C from soil due to inputs : (3) N₂O emissions or CH₄ consumption (negative emissions) by soils in C equivalents.

nées de ce tableau est certainement à discuter en fonction des conditions propres à notre agriculture et à notre territoire. Cette approche souligne une nouvelle fois le rôle important de N₂O dans ces bilans quelles que soient les pratiques agricoles mises en œuvre.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES 1995 - Référentiel pédologique 1995 - D. Baize & M.C. Girard Coord., INRA, Paris. 332p.
- Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P. (eds), 2002 - Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Expertise collective INRA, Paris. 332 p.
- Aulakh M.S., Doran J.W., Mosier A., 1992 - Soil denitrification : significance, measurement and effect of management. *Adv. Soil Sci.* 18, 1-57.
- Bouwman E.G., 1996 - Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 46, 53-70.
- Bremner J.M., Blackmer A.M., 1981 - Terrestrial nitrification as a source of atmospheric nitrous oxide. In *Denitrification, Nitrification and Atmospheric Nitrous Oxide*, C.C. Delwiche ed., J. Wiley, N.Y., 151-170.
- Cellier P., Laville P., 1999 - Les émissions de N₂O par les sols agricoles en France : quelle évaluation possible ? *C.R. Acad. Agri.* Fr. 85, 6, 177-192.
- CITEPA, 2002 - Inventaires des émissions de gaz à effet de serre en France au titre

- de la convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Paris, 48 p.
- Conen F., Dobbie K.E., Smith K.A., 2000 - Predicting N₂O emissions from agricultural land through related parameters. *Glob. Change Biol.*, 5, 471-426.
- de Klein C.A.M., Sherlock R.R., Cameron K.C., van der Weerden T.J., 2001 - Nitrous oxide emissions from agricultural soils in New Zealand. A review of current knowledge and directions for future research. *J. Roy. Soc. New Zeal.*, 31, 543-574.
- Fazzolari E., Mariotti A., Germon J.C., 1990 - Nitrate reduction to ammonia : a dissimilatory process in *Enterobacter amnigenus*. *Can. J. Microbiol.*, 36, 779-785.
- Flessa H., Ruser R., Dörsch P., Kamp T., Jimenez M.A., Munch J.C., Beese F., 2002 - Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, N₂O) from two farming systems in southern Germany. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 91, 175-189
- Freibauer A., 2002 - Regionalised inventory of biogenic greenhouse gas emissions from European agriculture. *Europ. J. Agronomy*, à compléter
- Garrido F., Hénault C., Gaillard H., Pérez S., Germon J.C., 2001 - N₂O and NO emissions by agricultural soils with low hydric potentials. *Soil Biol. Biochem.* 34, 559-575.
- Germon J.C., Couton Y., 1989 - Nitrogen balance and gaseous nitrogen losses in soils. In *Management systems to reduce impact of nitrates*, Elsevier Applied Sciences, Londres, 16-31
- Germon J.C., Taureau J.C., Thomas J.M., 1994 - Effets des méthodes simplifiées de travail du sol sur les transformations de l'azote et leurs conséquences sur le lessivage des nitrates, p. 125-154 - *In G. Monnier, G. Thévenet, B. Lesaffre ed.*

- Simplification du travail du sol, les Colloques de l'INRA, Paris. 172 p.
- Germon J.C., Hénault C., Garrido F., Reau R., 1999 - Mécanismes de production, régulation et possibilités de limitation des émissions de N₂O à l'échelle agronomique. C.R. Acad. Agri. Fr. 85, 6, 148-162.
- Hall S.J., Matson P.A., 1999 - Nitrogen oxide emissions after N additions in tropical forests; *Nature*, 400, 152-155.
- Hénault C., Chèneby D., Heurlier K., Garrido F., Perez S., Germon J.C., 2001 - Laboratory kinetics of soil denitrification are useful to discriminate soils with potentially high levels of N₂O emission on the field scale. *Agronomie*, 21, 713-723.
- Hénault C., Germon J.C., 2000 - NEMIS, a predictive model of denitrification on the field scale. *Eur. J. Soil Sci.*, 51, 257-270.
- Hénault C., Devis X., Page S., Justes E., Reau R., Germon J.C., 1998a - Nitrous oxide emission under different soil and land management conditions. *Biol. Fertil. Soils*, 26, 199-207.
- Hénault C., Devis X., Lucas J.L., Germon J.C., 1998b - Influence of different agricultural practices (Type of crop - form of N-fertilizer) on soil nitrous oxide emissions. *Biol. Fertil. Soils*, Special issue, Soils and Climate Change, 27, 299-306.
- Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., Van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A., 2001 - *Climate Change 2001: the scientific basis*. Cambridge Univ. Press., 880p.
- IPCC 2001 *Climate change 2001 - The scientific basis*. Cambridge Univ. Press. 882p.
- IPCC 2000 - *Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories*. Chapitre 4: Agriculture, 94p.
- IPCC 1997 - *Guidelines for national greenhouse gas inventories*, OCDE, Paris.
- IPCC 1995 - *Climate change 1994 - Radiative forcing of climate change*. Cambridge Univ. Press. 339 p.
- IPCC 1992 - *Climate change 1992 - The supplementary report to the IPCC assessment*. Cambridge Univ. Press. 100p.
- IPCC 1990 - *Climate change 1990 - Cambridge Univ. Press*.
- Jambert C., Delmas R., Labroue L., Chassin P., Plenet D., 1993 - Effet de la fertilisation sur l'émission de composés azotés gazeux dans le système maïs-culture-pinède des Landes de Gascogne. *CR Acad Sci Paris*, 316, 623-627.
- Kroeze C., Mosier A., Bouwman L., 1999 - Closing the N₂O budget; a retrospective analysis. *Global biogeochem. Cycles*, 13, 1-8.
- Laville P., Hénault C., Renault P., Cellier P., Devis X., Oriol A., Germon J.C., 1997 - Field comparison of nitrous oxide emission measurement using micrometeorological and chambers methods. *Agronomie*, 17, 375-388.
- Laville P., Jambert C., Cellier P., Delmas R., 1999 - Measurements of nitrous oxide fluxes in a fertilised maize crop by micrometeorological and chamber methods. *Agric. For. Meteorol.*, 96, 19-38.
- Lemke R.L., Izaurrealde R.C., Malhi S.S., Arshad M.A., Nyborg M., 1998 - Nitrous oxide emissions from agricultural soils of the Boreal and Parkland regions
- Li C., Narayanan V., Harris R.C., Li C.S., 1996 - Model estimates of nitrous oxide emissions from agricultural lands in the United States. *Glob. Biogeochem. Cycl.*, 10, 297-306.
- MacKenzie A.F., Fan M.X., Cadrin F., 1998 - Nitrous oxide emission in three years as affected by tillage, corn-soybean-alfalfa rotations, and nitrogen fertilization. *J. Environ. Qual.* 27, 698-703.
- Mosier A., 1998 - Soil processes and global change. *Biol. Fertil. Soils*, Special issue, Soils and Climate Change, 27, 221-229.
- Mosier A., Kroeze C., Nevison C., Oenema O., Seitzinger S., van Cleemput O., 1998 - Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. OECD/IPCC/IEA phase II development of IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory methodology. *Nutrient Cycling Agroecosyst.*, 52, 225-248.
- Mosier A., Duxbury J.M., Freney J.R., Heinemeyer O., Minami K., 1996 - Nitrous oxide emission from agricultural fields: assessment, measurement and mitigation. *Plant and Soil*, 181, 95-108.
- Mummey D.L., Smith J.L., Bluhm G., 1998 - Assessment of alternative soil management practices on N₂O emissions from US agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 70, 79-87.
- Prather M., Ehhalt D., 2001 - Atmospheric chemistry and greenhouse gases. *In Climate Change 2001, Scientific basis*. J.T. Houghton ed, Cambridge Univ. Press, pp 239-287.
- Pratt P.F., Barber J.C., Corrin M.L., Goering J., Hauck R.D., Johnston H.S., Klutke A., Knowles R., Nelson D.W., Pickett R.C., Stephens E.R., 1977 - Effect of increased nitrogen fixation on stratospheric ozone. *Climatic Change* 1, 109-135.
- Renault P., 1999 - Les modèles opérationnels d'émission de N₂O par les sols aux échelles régionales. *C.R. Acad. Agri. Fr.* 85, 6, 163-176.
- Richard G., Roger-Estrade J., Mary B., Guichard L., Balesdent J., Saby N., 2002 - Modification du mode de travail du sol et d'implantation des cultures. *In Stocker du carbone dans les sols agricoles de France*, INRA ed, 210-214.
- Robertson G.P., Paul E.A., Harwood R.R., 2000 - Greenhouse gases in intensive agriculture; contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science*, 289, 1922-1924.
- Skiba U.M., McTaggart I.P., Smith K.A., Hargreaves K.J., Fowler D., 1996 - Estimates of nitrous oxide emissions from soil in the U.K. *Energy Convers. Manag.*, 37, 1303-1308.
- Smith K.A., Arah J.R.M., 1990 - Losses of nitrogen by denitrification and emissions of nitrogen oxides from soils. *Fert. Soc. Proc.*, 299, 1-34.
- Van Moortel E., Boeckx P., Van Cleemput O., 2000 - Inventory of nitrous oxide emissions from agriculture in Belgium. Calculations according to the revised 1996 Intergovernmental Panel on Climate Change guidelines. *Biol Fertil Soils*, 30, 500-509.

