

Emissions *in situ* de N₂O d'un ferralsol argileux malgache cultivé en système sous semis direct ou labour traditionnel

M. Rabenarivo⁽¹⁾, J. Andriamiamiantraferana⁽²⁾, R. Michellon⁽³⁾, N. Moussa⁽³⁾,
A. Brauman⁽⁴⁾, J. Toucet⁽⁴⁾ et L. Chapuis-Lardy⁽¹⁾

1 IRD UMR 210 Eco&Sols / LRI-SRA - Université d'Antananarivo, BP 434, 101 Antananarivo, Madagascar

2 ESSA, département Agronomie, BP 175, Campus Universitaire, 101 Antananarivo, Madagascar

3 ONG Tafa, BP 266, 110 Antsirabe, Madagascar

4 IRD UMR 210 Eco&Sols, 2 place Viala, bâtiment 12, 34060 Montpellier cedex 1, France

RÉSUMÉ

Les activités agricoles contribuent aux émissions d'oxyde nitreux (N₂O), un puissant gaz à effet de serre. Cette étude décrit les émissions de N₂O dans des systèmes de culture de soja sous semis direct sous couverture végétale (SCV) ou avec labour traditionnel pratiqué à Madagascar. Les teneurs en azote minéral et en eau dans le sol, principaux facteurs de contrôle des processus de production du N₂O dans un sol cultivé, ont été mesurées au champ en même temps que les émissions réelles de N₂O. Les teneurs en azote minéral sont faibles et analogues pour les 2 systèmes. Les résultats montrent que le sol tend à être plus humide sous SCV que sous labour en début de saison des pluies mais que les écarts d'humidité entre les 2 systèmes SCV et labour sont limités durant la saison des pluies. L'humidité du sol peut atteindre 50-60 %, permettant des conditions propices à la production de N₂O par dénitrification. Les émissions *in situ* de N₂O restent faibles (< 30 g N-N₂O j⁻¹ ha⁻¹), sans doute par manque d'azote minéral. Les émissions sont fortement variables ; la différence entre traitements n'est significative que pour une seule date de mesure sur sept, le labour dans ce cas émettant un peu plus de N₂O que le semis direct.

Mots clés

Sols tropicaux, Madagascar, gaz à effet de serre, oxyde nitreux (N₂O), semis direct, labour

SUMMARY

N₂O FLUXES FROM A MALAGASY CLAYEY SOIL CULTIVATED ON DMC OR CONVENTIONAL TILLAGE

Agriculture directly contributes to the increase of the atmospheric concentration of nitrous oxide (N₂O), a powerful greenhouse gas. The present study focuses on field N₂O emissions from soybean cultures in a direct seeding mulch-based cropping (DMC) and a conventional tillage system in Madagascar. Control factors of N₂O production such as soil mineral nitrogen and water contents were measured on field

along with the N_2O fluxes. Soil mineral N contents were quite low and similar in both systems. Although the soil under DMC remained wetter than those under tillage at the beginning of the rainy season, soil humidity wasn't significantly different afterwards. Soil humidity reached levels suitable for production of N_2O by denitrification (> 50-60 %). N_2O fluxes remained relatively modest (< 30 g N- N_2O .d⁻¹.ha⁻¹) probably because of the low levels of mineral nitrogen. Difference between treatments was significant only for one date out of seven, with slightly higher fluxes in soil under tillage.

Key-words

Tropical soil, Madagascar, greenhouse gas (GHG), nitrous oxide (N_2O), Direct seeding mulch-based cropping system (DMC), tillage.

RESUMEN

EMISIONES IN-SITU DE N_2O DE UN FERRALSOL ARCILLOSO MALGACHE EN SISTEMA EN SIEMBRA DIRECTA O LABRANZA TRADICIONAL

Las actividades agrícolas contribuyen a las emisiones de óxido nítrico (N_2O), un potente gas con efecto de invernadero. Este estudio describe las emisiones de N_2O en sistemas de cultivo de soja en siembra directa bajo cobertura vegetal (SCV) o con labranza tradicional practicado a Madagascar. Los contenidos en nitrógeno mineral y en agua en el suelo, principales factores de control de los procesos de producción del N_2O en un suelo cultivado, fueron medidos al campo en mismo tiempo que las emisiones reales de N_2O . Los contenidos en nitrógeno mineral están pequeños y similares para los dos sistemas. Los resultados muestran que el suelo tiende estar más húmedo bajo SCV al principio de la estación de lluvias pero que las diferencias de humedad entre los 2 sistemas SCV y labranza están limitadas durante la estación de lluvias. La humedad del suelo puede llegar 50 -60 %, lo que permite condiciones propicias a la producción de N_2O por desnitrificación. Las emisiones in-situ de N_2O quedan pequeñas (<30 g N- N_2O j⁻¹ ha⁻¹), sin duda por falta de nitrógeno mineral. Las emisiones están fuertemente variables; la diferencia entre tratamientos no está significativa que por una sola fecha de medida sobre siete, la labranza en este caso emite un poco más de N_2O que la siembra directa.

Palabras clave

Suelos tropicales, Madagascar, gas con efecto de invernadero, óxido nítrico (N_2O), siembra directa, labranza.

L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère est parmi les facteurs qui peuvent être à l'origine des changements climatiques (IPCC, 2001). Le secteur agricole contribue pour 13,5 % aux émissions globales de GES mais est responsable de 85 % des émissions d'oxyde nitreux (N₂O) (IPCC, 2007), un gaz dont le potentiel de réchauffement climatique est de près de 300 fois supérieur à celui du CO₂. La nitrification et la dénitrification sont les principaux processus de production du N₂O dans le sol (Bremner, 1997). Ces réactions sont notamment conditionnées par la proportion de l'espace poral du sol rempli par l'eau (WFPS, water-filled pore space) et les teneurs en azote minéral (e.g., Verchot *et al.*, 1999 ; Davidson *et al.*, 2000).

Le semis direct sur couverture végétale (SCV) est une pratique installée à Madagascar par l'ONG Tafa (Tany sy Fam-pandrosoana) et le Cirad depuis une quinzaine d'années, afin de mieux protéger le sol contre l'érosion hydrique et restaurer sa fertilité (e.g., Six *et al.*, 2002). Ce système de culture ne comporte aucun travail du sol, le sol est en permanence recouvert par une couverture végétale au travers de laquelle est fait le semis. Cette pratique, en stockant du C dans le sol (Razafimbelo *et al.*, 2006), permet de réduire l'émission de CO₂ du sol vers l'atmosphère. L'oxyde nitreux doit être inclus dans le bilan si on veut pouvoir parler du SCV comme pratique culturale permettant la séquestration du C. Certaines études ont révélé des émissions de N₂O plus élevées de sols sous système SCV que sous labour (Ball *et al.*, 1999) alors que d'autres ne montrent aucune différence entre les deux systèmes de culture (Elmi *et al.*, 2003 ; Metay *et al.*, 2007 ; Chapuis-Lardy *et al.*, 2009).

L'objectif de notre étude est d'évaluer si un sol ferrallitique argileux cultivé des Hautes Terres malgaches est fortement ou faiblement émetteur de N₂O et si ces émissions sont modulées ou non par la pratique culturale.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Site expérimental

Le site d'étude est localisé à Bemasoandro, près de la ville d'Antsirabe dans les Hautes Terres centrales de Madagascar (altitude 1 600 m ; 19°47 S, 47°06 E). La région possède un climat tropical humide d'altitude caractérisé par deux saisons : une saison estivale humide et chaude d'octobre à avril, une saison hivernale sèche et froide de mai à septembre. La pluviosité moyenne annuelle est de 1 300 mm et la température moyenne annuelle est de 16 °C.

Le dispositif expérimental a été mis en place en 1997 par l'ONG Tafa. C'est un dispositif à randomisation totale avec trois répétitions par traitement pour un total de 96 parcelles élémentaires de 18 m². Les parcelles étudiées sont cultivées en rotation annuelle riz/soja. Les différentes mesures ont été réalisées sous culture de soja (*Glycine max L*) pendant la saison

culturelle 2006-2007. L'étude compare un système de culture en semis direct sous couverture végétale morte (résidus de la culture précédente) (SCV) au labour traditionnel (Lb), effectué à l'angady (pelle-bêche) jusqu'à 20 cm de profondeur et pour lequel les résidus de récolte ne sont pas restitués à la parcelle. Trois parcelles sont étudiées par traitement. Ces parcelles ont reçu 5 t de fumier bovin, 80 kg de chlorure de potassium, 150 kg de diammonium phosphate (DAP) et 500 kg de dolomie par hectare. Les parcelles sous SCV sont traitées avec des herbicides totaux (Glyphosate, 5 l ha⁻¹) avant le semis, puis avec un herbicide sélectif 23 jours après le semis. Dans le système traditionnel, les mauvaises herbes sont éliminées à la main (deux sarclages).

Le sol est très argileux (79 %) à argile de type 1:1 et présente des propriétés andiques. Il a été classé comme Sol ferrallitique fortement désaturé, typique, rajeuni, humifère sur matériaux volcano-lacustres par Zebrowski et Ratsimbazafy (1979). Razafimbelo *et al.* (2006) ont plus récemment classé ce sol comme un andic Dystrusept appartenant à la classe des Inceptisols de la classification américaine (Soil Survey Staff, 2003).

Pluviométrie

Le relevé des précipitations a été obtenu par la station météorologique CIMEL localisée dans la station expérimentale de l'URP SCRiD, localisée à quelques kilomètres seulement du site de la présente étude.

Prélèvements et analyses du sol

Le sol est échantillonné dans l'horizon 0-10 cm à chaque date de prélèvement de gaz émis par le sol afin de déterminer le contenu en azote minéral et l'humidité du sol, paramètres influençant la production et l'émission du N₂O. La teneur en azote minéral (NH₄ + NO₃) est déterminée après une extraction au KCl normal d'une aliquote de sol frais (50 g de sol dans 75 ml de KCl 1 M). Après centrifugation et filtration, l'extrait est analysé par distillation et titrimétrie (Lemée, 1967).

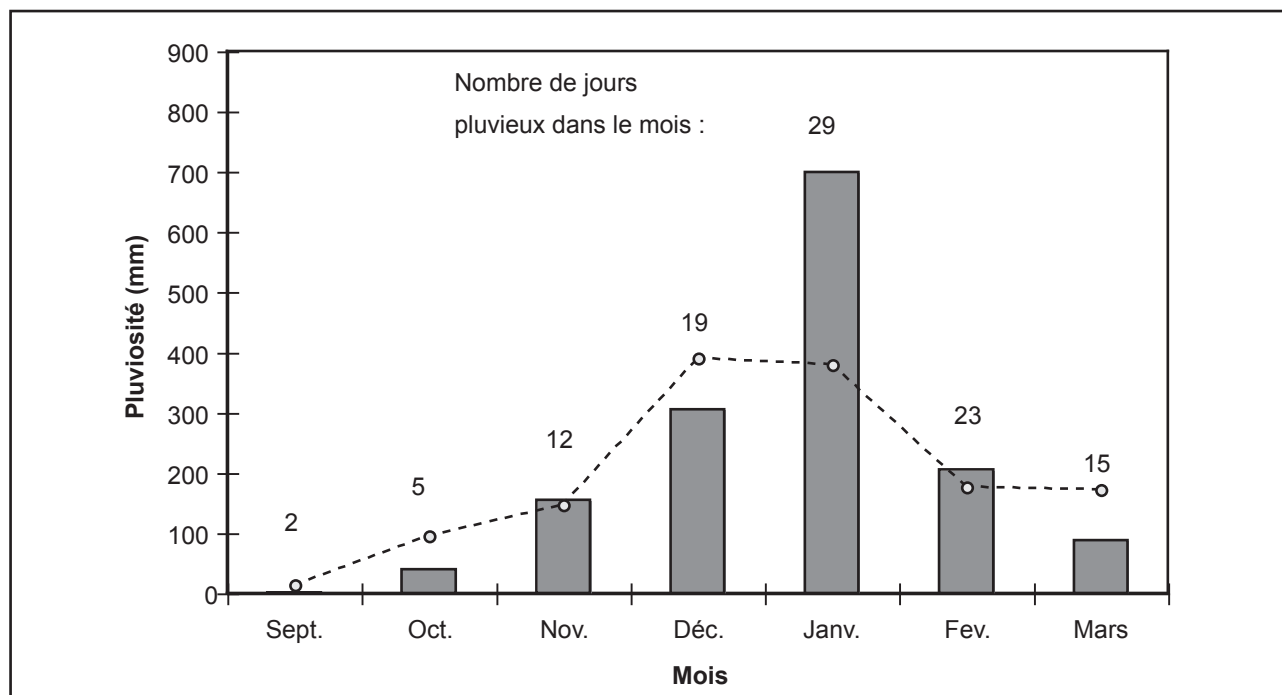
L'humidité pondérale du sol (0-10 cm) est mesurée après séchage à 105 °C pendant 48 heures. Parallèlement, la dynamique de l'eau dans le sol a été suivie à l'aide de tensiomètres installés à 10, 20 et 30 cm de profondeur sur chaque parcelle. Seuls les résultats des tensiomètres installés à 10 cm seront présentés dans cet article.

Mesures des émissions réelles de N₂O

Les mesures des émissions réelles (*in situ*) de N₂O ont été réalisées à l'aide d'enceintes statiques (volume 3,5 l) installées dans chaque parcelle, dans l'inter-rang de soja. Le gaz émis et emprisonné dans l'enceinte est prélevé au moment de la fermeture de l'enceinte, puis 30, 60 et 90 minutes après la fermeture à sept dates réparties durant la saison culturale. Cette cinétique permet de vérifier la linéarité du dégagement gazeux. Les échantillons de gaz sont stockés dans des tubes venojects®

Figure 1 : Pluviosité (mm/mois) et nombre de jours de pluie par mois durant la campagne de mesures 2006-2007. La ligne pointillée renseigne la moyenne des précipitations des 5 dernières années. (Données Station CIMEL, URP SCRiD, Antsirabe).

Figure 1 : Rainfall (mm) and number of days with rain event per month during the measurement period 2006-2007. The dashed line shows the average of rainfall during the past 5 years. (Data from CIMEL sensor, URP SCRiD, Antsirabe).



avant analyse par chromatographie en phase gazeuse (CPG-ECD Varian CP 3800).

Traitement statistique des données

Les résultats ont été analysés par le logiciel Statistica®, pour la comparaison de moyenne à l'aide d'un test *t*. Les différences sont considérées comme significatives au seuil de probabilité de 5 %.

RÉSULTATS

Pluviosité et humidité du sol

La pluviosité mensuelle n'est que de 1,5 mm en septembre, puis elle augmente progressivement pour atteindre 699 mm en janvier, au plus fort de la saison des pluies, répartis sur 29 jours (figure 1). Les précipitations durant la campagne de mesures 2006-2007 sont relativement proches de la moyenne calculée pour les 5 dernières années hormis en janvier où elles sont supérieures à celles des autres années. La saison des pluies 2006-2007 a été particulièrement marquée.

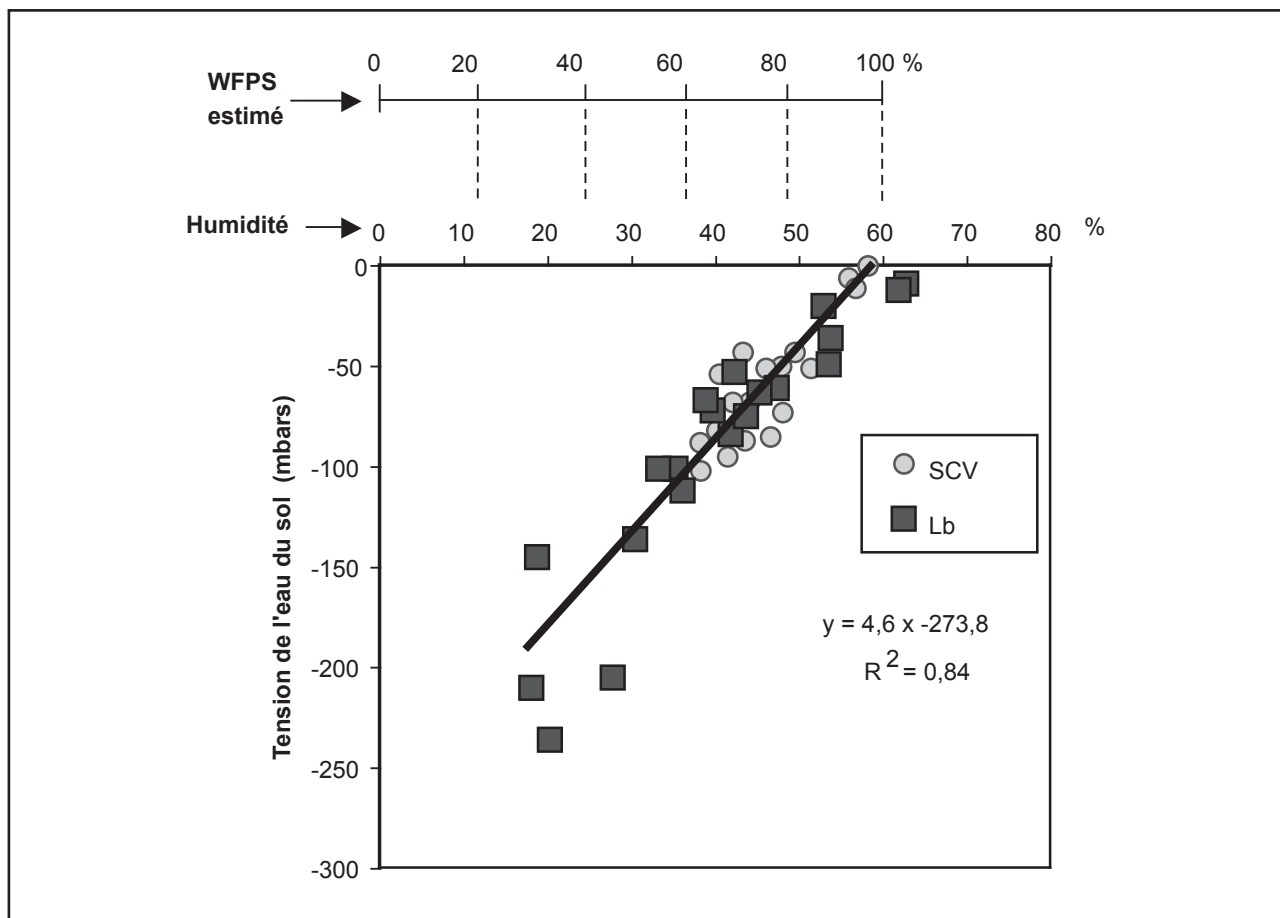
Les valeurs d'humidité pondérale des échantillons de sol sont comprises entre 18,6 et 62,7 % (figure 2). Les parcelles sous labour présentent des valeurs inférieures à 35 % au début

et à la fin de la saison des pluies (novembre et mars) tandis que les sols sous SCV ont toujours un taux d'humidité supérieur à 38 % quelle que soit la date de mesure.

Les lectures des tensiomètres installés à 10 cm varient entre -250 et 0 (figure 2). Sous SCV, ces valeurs sont comprises entre -102 à 0 et sous labour entre -236 à -9. La tension de l'eau déterminée par tensiométrie est bien corrélée aux valeurs d'humidité pondérale (figure 2; $R^2 = 0.84$; $P < 0.001$; $N = 39$). Les valeurs les plus faibles sont observées en début et fin de saison des pluies. La comparaison statistique des valeurs de tensiomètres moyennées par date et traitement montre une différence significative (test *t*, $P < 0,05$) entre les systèmes SCV et labour en début (23 novembre) et en fin (15 mars) de saison des pluies, le sol sous labour étant alors significativement plus sec; pour les autres dates les différences ne sont pas statistiquement significatives. La tension de l'eau dans le sol est logiquement conditionnée par la hauteur de précipitations durant les 24 heures qui précèdent la lecture des tensiomètres (figure 3). Après le fort événement pluvieux du 12 janvier, les tensiomètres affichent une tension de l'eau proche de zéro. Dans ce cas, le sol est saturé en eau, le volume poral rempli par l'eau (WFPS, water-filled pore space) peut être estimé comme étant proche de 100 % (figure 2); l'humidité pondérale du sol est alors d'environ 60 %.

Figure 2 : Relation entre la tension de l'eau dans le sol (obtenue par tensiométrie) et l'humidité pondérale dans l'horizon de sol 0-10 cm (toutes mesures confondues N = 39). Le volume poral du sol rempli d'eau (WFPS %) a été estimé à partir de la valeur de tensiomètre 0 correspondant théoriquement à 100 % WFPS).

Figure 2 : Relationship between soil water tension (tensiometer) and water content in the 0-10 cm soil layer (whole set; N = 39). The water-filled pore space (WFPS %) was estimated by calculation as 100 % corresponding to the zero value on tensiometers.



Par calcul, on peut ensuite estimer pour cet horizon de sol que le volume poral rempli d'eau est supérieur à 60 % lorsque l'humidité pondérale dépasse les 35 %.

Teneurs en azote minéral dans le sol

La teneur en azote minéral (ammonium + nitrate) dans l'horizon 0-10 cm varie de 1,77 à 3,42 mg N kg⁻¹ sol et n'est pas significativement différente entre deux systèmes (SCV et Lb) (figure 4). L'apport de fumier (le 5 décembre) et de diammonium phosphate (DAP, le 28 décembre, combiné à un apport de KCl et de dolomie) affecte légèrement les teneurs en azote minéral mais l'augmentation n'est pas statistiquement significative.

Emission de N₂O *in situ*

Les émissions de N₂O varient entre 0,1 à 26,5 g N-N₂O j⁻¹ ha⁻¹ sur l'ensemble de la période culturale (figure 5). La va-

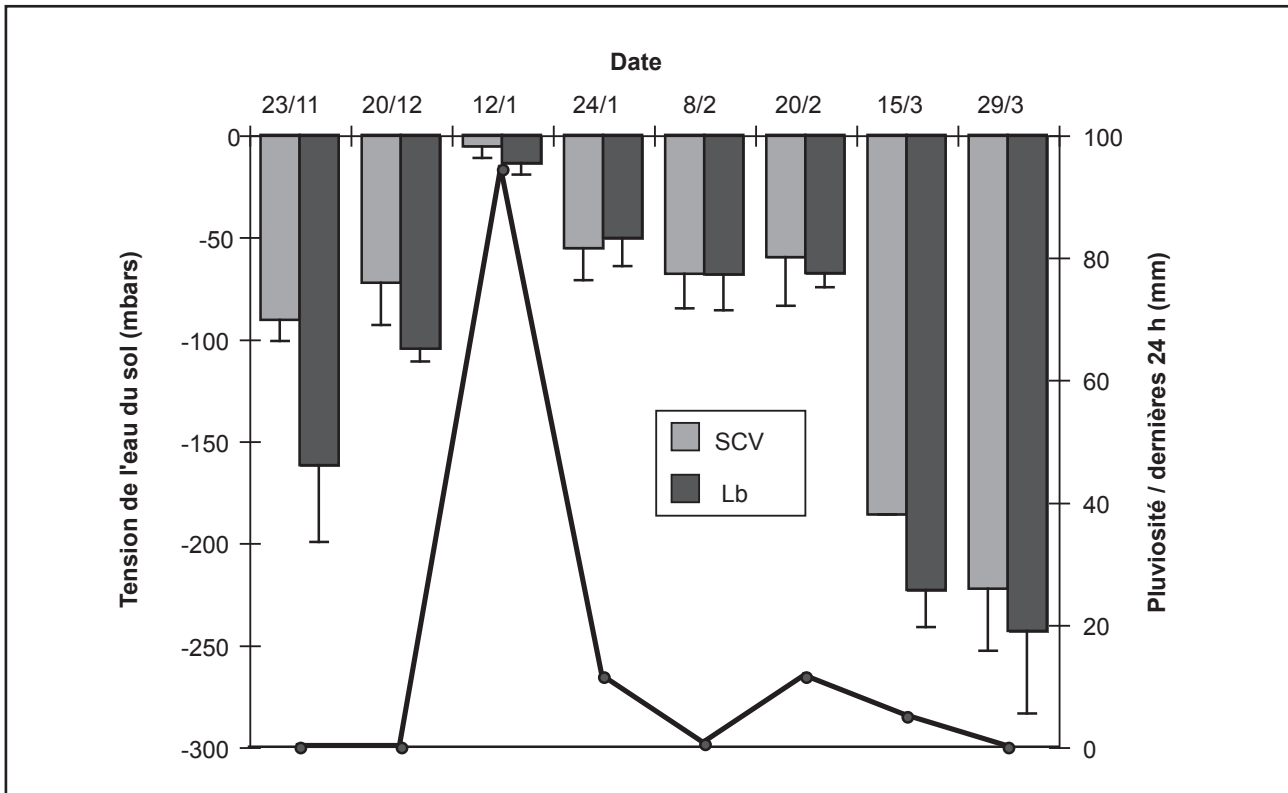
riabilité spatiale de cette mesure est élevée; le coefficient de variation pour une date et un traitement varie de 2 à 130 %. Les flux de N₂O sont en général inférieurs à 12 g N-N₂O j⁻¹ ha⁻¹ (i.e. seuil de 50 µg N-N₂O m⁻² h⁻¹ suggéré par Scheer *et al.*, 2008 pour des valeurs faibles) à l'exception des émissions du 24 janvier sous labour. Les émissions ne sont significativement différentes entre les traitements SCV et labour que pour cette même date du 24 janvier: labour, 26,5 vs. SCV, 8,3 g N-N₂O. j⁻¹.ha⁻¹.

DISCUSSION

Le coefficient de variation des émissions moyennées par date et traitement atteint dans notre étude 130 % ce qui est le cas pour d'autres études (e.g., Choudhary *et al.*, 2002; Metay

Figure 3 : Évolution au cours de la saison des pluies des valeurs de tensiomètres (moyenne + écart-types) installés à 10 cm de profondeur.

Figure 3 : Changes in soil water tension measured with 10 cm-depth tensiometers during the rainy season (mean + standard deviation).



et al., 2007). La variabilité des émissions de N_2O est naturellement importante dans les sols du fait de l'hétérogénéité spatiale du sol et du caractère sporadique des émissions (Choudhary *et al.*, 2002). Les émissions de N_2O sont supérieures aux très faibles valeurs obtenues par Metay *et al.* (2007) ($< 1,5$ g $N-N_2O$ j^{-1} ha^{-1}) pour des sols ferrallitiques brésiliens cultivés en rotation culturale riz/soja conduite sous SCV ou labour. Elles sont du même ordre de grandeur que celles obtenues pour un autre sol ferrallitique cultivé en SCV dans les Hautes Terres malgaches (Chapuis-Lardy *et al.*, 2009). Conen *et al.* (2000) considèrent les émissions de N_2O comme étant faibles lorsqu'elles sont inférieures à 10 g $N-N_2O.j^{-1}.ha^{-1}$. D'autres auteurs considèrent comme faibles les émissions inférieures à 50 μg $N-N_2O$ $h^{-1} m^{-2}$ soit 12 g $N-N_2O$ $j^{-1} ha^{-1}$ (Scheer *et al.*, 2008) et comme très faibles celles inférieures à 10 μg $N-N_2O$ $h^{-1} m^{-2}$ soit $2,4$ g $N-N_2O$ $j^{-1} ha^{-1}$ (Kaiser et Heinemeyer, 1996; Scheer *et al.*, 2008). Drury *et al.* (2006) considèrent comme faible toute émission de N_2O inférieure à 30 g $N-N_2O$ $j^{-1} ha^{-1}$. Au regard de ces seuils, les émissions de N_2O obtenus dans le cadre de notre étude peuvent être considérées comme faibles. Jacinthe et Dick (1997) rapportent pour des cultures de soja en Ohio des émissions moyennes de N_2O comprises en général entre 10 et

15 g $N-N_2O$ $j^{-1} ha^{-1}$ mais pouvant aller jusqu'à 140 g $N-N_2O$ $j^{-1} ha^{-1}$ selon le mode de fertilisation et le type de rotation culturale. Rochette *et al.* (2004) ont mesuré de faibles émissions de N_2O pour une culture de soja au Canada (< 24 g $N-N_2O$ $j^{-1} ha^{-1}$).

Les quantités de N_2O émises dépendent d'interactions complexes entre les propriétés du sol, les facteurs climatiques et les pratiques agricoles. Les principaux facteurs affectant les émissions de N_2O sont l'aération du sol et sa teneur en eau ainsi que sa teneur en azote minéral (Tiedje, 1988; Ball *et al.*, 1997).

Le sol mis à nu par le labour a tendance à être plus sec, notamment en début et fin de saison des pluies, le sol sous SCV retenant plus efficacement l'eau du fait de la présence du paillis. Diverses études ont montré que la suppression de toute opération de travail du sol et la présence permanente d'un paillis protecteur de résidus modifient les équilibres infiltration/ruissellement ainsi que l'évaporation directe du sol (e.g., Steiner, 1994; Scopel *et al.*, 2005). Davidson (1991) propose un modèle de prédiction des flux de N_2O selon la teneur en eau du sol, exprimée par l'espace poral occupé par l'eau (WFPS, water-filled pore space). Celui-ci indique une importance accrue de la dénitrification au-delà de 60 % du WFPS tandis que des

Figure 4 : Teneurs en azote minéral (moyenne + écart-type) dans l'horizon de sol 0-10 cm sous SCV et sous labour (Lb).

Figure 4 : Mineral N contents (mean + standard deviation; mg N kg⁻¹ soil) in the 0-10 cm soil layer in DMC and tillage systems (Lb).

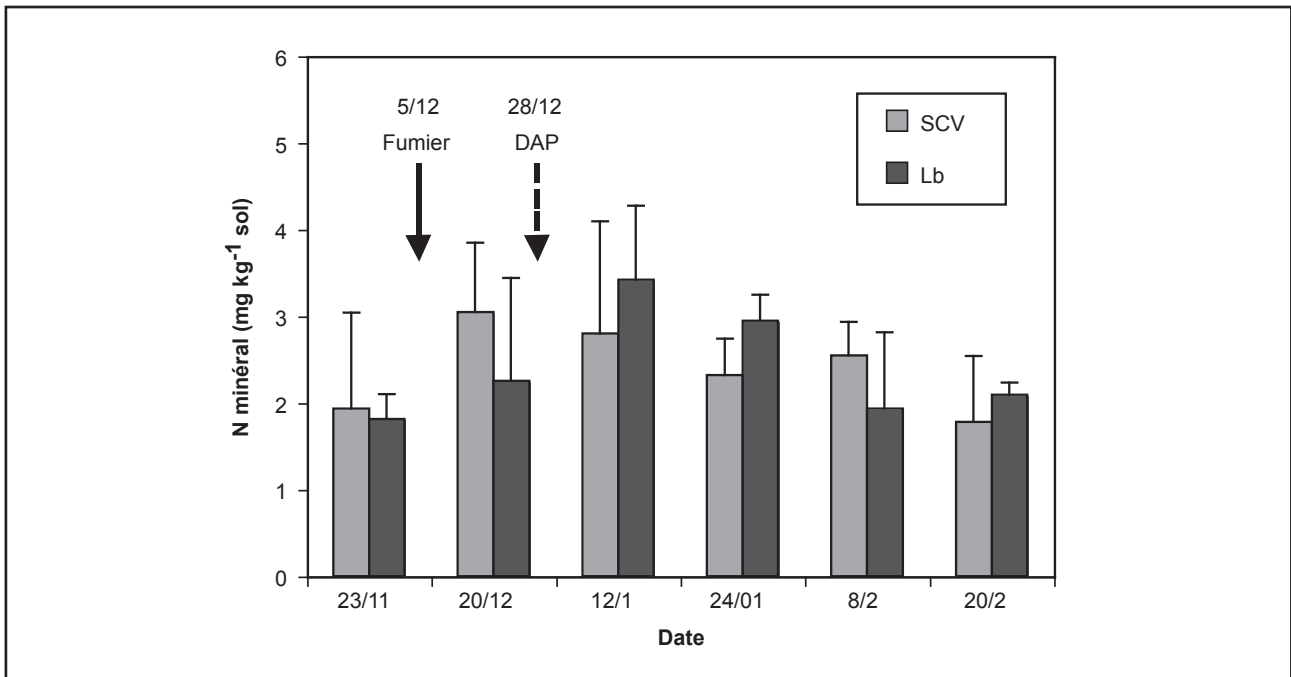
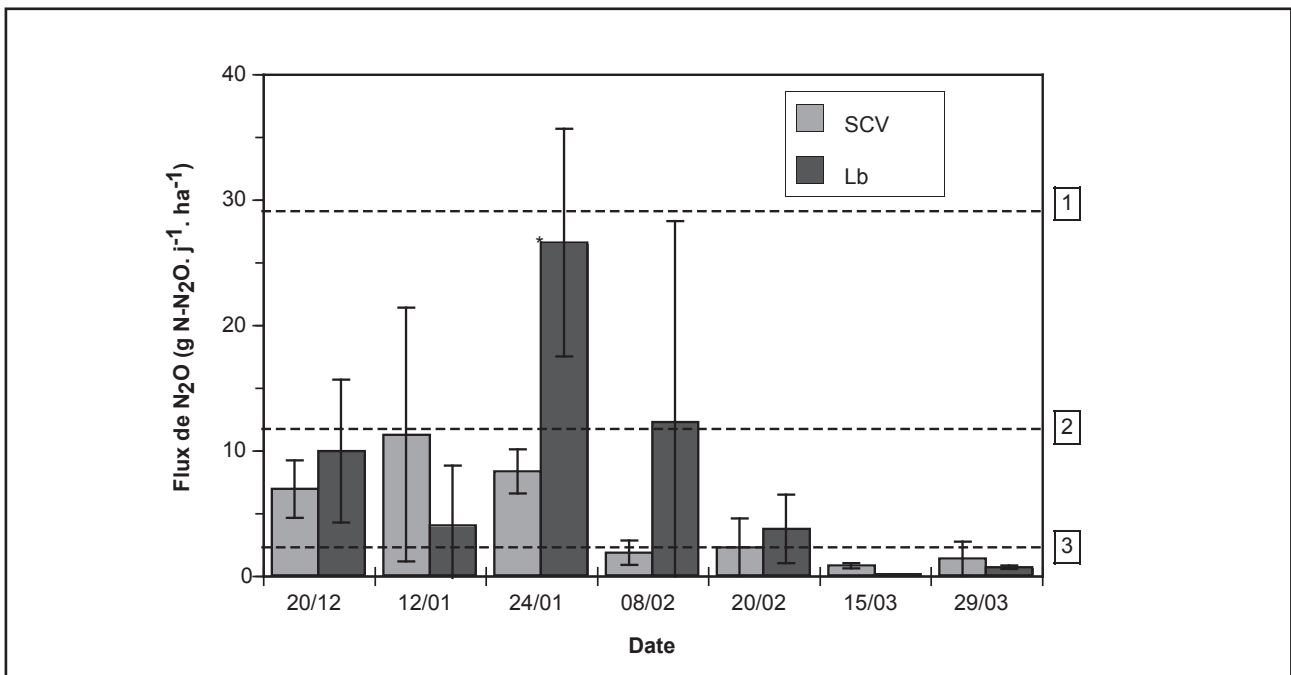


Figure 5 : Emissions de N₂O du sol sous SCV et labour (moyenne + écart-types). Les lignes pointillées matérialisent les valeurs seuils au-dessous desquelles les émissions sont considérées comme faibles [1] d'après Drury *et al.*, 2006; [2] d'après Scheer *et al.*, 2008) voire très faibles [3], Scheer *et al.*, 2008). * test t; $p < 0,05$.

Figure 5 : N₂O emissions (g N ha⁻¹ d⁻¹) in DMC and tillage systems (mean + standard deviation). The dashed lines show the thresholds below which the emissions can be considered as low [1] after Drury *et al.*, 2006; [2] after Scheer *et al.*, 2008) and very low [3], Scheer *et al.*, 2008). * Statistically different (t-test; $p < 0.05$).



teneurs en eau entre 30 et 70 % du WFPS seraient optimales pour la production de N_2O par la nitrification. Une autre étude portant sur un sol tropical révèle que le maximum des émissions de N_2O se produirait par dénitrification mais pour un WFPS supérieur ou égal à 80 % (Veldkamp *et al.*, 1998). La production de N_2O par nitrification et par des réactions abiotiques dominerait en sol sec. A une teneur en eau intermédiaire, N_2O serait produit par la nitrification et par la dénitrification. Dans notre étude, menée durant la saison des pluies, le sol sous SCV présente une humidité toujours supérieure à 35 % qui correspond à une proportion de l'espace poral rempli par l'eau (WFPS) supérieure à 60 % et donc à des conditions d'humidité plutôt favorables à la dénitrification. Pour les sols sous labour, le N_2O serait produit soit par nitrification soit par dénitrification selon l'humidité du sol et un volume poral rempli d'eau s'échelonnant de 30 à 100 %. Du fait de la variabilité des mesures d'émissions, il est difficile de comparer les deux traitements (SCV vs. Lb). Toutefois, les émissions de N_2O ont tendance à être supérieures sous labour comparées à celles sous SCV. Cette différence n'est significative que pour une date de mesure mais, dans ce cas, les sols des deux traitements ont un WFPS analogue et élevé (80 %). L'augmentation de la densité apparente observée sous labour peut localement conduire à limiter la diffusion des gaz et notamment de l'oxygène favorisant ainsi les conditions anoxiques et la production de N_2O par dénitrification (Sitaula *et al.*, 2000; Grandey *et al.*, 2006). Bien que les émissions les plus fortes soient effectivement observées pour les dates où le WFPS est supérieur 80 %, la teneur en eau du sol n'est pas fortement corrélée aux émissions de N_2O ($R^2 = 0,24$; $p = 0,11$).

La teneur en nitrate et en ammonium, substrats des réactions de dénitrification et de nitrification, est un autre paramètre conditionnant les émissions de N_2O . De nombreux auteurs ont montré la corrélation positive entre la teneur en N minéral et les émissions de N_2O (e.g., Williams *et al.*, 1998; Panek *et al.*, 2000; Holtgrieve *et al.*, 2006). La teneur en azote minéral du sol étudié est faible ($<3,5$ mg N kg^{-1} sol) et non significativement différente entre deux systèmes (SCV et labour). Les faibles teneurs en N minéral du sol peuvent expliquer une faible émission de N_2O et l'absence de corrélation significative entre ces deux paramètres. Chapuis-Lardy *et al.* (2009) ont mesuré les flux de N_2O dans un autre système cultivé des Hautes Terres malgaches, et expliquent également la faiblesse des émissions par une limitation en N minéral. Les émissions de N_2O restent faibles tant que les teneurs en nitrates restent inférieures à 5 mg N- NO_3 kg^{-1} sol (e.g., Ryden 1983; Conen *et al.*, 2000; Pinto *et al.*, 2002). Dans notre cas, les faibles teneurs en azote minéral peuvent donc avoir limité les émissions de N_2O .

CONCLUSION

Le sol ferrallitique argileux étudié est faiblement émetteur de N_2O (< 30 g N- N_2O j^{-1} ha^{-1}) malgré des conditions d'humidité du sol qui pourraient favoriser la production de N_2O par dénitrification. Ces faibles valeurs sont sans doute liées aux faibles teneurs en azote minéral. Notre étude ne permet pas de tirer de conclusion très marquée concernant un effet traitement; cependant le SCV semble être une pratique culturale qui, comparée au labour, peut contribuer à une diminution ou du moins à un maintien du niveau d'émission de N_2O du sol ferrallitique étudié.

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'URP SCRiD (Fofifa-Cirad-Université d'Antananarivo) pour la fourniture des données pluviométriques et pour son appui logistique sur le terrain. Nos remerciements vont également au personnel technique du LRI, Laboratoire des Radio-Isotopes (Université d'Antananarivo) pour son aide technique. Nous remercions également B. Buatois du Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive du CNRS (Montpellier) pour l'accès au CPG-ECD et pour son appui technique. Ce travail a été financé par le programme MUTEN *Modes d'utilisation des terres et flux de N_2O : Caractérisation des déterminants du fonctionnement des communautés dénitrifiantes* (programme national ACI ECCO 2005-2007) et a fait l'objet d'un mémoire de fin d'étude de l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA) de l'Université d'Antananarivo, Madagascar.

BIBLIOGRAPHIE

- Ball B.C., Horgan G.W., Clayton H. et Parker J.P., 1997 - Spatial variability of nitrous oxide fluxes and controlling soil and topographic properties. *Journal of Environmental Quality*, 26, pp. 1399-1409.
- Ball B.C., Scott A. et Parker J.P., 1999 - Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil and Tillage Research*, 53, pp. 29-39.
- Bremmer J.M., 1997 - Sources of nitrous oxide in soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 49, pp. 7-16.
- Chapuis-Lardy L., Metay A., Martinet M., Rabenarivo M., Toucet J., Douzet J.M., Razafimbelo T., Rabeharisoa L. & Rakotoarisoa J., 2009. Nitrous oxide emissions from Malagasy agricultural soils. *Geoderma* 148, 421-427
- Choudhary M.A., Akramkhanov A. et Saggat S., 2002 - Nitrous oxide emissions from a New Zealand cropped soil: tillage effects, spatial and seasonal variability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 93, pp. 33-43.
- Conen F., Dobbie K.E., Smith K.A., 2000 - Predicting N₂O emissions from agricultural land through related soil parameters. *Global Change Biology*, 6, pp. 417-426.
- Davidson E.A., 1991 - Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems. In *Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrogen oxides and Halomethanes*. J. E. Rogers and W. B. Whitman (Eds), pp. 219-234. ASM Press, Washington D.C.
- Davidson E.A., Keller M., Erickson H.E., Verchot L.V. et Veldkamp E., 2000 - Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides. *BioScience*, 50, pp. 667-680.
- Drury C.F., Reynolds W.D., Tan C.S., Welacky T.W., Calder W. and McLaughlin N.B., 2006 - Emissions of Nitrous Oxide and Carbon Dioxide: Influence of Tillage Type and Nitrogen Placement Depth. *Soil Science Society of America Journal* 70, pp. 570-581.
- Elmi A.A., Madramootoo C., Hamel C. et Liu A., 2003 - Denitrification and nitrous oxide to nitrous oxide plus dinitrogen ratios in the soil profile under three tillage systems. *Biology and Fertility of Soils* 38, pp. 340-348.
- Grandey A.S., Loecke T.D., Parr S. et Robertson G.P., 2006 - Long-term trends on nitrous oxide emissions, soil nitrogen, and crop yields of till and no till cropping systems. *Journal of Environmental Quality*, 35, pp. 1487-1495.
- Holtgrieve G.W., Jewett P.K. et Matson P.A., 2006 - Variations in soil N cycling and trace gas emissions in wet tropical forests. *Oecologia*, 146, pp. 584-594.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001 - Climate Change 2001. The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., Johnson C.A. (Eds). Cambridge University Press, New York.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007 - Climate Change 2007. Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (Eds). Cambridge University Press, New York.
- Jacinte P.A. et Dick W.A., 1997 - Soil management and nitrous oxide emissions from cultivated fields in southern Ohio. *Soil and Tillage Research* 41, pp. 221-235.
- Kaiser E. A. et Heinemeyer O., 1996 - Temporal changes in N₂O-losses from two arable soils. *Plant and Soil*, 181, pp. 5
- Lemée G., 1967 - Investigation sur la minéralisation de l'azote et son évolution annuelle dans des humus forestiers *in situ*, *Oecologia Plantarum* 2, pp. 285-324.
- Metay A., Oliver R., Scopel E., Douzet J.M., Alves Moreira J.A., Maraux F., Feigl B.J. et Feller C., 2007 - N₂O and CH₄ emissions from soils under conventional and no-till management practices in Goiânia (Cerrados, Brazil). *Geoderma*, 141, pp. 78-88.
- Panek J.A., Matson P.A., Ortiz-Monasterio I. et Brooks P., 2000 - Distinguishing nitrification and denitrification sources of N₂O in a Mexican wheat system using ¹⁵N. *Ecological Applications*, 10, pp. 506-514.
- Pinto A. S., Bustamante M., Kisselle K., Burke R., Zepp R., Viana L., Varella R. et Molina M., 2002- Soils emissions of N₂O, NO and CO₂ in Brazilian Savannas: effects of vegetation type, seasonality and prescribed fires. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107 (D20), pp. 80-89.
- Razafimbelo T.M., Albrecht A., Basile I., Borschneck D., Bourgeon G., Feller C., Ferrer H., Michellon R., Moussa N., Muller B., Oliver R., Razanamparany C., Raunet M. et Séguin L., 2006 - Effet de différents systèmes de culture à couverture végétale (SCV) sur le stockage du carbone (C) dans un sol ferrallitique argileux des Hautes Terres de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols*, 13, 113-117.
- Rochette P., Angers D. A., Belanger G., Chantigny M. H., Prevost D. et Levesque G., 2004 - Emissions of N₂O from alfalfa and soybean crops in Eastern Canada. *Soil Science Society of America Journal* 68, pp. 493-506.
- Ryden J.C., 1983 - Denitrification loss from a grassland soil in the field receiving different rates of nitrogen as ammonium nitrate. *Journal of Soil Science*, 34, pp. 355-365.
- Scheer C., Wassmann R., Kienzler K., Ibragimov N., Eschanov R., 2008 - Nitrous oxide emissions from fertilized, irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in the Aral Sea Basin, Uzbekistan: Influence of nitrogen applications and irrigation practices. *Soil Biology and Biochemistry*, 40, pp. 290-301.
- Scopel E., Douzet J.M., Macena da Silva F.A., Cardoso A., Alves Moreira J.A., Findeling A. et Bernoux M., 2005 - Impacts des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale (SCV) sur la dynamique de l'eau, de l'azote minéral et du carbone du sol dans les cerrados brésiliens. *Cahiers d'études et de recherches francophones / Agricultures*, 14 (1), pp. 71-75.
- Sitaula B.K., Hansen S., Staula J.I.B., Bakken L.R.,(2000). Effect of soil compaction on N₂O emission in agricultural soil. *Chemosphere Global Change Science*, 2, pp. 367-371.
- Six J., Feller C., Deneff K., Ogle S M., SA J C M., Albrecht A., 2002 - Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effect of no-tillage. *Agronomie*, 22, pp. 755-775.
- Soil Survey Staff, 2003 - Keys to Soil Taxonomy. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, DC
- Steiner, J.L., 1994 - Crop residue effects on water conservation. In: *Managing Agricultural Residues*. Unger P.W. (Ed.). Lewis Pub, Boca Raton (USA), pp. 41-76.
- Tiedje J.M., 1988. Ecology of denitrification and dissimilatory reduction to ammonium. In: Zehnder A.J.B. (Ed.) *Biology of Anaerobic Microorganisms*. John Wiley, New York, USA, pp. 179-244.
- Veldkamp E., Keller M., Nunez, M., 1998 - Effects of pasture management on N₂O and NO emissions from soils in the humid tropics in Costa Rica. *Global Biogeochemical Cycles*, 12, pp. 71-79.
- Verchot, L.V., Davidson E.A., Cattanio J.H., Ackerman L.L., Erickson H.E. et Keller M., 1999 - Land use change and biogeochemical controls of nitrogen oxide emissions from soils in eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, 13, pp. 31-46.
- Williams PH., Jarvis SC., Dixon E., 1998 - Emission of nitric oxide and nitrous oxide from soil under field and laboratory conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 30, pp. 1885-1893.
- Zebrowski C. et Ratsimbazafy C., 1979 - Carte pédologique de Madagascar au 1/100000. Feuille Antsirabe. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Paris.

PUBLICATIONS ET DOCUMENTS PUBLIÉS PAR L'AFES

Revues

Science du Sol

Revue scientifique publiée de 1952 à 1993.

Elle comporte 300 à 400 pages par an. Un index est présenté tous les ans dans le quatrième numéro.

A cessé de paraître fin 1993. Certains numéros disponibles.

La Lettre de L'Association

Publiée quatre fois par an, ce journal annonce les nouvelles de l'association, les réunions nationales et internationales; il donne des critiques d'ouvrages, de thèses, de la documentation, etc.

La Lettre est envoyée à chaque adhérent de l'association: elle accompagne l'adhésion.

Rédacteur en chef: F. Féder.

Etude et Gestion des Sols

Revue trimestrielle, francophone traitant de la connaissance et de l'usage des sols.

Rédacteur en chef: D. Arrouays.

Rédacteurs en chef Adjoints: D. Baize, D. Schwartz

Secrétariat de rédaction: F. Héliès, C. Laveuf, J.-P. Rossignol.

Le Comité éditorial est composé de trente six membres de France et de pays francophones.

Ouvrages

Le Livre Jubilaire (1984)

Point sur les acquis à cette date en matière de science du sol et de pédologie.

Fonctionnement hydrique et comportement du sol (1984)

Podzols et podzolisation

par D. Righi et A. Chauvel: ouvrage publié en coédition par l'AFES et l'INRA, avec le concours du CNRS, de l'ORSTOM, et de la région Poitou-Charentes (1987).

Micromorphologie des sols/ Soil micromorphology

par N. Fédoroff, L.M. Bresson, Marie Agnès Courty, publié par l'AFES avec le concours du CNRS, de l'INAPG, de l'INRA, du Ministère de l'Environnement et de l'ORSTOM (1985) (épuisé).

Carte mondiale des sols et sa légende (1984)

Présentée sous forme numérique.

Le Référentiel Pédologique

par D. Baize et M.-C. Girard, (Coord.) AFES, Association Française pour l'Etude du Sol (FRA), Editions Quae, Versailles (FRA) ; 2009. 405 p. - Collection Savoir-Faire.

Synthèse nationale des analyses de terre : Période 1990-1994

par C. Walter, C. Schwartz, B. Claudot, P.-Aurousseau et T. Bouedo, avec le concours du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

Actes du XVI^e Congrès Mondial de Sciences du Sol, Montpellier - Août 1998

