Diffusion de C₂H₂ et de N₂O dans le sol en vue de la mesure de la dénitrification

Geneviève Lalisce-Grundmann, Alain Chalamet

► To cite this version:

Geneviève Lalisce-Grundmann, Alain Chalamet. Diffusion de C₂H₂ et de N₂O dans le sol en vue de la mesure de la dénitrification. *Agronomie*, 1987, 7 (5), pp.297-301. hal-00884994

HAL Id: hal-00884994

<https://hal.science/hal-00884994>

Submitted on 1 Jan 1987

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Diffusion de C_2H_2 et de N_2O dans le sol en vue de la mesure de la dénitrification

Geneviève LALISSE-GRUNDMANN & Alain CHALAMET

Laboratoire de Biologie des Sols, Ecologie Microbienne, U.A. 697, Université Claude Bernard, Lyon I, 43, bd du 11 Novembre 1918, F 69622 Villeurbanne Cedex

RÉSUMÉ

Dans le cadre de l'étude de la dénitrification par la méthode acétylène, la diffusivité du sol régit le transfert des gaz N_2O et C_2H_2 . Nos résultats montrent que la diffusion apparente de l'acétylène est dépendante de la porosité libre α , pour un même sol à différentes teneurs en eau. Les valeurs obtenues pour D_s/D_o sont proches des résultats donnés par les modèles de diffusion. On peut compter obtenir en une heure des concentrations en acétylène supérieures à 0,1 p. 100 dans les dix premiers centimètres du sol, en apportant 10-12 p. 100 (vol/vol) d'acétylène dans une chambre de diffusion placée au-dessus du sol. Ceci valide l'utilisation de la diffusion de l'acétylène à travers la surface du sol pour mesurer la dénitrification. A noter par contre, que la diffusion apparente du N_2O ne semble pas suivre les modèles classiques, aux concentrations où il se trouve dans l'atmosphère du sol.

Mots clés additionnels : *Diffusivité du sol, dénitrification, méthode acétylène, N_2O .*

SUMMARY

Diffusion of C_2H_2 and N_2O in soil in relation to the measurement of denitrification.

Soil diffusivity governs N_2O and C_2H_2 transfer through soil during the measurement of denitrification. Our results showed that the C_2H_2 diffusion coefficient of a soil depended on its air-filled porosity at different water contents. Our measurements were close to the results given by diffusion models. With a diffusion chamber above the soil surface containing 10-12 % (v/v) C_2H_2 , acetylene concentrations over 0.1 % were obtained in soil atmosphere samples taken in the top 10 cm of soil after 1 h diffusion. This validates the use of acetylene diffusion from the soil surface as a method for measuring denitrification. The apparent diffusion of N_2O , however, did not follow classical diffusion models in the range of concentrations observed in a denitrifying soil atmosphere.

Additional key words : *Soil diffusivity, denitrification, acetylene inhibition method, N_2O .*

I. INTRODUCTION

La technique de blocage de la N_2O -réductase par l'acétylène, puis le dosage du N_2O produit dans ces conditions, est actuellement la méthode la plus utilisée pour estimer le processus de dénitrification *in situ* (RYDEN *et al.*, 1979; CHAN & KNOWLES, 1979; LIPPOLD *et al.*, 1981; KLEMEDTSSON *et al.*, 1977; LENSİ & CHALAMET, 1982; LALISSE-GRUNDMANN *et al.*, 1983).

La technique utilisée pour introduire l'acétylène dans le sol consiste, en général, à faire circuler un flux de ce gaz à des profondeurs, à des débits et pendant des temps variables selon les auteurs (RYDEN *et al.*, 1979; RYDEN & DAWSON, 1982; ROLSTON *et al.*,

1982). Une autre technique a aussi été employée (LENSİ & CHALAMET, 1982; LALISSE-GRUNDMANN *et al.*, 1983), où l'acétylène pénètre simplement par diffusion à partir d'une chambre de diffusion à la surface du sol. Une mise au point s'impose sur la concentration en acétylène atteinte au site supposé de la dénitrification : est-elle suffisante pour inhiber la N_2O -réductase ? Quelle est, dans la direction opposée, la diffusion du gaz N_2O produit par la dénitrification ?

Le but de cette étude est donc : (1) mesurer les concentrations en acétylène obtenues par diffusion en fonction de la profondeur dans le sol, (2) comparer, dans les conditions les plus proches possibles du terrain, la diffusion apparente de C_2H_2 et de N_2O en fonction de la porosité libre du sol.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Cette étude a été réalisée sur un sol de la région lyonnaise en Dombes. C'est un limon sablo-argileux battant (tabl. 1).

TABLEAU 1
Caractéristiques du sol.
Soil characteristics.

	% de terre fine
Sable grossier	2,1
Sable fin	32,7
Limon grossier	32,3
Limon	14,1
Argile	16,9
Matière organique	1,27
pH	6,6

Les enceintes utilisées sont identiques à celles employées dans une étude précédente pour l'estimation de la dénitrification *in situ* et au laboratoire (LALISSE-GRUNDMANN *et al.*, 1983). Ce sont des tubes en PVC opaque, de 10 cm de diamètre et de longueur variable selon les expériences, que l'on enfonce dans le sol. Nous avons pu ramener au laboratoire les colonnes de sol en place à l'intérieur des enceintes. Là, les colonnes de sol ont été ajustées à différents taux d'humidité, mesurés gravimétriquement en fin d'expérience sur les 5 premiers centimètres de sol. La température a été maintenue sensiblement constante à $20 \pm 0,5$ °C durant toutes les expériences.

(1) Pour les mesures de concentration en C_2H_2 en fonction de la profondeur, une feuille de caoutchouc souple placée sur la partie supérieure de la colonne délimite un volume gazeux où C_2H_2 est introduit à divers pourcentages (5 à 12 p. 100 en volume/volume) à la seringue à gaz. Après des laps de temps de 1 h ou de 2 h selon les expériences, l'atmosphère du sol est prélevée dans des canules en verre fermées à une extrémité, enfoncées au préalable à différentes profondeurs. L'acétylène est ensuite dosé par chromatographie dans ces échantillons gazeux.

(2) Pour les estimations des coefficients de diffusion, des enceintes de 15 cm de long, contenant des colonnes de sol de 10 cm, ont été utilisées. Les parties supérieures et inférieures du cylindre sont recouvertes de caoutchouc et deux septums permettent, à l'aide d'une seringue à gaz, soit d'introduire, soit de prélever des gaz dans les deux chambres ainsi délimitées. L'acétylène (30 ml) est introduit dans la chambre supérieure et l'oxyde nitreux (50 μ l) dans la chambre inférieure. La disparition respective des deux gaz est suivie par chromatographie sur des périodes de l'ordre de 2 heures.

Les dosages sont réalisés grâce à des appareils Gir-del 30 à détection à capture d'électrons (source ^{63}Ni) pour le N_2O (LALISSE-GRUNDMANN *et al.*, 1983), à détection à ionisation de flamme pour C_2H_2 .

Figure 1

Exemple de cinétique de disparition de l'acétylène.

Typical kinetics of C_2H_2 disappearance in the chamber.

Nous avons choisi de suivre uniquement la disparition du gaz testé dans une des chambres, méthodologie employée par DE JONG *et al.* (1983), plutôt que celle qui consiste à suivre simultanément la disparition et l'apparition du gaz dans chacune des chambres. Cette dernière technique est plus facilement applicable pour les composés radioactifs, ^{85}Kr par exemple (BALL *et al.*, 1981).

L'équation $\text{Log } C_t = a + bt$, (C_t étant la concentration respective des gaz au temps t), est appliquée aux concentrations en C_2H_2 trouvées au-delà d'une dizaine de minutes suivant l'injection, et b en est déduit.

La constante de diffusion est estimée par la relation (DE JONG *et al.*, 1983) :

$$Ds = (0,992 + 0,3489 L \alpha A/V) LVb/A$$

où A : section de l'échantillon en cm^2

L : hauteur de l'échantillon en cm

V : volume de la chambre en cm^3

b : $d \text{ Log } C_t / dt$, pente de la droite obtenue expérimentalement après 10 mn.

α : espace des pores remplis d'air (porosité libre) en $\text{cm}^3 \text{ cm}^3$ de sol. Ds est obtenu en $\text{cm}^2 \cdot \text{mn}^{-1}$.

Le terme entre parenthèses est un terme correctif déjà proposé par BAKKER & HIDDING (1970). Dans notre cas, la valeur du terme $L\alpha A/V$ étant proche de celle donnée par DE JONG *et al.* (1983), ceci a guidé le choix de la relation utilisée. Ce facteur correctif est de l'ordre de 1,2 à 1,6, ce qui paraît en accord avec les résultats de ROLSTON (communication personnelle).

La porosité totale est calculée à l'aide des densités réelles et apparentes :

$$\Phi = (D_{\text{réelle}} - D_{\text{app.}}) / D_{\text{réelle}}$$

La densité apparente est mesurée par la méthode du cylindre, la densité réelle étant fixée à $2,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. La porosité totale est de l'ordre de 0,41 dans tous les échantillons testés. La porosité libre, α , est obtenue en soustrayant la teneur en eau de l'échantillon (en $\text{cm}^3 \text{ eau} \cdot \text{cm}^{-3}$) de cette porosité totale..

Après l'estimation de Ds , la diffusivité relative Ds/D_0 est calculée, D_0 étant la diffusion dans l'air. Deux relations empiriques, ne différant que par le

TABLEAU 2

Comparaison des différents coefficients de diffusion obtenus.

Comparison of the diffusion coefficients calculated using two different relationships : (1) GILLILAND (1963), (2) in SALLAM et al. (1984).

	D ₀ cm ² .sec ⁻¹ (293 °K)		
	Relation (1)	Relation (2)	Littérature
C ₂ H ₂ GILLILAND (1963)	0,141	0,136	non trouvé
REID et al. (1977)	0,159	0,153	
N ₂ O GILLILAND (1963)	0,126	0,121	0,151 (JURY et al., 1982)
REID et al. (1977)	0,143	0,137	* 0,136 (BARR et WATTS, 1972) * 0,162 (PRITCHARD et CURRIE, 1982)

* Détermination expérimentale.

terme en T, permettent de calculer les coefficients D₀ relatifs à N₂O et à C₂H₂ :

$$D_0 = \frac{0,0043 \cdot T^{3/2}}{P(V_1^{1/3} + V_2^{1/3})^2} \cdot \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{1/2}$$

(GILLILAND 1963) (1)

$$D_0 = \frac{0,001 \cdot T^{1,75}}{P(V_1^{1/3} + V_2^{1/3})^2} \cdot \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{1/2}$$

relation de FULLER dans SALLAM et al. (1984) (2)

D₀ : diffusivité du gaz dans l'air en cm².sec⁻¹
 T : température en °K
 M₁ et M₂ : poids moléculaire des composés 1 et 2
 P : pression en atmosphère
 V₁ et V₂ : volumes de diffusion moléculaire des gaz 1 et 2.

On a respectivement :

P = 1 atm
 T = 293 °K
 V₁(air) = 29,9 (GILLILAND, 1963), ou 20,1 (REID et al., 1977)
 M₁(air) = 28,8
 V₂(N₂O) = 36,4 (GILLILAND, 1963), ou 35,9 (REID et al., 1977)
 M₂(N₂O) = 44
 V₂(C₂H₂) = 37
 M₂(C₂H₂) = 26.

La valeur de V₂(C₂H₂) a été calculée à partir des volumes de diffusion atomique des éléments constitutifs : 3,7 ou 1,98 pour H, 14,8 ou 16,5 pour C, respectivement d'après GILLILAND (1963) ou REID et al. (1977).

Différentes valeurs de D₀ ont été obtenues (tabl. 2), selon que l'on utilise les 2 relations (1) ou (2) avec respectivement les volumes de diffusion moléculaire donnés par GILLILAND (1963) ou REID et al. (1977). Pour la suite des calculs nous prendrons les valeurs obtenues avec la relation (1) en utilisant les valeurs de diffusion moléculaire par REID et al. (1977), qui sont proches de celles données dans la littérature pour le N₂O.

Deux modèles de diffusion seront testés : celui de PENMAN (1940) :

$$D_s/D_0 = 0,66 \alpha$$

et celui de MILLINGTON (1959) modifié, comme l'ont fait SALLAM et al. (1984), équivalent à :

$$D_s/D_0 = \alpha^{10/3} / \Phi^2$$

III. RÉSULTATS-DISCUSSION

A. Diffusion de l'acétylène

Les résultats des expériences relatives à la diffusion de l'acétylène à différentes profondeurs en fonction du temps sont consignés dans les tableaux 3 et 4.

Nous nous intéresserons aux 10 premiers centimètres de sol car des dosages en sol cultivé nous ont montré que c'est dans cette tranche de sol que se trouve essentiellement le nitrate. Un pourcentage de 7 à 8 p. 100 (volume/volume) de C₂H₂ dans la chambre semble suffisant pour atteindre le taux de 0,1 p. 100 de C₂H₂ dans l'atmosphère du sol, généralement admis comme étant suffisant pour bloquer la N₂O-réductase (YOSHINARI et al., 1977 ; SMITH et al., 1978). Une marge de sécurité importante est atteinte si l'on utilise des concentrations de l'ordre de 10-12 p. 100 et si l'on opère en deux temps : une première action de C₂H₂ durant une heure, suivie d'une remise en atmosphère normale pour éviter l'accumulation de

TABLEAU 3

Taux d'acétylène (vol/vol) obtenus par diffusion, en fonction de la profondeur pour une humidité du sol de 13,7 p. 100. Les mesures ont été effectuées 1 h après l'apport du gaz dans la chambre supérieure.

Percentage of acetylene at different depths (water content 13.7 %). Diffusion took place for 1 h before measurements were done.

% acétylène dans la chambre supérieure	5	6	12,4
Profondeur (cm)			
1,5	0,18	0,2	2,5
4,5	0,08	0,16	1,7
7,5	0,04	0,1	1,4

TABLEAU 4

Taux d'acétylène (vol/vol) dans des colonnes de sol (1 à 6), à 2 humidités différentes, en fonction de la profondeur. Les mesures ont été effectuées soit 1 h, soit 2 h après l'apport de forts taux d'acétylène dans la chambre supérieure (6,5 à 8 p. 100).

Percentage of acetylene (vol/vol) at different depths in 6 soil columns at two water content levels. Measurements were done 1 or 2 h after high concentrations of acetylene (6.5-8 %) were injected in the diffusion chamber.

Humidité 19,9 ‰						
Chambre supérieure	Colonne 1 7,8 ‰		Colonne 2 8,6 ‰		Colonne 3 8 ‰	
Profondeur (cm)	1 h	2 h	1 h	2 h	1 h	2 h
3	0,23	1,5	0,28	1,08	0,33	1,14
6	0,16	0,77	0,16	0,72	0,09	1,16
9	0,07	0,71	0,07	0,58	0,05	1,3

Humidité 13,2 ‰						
Chambre supérieure	Colonne 4 6,5 ‰		Colonne 5 6,5 ‰		Colonne 6 7,8 ‰	
Profondeur (cm)	1 h	2 h	1 h	2 h	1 h	2 h
3	1,43	2,06	2,33	3,58	0,24	1,57
6	0,18	0,61	1,49	3,43	0,17	0,81
9	0,05	0,23	0,49	0,46	0,11	0,43

gaz divers (CO₂ en particulier) dans la chambre de mesure, puis une nouvelle période d'action d'une heure. Dans ces conditions, la technique d'introduction de C₂H₂ dans les sols que nous employons (LALISSE-GRUNDMANN *et al.*, 1983) est parfaitement applicable. Elle présente un certain nombre d'avantages pour les mesures *in situ* : (1) elle est d'une grande maniabilité puisqu'elle nécessite le minimum de matériel sur le terrain. Elle demande le minimum de préparation du site ; en particulier, elle supprime la contrainte des canules enfoncées dans le sol ; (2) elle perturbe au minimum l'atmosphère du sol, contrairement à la circulation du gaz dans le sol qui risque d'entraîner un renouvellement de cette atmosphère.

B. Mesure des coefficients de diffusion de C₂H₂ et de N₂O dans le sol

Les cinétiques de disparition des gaz nous indiquent que 7 à 10 mn après l'injection, les concentrations en N₂O et en C₂H₂ décroissent exponentiellement en fonction du temps (fig. 1). Ceci est conforme à la théorie de la diffusion (TAYLOR, 1949 ; CURIE, 1960 ; BAKKER et HIDDING, 1970).

Les résultats des mesures des coefficients de diffusion apparents de C₂H₂ et de N₂O dans le sol, D_s, et de la diffusivité relative, D_s/D_o, sont consignés dans le tableau 5. Nous négligerons les possibilités d'interférence entre la diffusion de N₂O et de C₂H₂ dans le sol.

Pour mesurer le coefficient de diffusion des gaz dans un sol déterminé ou bien l'influence, sur ce coefficient, d'un paramètre tel que la porosité, le retrait, etc..., les auteurs utilisent un gaz non réactif avec le milieu : un gaz rare, Kr par exemple (DE JONG *et al.*, 1983 ; BALL *et al.*, 1981), un gaz synthétique, le fréon par exemple, qui a une faible solubilité dans l'eau et

TABLEAU 5

Coefficients de diffusion apparents et diffusivité relative dans le sol étudié, de C₂H₂ et de N₂O en fonction de α .

Apparent diffusion coefficients and soil relative diffusivity for C₂H₂ and N₂O as a function of the air-filled porosity.

	α cm ³ .cm ⁻³	D _s 10 ⁻³ cm ² .s ⁻¹	D _s /D _o
C ₂ H ₂	0,373	6,20	0,0389
	0,310	3,77	0,0237
	0,290	2,70	0,0170
	0,280	2,18	0,0137
	0,253	1,30	0,0082
N ₂ O	0,373	2,23	0,0156
	0,311	1,78	0,0125
	0,310	1,92	0,0134
	0,290	0,59	0,0041

aucune interaction biologique avec le sol (SALLAM *et al.*, 1984). Le problème posé est un peu différent si l'on s'intéresse à des gaz non inertes, l'oxygène par exemple (TAYLOR, 1949 ; BAKKER et HIDDING, 1970 ; LAI *et al.*, 1976). En fait les mesures que nous avons réalisées avec C₂H₂ et N₂O correspondent à des coefficients de diffusion apparents. Ce coefficient intervient directement sur le dégagement des gaz du sol et par conséquent sur la mesure de dénitrification par piégeage des gaz à la surface du sol.

Nos résultats montrent que le comportement des deux gaz devra être dissocié.

L'acétylène dont le coefficient de diffusion apparent diminue nettement avec la porosité libre du sol, se comporte comme d'autres gaz non réactifs : hydrogène (CURRIE, 1960), fréon (SALLAM *et al.*, 1984). Malgré la solubilité importante de l'acétylène dans l'eau, le tracé obtenu pour D_s/D_o = f(α) est une droite d'équation :

$$D_s/D_o = 0,261 \alpha - 0,0584 \quad r^2 = 0,99.$$

Le modèle de PENMAN (1940) D_s/D_o = 0,66 α surestime très nettement la diffusivité relative de l'acétylène. Le modèle modifié de MILLINGTON (1959), D_s/D_o = $\alpha^{10/3}/\Phi^2$ donne lui des valeurs 4 à 5 fois supérieures à nos mesures expérimentales. L'ajustement de nos valeurs à ce modèle nécessite un exposant de 4,8, alors que SALLAM *et al.* (1984) devaient diminuer leur valeur à 3,1.

Par contre N₂O présente une diffusivité apparente encore plus faible que celle obtenue avec l'acétylène (tabl. 5). Soulignons que les expériences relatives à ce gaz ont été conduites volontairement à une concentration (100 vpm) beaucoup plus faible que celle de l'acétylène (10 000 vpm) ; elle est de l'ordre de grandeur des concentrations en N₂O dans le sol citées dans la littérature (BURFORD *et al.*, 1981). Dans ces conditions, les interactions du N₂O avec le milieu peuvent être importantes :

- solubilité dans l'eau (WEISS & PRICE, 1980) ;
- rétention sur les argiles en milieu sec (CHALAMET & CHAUCHARD, 1976) ;
- réduction en N₂ par les microorganismes dénitrifiants, propriété qui a été utilisée dans la méthodologie d'estimation de la dénitrification (GARCIA, 1974).

La diffusion apparente de N_2O dans le sol étudié est donc très difficile à cerner, aussi nous n'y avons pas appliqué les modèles de diffusion existants.

IV. CONCLUSION

Dans le cadre de la mesure de la dénitrification sur le sol en place, la diffusion apparente de C_2H_2 est suffisante pour permettre l'établissement de taux de C_2H_2 supérieurs à 0,1 p. 100 en 1 h, si la chambre de diffusion contient 10 p. 100 de C_2H_2 environ.

Par contre aux concentrations où le N_2O a été mesuré dans les macropores du sol, sa diffusion semble limitée de façon importante par l'intervention de processus physico-chimiques et biologiques. Il est clair, d'après ces résultats, que les mesures de dénitrification pratiquées sur des temps courts, ne sont inter-

prétables que si l'activité dénitrifiante a eu effectivement lieu dans une zone peu profonde du sol, 10 cm environ. Cette mise en évidence soulève la question de la représentativité du flux de N_2O par rapport au processus de dénitrification, qui serait ainsi le plus souvent mesuré par défaut et dépendrait des propriétés physiques du sol (diffusivité, tortuosité, fissures). Ceci pourrait expliquer une part de la très grande variabilité spatiale observée sur les flux de N_2O mesurés sur le terrain (FOLORUNSO & ROLSTON, 1984).

Reçu le 10 juin 1986.

Accepté le 5 février 1987.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée grâce à la participation financière de CdF Chimie-AZF et du ministère de l'environnement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bakker J., Hidding A. P., 1970. The influence of soil structure and air content on gas diffusion in soils. *Neth. J. agric. Sci.*, 18, 37-48.
- Ball B. C., Harris W., Burford J. R., 1981. A laboratory method to measure gas diffusion and flow in soil and other porous materials. *J. Soil Sci.*, 32, 323-333.
- Barr R. F., Watts H., 1972. Diffusion of some organic and inorganic compounds in air. *J. Chem. Eng. Data*, 17, 45-46.
- Burford J. R., Dowdell R. J., Crees R., 1981. Emission of nitrous oxide to the atmosphere from direct-drilled and ploughed clay soils. *J. Sci. Food Agric.*, 32, 219-223.
- Chalamet A., Chauchard J., 1976. Sorption des oxydes d'azote sur les sols. Etude par sorption concurrentielle de l'influence de l'humidité sur la rétention de N_2O . *Ann. Chim.*, 1, 303-308.
- Chan W. K., Knowles R., 1979. Measurement of denitrification in two freshwater sediments by an *in situ* acetylene inhibition method. *Appl. environ. Microbiol.*, 37, 1067-1072.
- Currie J. A., 1960. Gaseous diffusion in porous media. Part I. A non-steady state method. *British J. appl. Phys.*, 11, 314-317.
- De Jong E., Douglas J. T., Goss M. J., 1983. Gaseous diffusion in shrinking soils. *Soil Sci.*, 136, 10-18.
- Folorunso O. A., Rolston D. E., 1984. Spatial variability of field-measured denitrification gas fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48, 1214-1219.
- Garcia J. L., 1974. Réduction de l'oxyde nitreux dans les sols de rizières du Sénégal : mesure de l'activité dénitrifiante. *Soil Biol. Biochem.*, 11, 37-46.
- Gilliland D. W., 1963. *Chemical Engineers Handbook*, Perry Ed., McGraw-Hill Book Company, New York.
- Jury W. A., Letey J., Collins T., 1982. Analysis of chamber methods used for measuring nitrous oxide production in the field. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 250-256.
- Klemetsson L., Svensson B. H., Lindenberg T., Rosswall T., 1977. The use of acetylene inhibition of nitrous oxide reductase in quantifying denitrification in soils. *Swedish J. agric. Res.*, 7, 179-185.
- Lai S., Tiedje J. M., Erickson A. E., 1976. *In situ* measurement of gas diffusion coefficient in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, 3-6.
- Lalisse-Grundmann G., Corman A., Chalamet A., 1983. Etude quantitative de l'effet simultané de la température et de l'humidité sur la dénitrification. *Rev. Ecol. Biol. Sol.*, 20, 1-15.
- Lensi R., Chalamet A., 1982. Denitrification in water-logged soils : *in situ* temperature-dependent variations. *Soil Biol. Biochem.*, 14, 51-55.
- Lippold H., Forster I., Hagemann O., Matzel W., 1981. Messung der Denitrifizierung auf Grünland mit Hilfe der Gaschromatographie und der $15 N$ Technik. *Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd.*, 25, 79-86.
- Millington R. J., 1959. Gas diffusion in porous media. *Science*, 130, 101-103.
- Penman H. L., 1940. Gas and vapor movement in soil. II. The diffusion of carbon dioxide through porous solids. *J. Agric. Sci.*, 30, 570-581.
- Pritchard D. T. et Currie J. A., 1982. Diffusion coefficients of carbon dioxide, nitrous oxide, ethylene and ethane in air and their measurement. *J. Soil Sci.*, 33, 175-184.
- Reid R. C., Prausnitz, Sherwood T. K., 1977. *The properties of gas and liquids*. Ed. McGraw-Hill, 3d edition.
- Rolston D. E., Sharpley A. N., Toy D. W., Broadbent F. E., 1982. Field measurement of denitrification. III. Rates during irrigation cycles. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 289-296.
- Ryden J. C., Dawson R. P., 1982. Evaluation of the acetylene inhibition technique for measurement of denitrification in grassland soils. *J. Sci. Food Agric.*, 38, 1197-1206.
- Ryden J. C., Lund L. J., Focht D. D., Letey J., 1979. Direct measurement of denitrification loss from soil : development and application of field methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43, 110-118.
- Sallam A., Jury W. A., Letey J., 1984. Measurement of gas diffusion coefficient under relatively low air-filled porosity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48, 3-6.
- Smith M. J., Firestone M. K., Tiedje J. M., 1978. The acetylene inhibition method for short-term measurement of soil denitrification and its evaluation using nitrogen 13 . *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42, 611-615.
- Taylor S. A., 1949. Oxygen diffusion in porous media as a measure of soil aeration. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 14, 55-61.
- Weiss R. F., Price B. A., 1980. Nitrous oxide solubility in water and seawater. *Marine Chem.*, 8, 347-359.
- Yoshinari T. R., Hynes R., Knowles R., 1977. Acetylene inhibition of nitrous oxide reduction and measurement of denitrification and nitrogen fixation in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 9, 177-183.