

Quantification de la réduction des émissions de gaz à effet de serre produites par le compostage de fumier de bovins de boucherie et de bovins laitiers

E. Pattey^{1,*}, M.K. Trzcinski² et R.L. Desjardins¹

¹ Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 960, avenue Carling, Ottawa (Ontario) K1A 0C6, Canada

² Département of Biology, Université Dalhousie, Halifax (Nouvelle-Écosse) B3H 4J1, Canada

* Auteur-ressource : E. Pattey (patteye@agr.gc.ca); tél. : +613-759-1523; fax : +613-759-1724

Communication reçue le 17 décembre 2003, acceptée avec révisions le 14 janvier 2005

Mots clés : bovins de boucherie, bovins laitiers, coefficients d'émission, émissions de gaz à effet de serre, fumier, méthane, oxyde nitreux

Résumé

Il est possible de réduire les émissions de gaz à effet de serre imputables au secteur agricole en adoptant de meilleures pratiques de gestion. Le choix de la méthode d'entreposage du fumier, par exemple, devrait être fondé sur des critères d'ordre environnemental aussi bien que sur la capacité de production. Dans le cadre de la présente étude, nous avons comparé les émissions de gaz à effet de serre provenant de trois méthodes différentes d'entreposage du fumier produit par des bovins de boucherie et des bovins laitiers pendant la période estivale. Les émissions de CH₄, de N₂O et de CO₂ provenant de fumier entreposé sous forme liquide, en tas et en compost ont été mesurées au moyen d'un système à essai fermé. C'est le fumier liquide qui a produit le plus d'émissions combinées de N₂O et de CH₄, exprimées en équivalents CO₂, suivi du fumier en tas et du compost en aération passive. Cette classification est tributaire des émissions de CH₄, lesquelles dépendant du degré d'aérobic du fumier. Le forçage radiatif imputable au fumier en tas et exprimé en équivalents CO₂ était 1,46 fois plus important que celui du compost et ce, tant pour le fumier des bovins de boucherie que pour celui des bovins laitiers. Le forçage radiatif imputable au fumier liquide des bovins laitiers était presque deux fois plus élevé que pour le compost, et celui provenant du fumier liquide des bovins de boucherie était entre quatre et sept fois plus élevé, comparativement au compost. Les réductions potentielles estimatives de GES ont été évaluées en extrapolant les résultats de la présente étude à l'ensemble du Canada. En compostant la totalité du fumier entreposé sous forme liquide et en tas, il serait possible d'enregistrer une réduction de 0,70 Tg d'éq-CO₂/an⁻¹. Dans le même ordre d'idées, il serait possible de réaliser une réduction de 0,76 Tg d'éq-CO₂/an⁻¹ en recueillant et en brûlant les émissions de CH₄ provenant des installations existantes d'entreposage de fumier liquide. De nouveaux coefficients d'émission de CH₄ estimatifs ont été évalués à partir de ces résultats et intégrés à la méthodologie du GIEC. Pour l'Amérique du Nord, par temps frais, les coefficients d'émission de CH₄ seraient de 45 kg de CH₄/tête⁻¹/an⁻¹ pour le fumier de bovins laitiers, plutôt que 36 kg de CH₄/tête⁻¹/an⁻¹, et de 3 kg de CH₄/tête⁻¹/an⁻¹ pour le fumier de bovins de boucherie, plutôt que 1 kg de CH₄/tête⁻¹/an⁻¹.

Introduction

Les pratiques agricoles adoptées par les fermes comptent pour presque 10 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) anthropiques au Canada (Desjardins et coll., 2001). Plus de la moitié des émissions totales de N₂O et plus du tiers des émissions totales de CH₄ sont produites par les activités agricoles.

Les principales sources de ces émissions sont la fermentation entérique, les engrais chimiques et la gestion du fumier. En se basant sur les effets directs, le potentiel de réchauffement global sur 20 ans et sur 100 ans est, respectivement, pour le CH₄, : 62 fois et 23 fois, et pour le N₂O : 275 fois et 296 fois celui du CO₂, établi à partir de la masse GIEC, 2001). L'adoption de pratiques agricoles différentes aurait une incidence potentielle importante sur le changement climatique en

raison du taux élevé des émissions de CH₄ et de N₂O produites par l'agriculture et de leur potentiel de réchauffement. Plusieurs chercheurs ont indiqué que des changements de pratiques liées à l'entreposage et à la manutention du fumier pourraient réduire les émissions de GES et, par le fait même, la contribution globale du secteur agricole au réchauffement planétaire (Sommer et coll., 2000; Amon et coll., 2001; Hao et coll., 2001; Kulling et coll., 2003).

Entre 5 et 30 % du total des émissions de CH₄ provient du fumier de bétail (Svenson et coll., 1991; Sommer et coll., 2000; Kulling et coll., 2002). Au Canada, le fumier compte pour environ 20 % du total des émissions de CH₄ imputables à l'agriculture (Desjardins et Riznek, 2000). Les émissions de CH₄ provenant du fumier de bétail dépendent du type de bétail (porcs, bovins laitiers, etc.), des conditions

d'entreposage (sous forme liquide, sous forme solide, en pâturage) et de la température (Husted 1994; Amon et coll., 2001; Su et coll., 2003). Puisque le CH₄ est produit par la décomposition anaérobie de la matière organique (Gaudy et Gaudy, 1988), on est en droit de s'attendre à ce que les conditions qui favorisent la décomposition aérobie entraînent une baisse des émissions de CH₄.

Des observations des émissions de N₂O devraient également être incluses dans les études portant sur le fumier de bétail parce que ce dernier compte pour approximativement 18 % des émissions totales de N₂O. Ainsi, toute recommandation judicieuse sur l'entreposage du fumier devrait tenir compte des échanges entre le CH₄ et le N₂O, lesquels sont fonction de la quantité d'oxygène dans le fumier au moment de l'entreposage. Les objectifs de la présente étude sont : 1) d'étudier les effets des méthodes d'entreposage du fumier sur l'émission de GES; 2) de comparer les émissions de GES produites par le fumier de bovins laitiers à celles produites par le fumier de bovins de boucherie; 3) d'identifier les variables environnementales et chimiques qui sont responsables de la plus grande partie de la variation observée au chapitre des émissions de GES; 4) de formuler des recommandations sur les pratiques de gestion permettant de réduire les émissions de GES.

Matériel et méthodes

Site de l'étude

Les mesures ont été prises à la Ferme expérimentale centrale d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à Ottawa, en Ontario (latitude 45°22' nord; longitude 75°43' ouest; 79 m au-dessus du niveau de la mer), pendant deux étés consécutifs; le premier pour le fumier de bovins laitiers, le second, pour le fumier de bovins de boucherie. Le fumier provenait de petits troupeaux d'une taille équivalente à 20 unités animales. Le fumier produit par les vaches laitières contenait environ 10 % de litière (paille sèche et copeaux de bois), tandis que le fumier produit par les bovins de boucherie en contenait approximativement 50 %. Le fumier a été mélangé à l'aide d'une épandeur, de manière à produire un matériau homogène, puis transféré dans des cuves d'entreposage expérimentales.

Expérience d'entreposage de fumier

Les émissions de GES produites par trois méthodes différentes d'entreposage du fumier (sous forme liquide : L; en tas : T; composté : C) ont été quantifiées. Sur l'ensemble, c'est le fumier sous forme liquide qui était le plus anaérobie (à l'exception de la croûte de surface), le fumier composté était le plus aérobie, et le fumier en tas se situait entre les deux. Les émissions

provenant de trois échantillons de chacun des types d'entreposage ont été contrôlées pendant 14 semaines pour le fumier de bovins laitiers, et pendant 11 semaines pour le fumier de bovins de boucherie. Chaque cuve d'entreposage de fumier était constituée d'une charpente de bois et mesurait 1,00 m de profondeur, 1,22 m de largeur et 2,13 m de longueur (dimensions intérieures).

Afin de minimiser les variations de la teneur en eau du fumier et de reproduire l'environnement qui prévaut au centre du fumier entreposé tout en réduisant le plus possible la taille des cuves, différents types de pellicules ont été installées autour des parois des cuves. Pour le fumier entreposé sous forme liquide, une épaisse pellicule de plastique noir a servi à retenir l'eau, et les parois ont été renforcées. L'installation pour le fumier sous forme liquide devait reproduire les conditions environnementales qui existent dans des cuves d'entreposage hors sol. Pour ce qui est du fumier entreposé en tas, une pellicule de polyéthylène blanc, doublée de broche à poule, a été utilisée pour retenir l'humidité dans le fumier. Pour le fumier composté, une membrane d'étanchéité faite d'un matériau synthétique poreux (comme les membranes utilisées pour la construction domiciliaire) a servi à maintenir les échanges d'air tout en minimisant l'évaporation. De plus, deux tuyaux de PVC perforés ont été déposés au fond des cuves afin d'accroître la ventilation et favoriser le compostage du fumier (comme c'est le cas du système d'aération passive en andains d'Agriculture et Agroalimentaire Canada; Mathur, 1991 et 1992; Hayes et coll., 1993). Dans un système de compostage par aération passive, les réactions exothermiques créent un effet de cheminée à l'intérieur de l'andain, lequel pousse l'oxygène dans les tuyaux et dans la matière en compostage. Afin de minimiser la volatilisation d'ammoniac, une couche de 15 cm de fumier précomposté a été déposée au fond des cuves et au-dessus du fumier à composter. Finalement, dans le but de réduire l'incidence de la pluie et le dessèchement du fumier entreposé, une toile de plastique blanc a été installée au-dessus de chacune des cuves. La ventilation des cuves s'est faite de façon naturelle, sous l'effet du vent.

Mesure des émissions de GES

Puisque le carbone du fumier est produit par fixation autotrophe et libéré dans l'atmosphère sous forme de CO₂ sur une période relativement courte, les émissions de CO₂ provenant du fumier ne sont pas réputées contribuer au réchauffement de la planète et ne sont donc pas incluses dans le calcul de la contribution du fumier entreposé aux émissions de GES. Cependant, les émissions de CO₂ ont été mesurées de manière concomitante aux émissions de CH₄ et de N₂O afin de contrôler la décomposition aérobie et d'évaluer le degré d'étanchéité des enveloppes installées au-dessus des cuves, comme il est expliqué en détail ci-après.

Dans le cas de l'expérience sur le fumier de bovins laitiers, les traitements sous forme liquide, en tas et en compost ont été échantillonnés aux fins d'analyse des émissions de CH₄, de N₂O et de CO₂ en rotation parmi les trois méthodes d'entreposage de manière à ce que deux des trois méthodes soient échantillonnées chaque jour et que les trois méthodes soient échantillonnées deux fois par semaine. Les émissions de GES ont été mesurées pendant 14 semaines, du 21 mai au 18 août (jour civil : JC 141 à 230). Dans le cas de l'expérience sur le fumier de bovins de boucherie, l'échantillonnage à partir de chaque cuve a été réalisé en une journée, deux fois par semaine, pendant 11 semaines, du 2 juin au 15 août (JC 153 à 227). Cependant, du 6 au 22 juin (JC 157 à 173), l'échantillonnage a été fait selon la méthode décrite pour l'expérience sur le fumier de bovins laitiers. Comme les cuves contenant le fumier sous forme liquide continuaient de produire des émissions élevées de CH₄ le 15 août, l'échantillonnage pour ce traitement s'est poursuivi jusqu'au 25 octobre (JC 298). Les émissions de CH₄, de N₂O et de CO₂ provenant des cuves d'entreposage ont été mesurées au moyen d'un système d'essai en circuit fermé (Figure 1) qui a été positionné au-dessus de chacune des cuves devant être mesurées. Quatre ventilateurs ont été utilisés pour assurer un brassage adéquat de l'air à l'intérieur de la coquille du système et ont été positionnés de manière à entraîner le déplacement de l'air loin de la surface du fumier. Pour mesurer les concentrations de CH₄ et de N₂O, on a fait transiter des échantillons d'air de 10 ml à travers la membrane de caoutchouc moins de 2 minutes après avoir isolé la cuve et, subséquemment, toutes les 2,5 minutes sur une période de 10 minutes. Un échantillon d'air ambiant a été prélevé à 3 cm au-dessus de la surface du fumier avant l'isolement.

Tous les échantillons de CH₄ et de N₂O mesurés au fil du temps ont servi à déterminer la pente initiale

($t = 0$) servant au calcul du flux. Les échantillons d'air ont été entreposés à température ambiante et analysés moins de 48 heures après l'échantillonnage au moyen d'un chromatographe gazeux (Varian, Walnut Creek, CA). Un analyseur de CO₂ à infrarouge (modèle LI-6251 de LI-COR, Lincoln, NE) a été fixé en parallèle au tube muni d'une cloison (Figure 1). De l'air a été introduit dans le circuit en boucle au moyen d'une pompe à diaphragme située en aval du port d'échantillonnage des gaz. Les pentes des concentrations de CO₂ au fil du temps ont été mesurées avec un analyseur LI-6251 au moyen de trois séries de lectures de 1 minute à des intervalles de 1 seconde sur un enregistreur de données CR-21X (Campbell Scientific, Logan, UT). Les mesures ont commencé moins de 2 minutes après avoir recouvert les cuves. La variation des concentrations de CO₂ au fil du temps était affichée en temps réel sur un ordinateur portable aux fins de diagnostic. Une pente stable du CO₂ au fil du temps démontrait l'étanchéité du système et indiquait un mélange parfait de l'air à l'intérieur de la coquille. L'analyseur LI-6251 a été vidangé de son air ambiant entre chaque mesure des différentes cuves. Les émissions de GES (F_G exprimé en mg/kg⁻¹ de FS/s⁻¹ où FS = fumier sec) ont été calculées au moyen de l'équation suivante :

$$F_G = \frac{\delta C_G(0)}{\delta t} \cdot \frac{V_E M_G}{V_G} \cdot \frac{1}{m_m}$$

Où $\delta C_G(0)/\delta t$ représente le taux de variation de la concentration des GES au moment $t = 0$ (mmol/mol⁻¹ s⁻¹), V_E représente le volume de l'espace libre de la cavité (m³), M_G représente la masse moléculaire du GES (CO₂ et N₂O : 44 g/mol⁻¹, CH₄ : 16 g/mol⁻¹), V_G représente le volume du gaz à 21 °C (0,024 m³/mol⁻¹), et m_m représente la masse sèche initiale du fumier (kg).

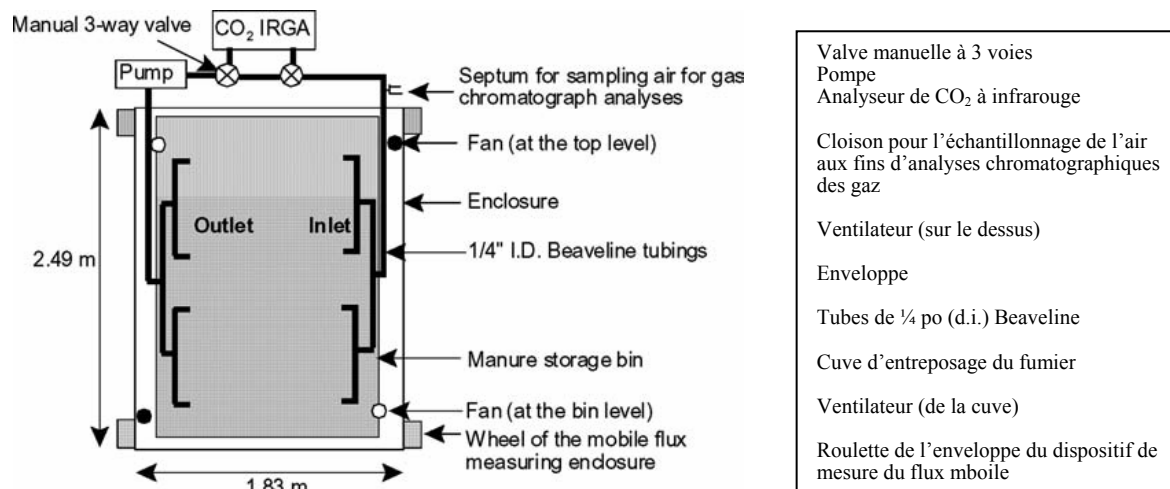


Figure 1 : Vue en plongée du système d'échantillonnage des gaz en boucle positionné au-dessus de chaque cuve d'entreposage de fumier aux fins d'évaluation des émissions de GES.

Les flux de CH₄ et de N₂O sur toute l'interface fumier-atmosphère sont fonction des coefficients de diffusion et des gradients de concentration entre les sites de production (ou de transformation) et la surface du fumier. À l'intérieur d'une cavité close à boucle fermée, le gradient de concentration des gaz varie au fil du temps, le taux de variation de la concentration du gaz à l'intérieur de la cavité diminue donc continuellement (Rochette et coll., 1997). Un modèle non linéaire a servi à décrire la variation de la concentration de GES lorsque les périodes ne sont pas suffisamment courtes pour produire des variations linéaires (Hutchinson et Livingston 1993). Puisque les concentrations de gaz dans le fumier sont considérablement plus élevées que dans l'atmosphère de l'espace libre, il faut du temps avant que le gradient entre le fumier et l'atmosphère au-dessus du fumier soit affecté de façon appréciable. Une approximation linéaire s'est avérée adéquate pour environ 75 % des inclinaisons de concentrations mesurées sur une période de 10 minutes. Dans les cas où cette approximation s'est avérée inadéquate, un modèle quadratique a été utilisé.

Détermination des concentrations de CH₄ et de N₂O

Les concentrations de méthane et de N₂O ont été mesurées au moyen d'un chromatographe gazeux couplé à un détecteur à ionisation de flamme pour le CH₄ et à un détecteur à capture d'électrons pour le N₂O. Pour le CH₄, les conditions décrites ci-dessous ont été mises en œuvre : i) injection d'un échantillon d'air de 10 ml à température ambiante dans une boucle d'échantillonnage de 2 ml; ii) température du détecteur fixée à 390 °C et température du four fixée à 60 °C; iii) colonne constituée de maille Porapak-N 80/100 insérée dans une colonne en acier inoxydable de 4,8 m de longueur et de 3,18 mm de diamètre intérieur (Superlco, PA, É.-U.); iv) débits gazeux fixés à 30 ml/min⁻¹ pour l'azote, à 30 ml/min⁻¹ pour l'hydrogène et à 300 ml/min⁻¹ pour l'air. La quantification du méthane (temps de rétention : 1,8 min) a été réalisée en comparant l'aire de pic à celles d'étalons de 1,36, de 51,0 et de 100,1 ppmv préparés sur mesure par Matheson Gases (Ottawa, Canada). Pour ce qui est du N₂O, un détecteur de capture d'électrons a été utilisé, avec du Ar-CH₄ comme gaz vecteur, de même qu'une boucle d'échantillonnage de 2 ml et une colonne remplie de Porapak-Q (Superlco, PA, É.-U.). Les deux étalons de N₂O utilisés étaient de 1,17 ppmv et de 10,0 ppmv et ont été préparés par Matheson Gas (Ottawa, Canada). Pour les deux gaz, le seuil inférieur de détection a été fixée à entre 10 et 20 ppbv. Entre chaque série de 5 échantillons d'air, un étalon a été injecté dans le système.

Mesure de la concentration de CO₂

L'analyseur de CO₂ à infrarouge a été utilisé en mode absolu à l'intérieur d'un intervalle de 0 à 1 500 ppmv de CO₂. Un épurateur contenant de la chaux sodée a servi à

fournir de l'air sans CO₂ à la cellule de référence. Pendant une utilisation normale, l'épurateur était changé deux fois par semaine. L'analyseur LI-6251 a été calibré avant chaque série de mesures réalisées au champ, en fonction d'une concentration de référence à 618 ppmv de CO₂ dans l'azote gazeux (Matheson Gas, Ottawa, Canada).

Composition chimique du fumier

Les concentrations de carbone, de nitrate et d'ammonium dans le fumier de bovins laitiers ont été mesurées les JC 141, 148 et 176. La teneur en eau initiale a également été mesurée ces jours-là. Le fumier de bovins de boucherie a été échantillonné sept fois à partir de chacune des cuves les JC 150, 152, 164, 178, 192, 220 et 227, de même que trois fois de plus à partir des cuves de fumier sous forme liquide les JC 251, 279 et 300. L'évaluation de la teneur en eau a été faite de façon gravimétrique. Le pH a été mesuré après dilution avec de l'eau désionisée (ratio de 1:5). Environ 10 g de fumier frais a été extrait avec 100 ml à 2 M de KCl après un brassage d'une heure. Les extraits ont été filtrés, puis analysés (Keeney et Nelson 1982) pour l'azote minéral (NH₄⁺-N et NO₃⁻-N) au moyen d'un auto-analyseur TRAACS 800 (méthode 325.2 de Bran-Luebbe, Inc., Technicon Industrial Systems Corp., Elmsford, New York). La teneur totale en carbone soluble et inorganique dans les extraits de KCl a été mesurée au moyen d'un analyseur de carbone total (Shimadzu TOC-5050). La teneur en carbone organique soluble a été déterminée en soustrayant la teneur totale en carbone inorganique soluble de la teneur totale en carbone. Les teneurs totales en carbone et en azote ont été déterminées par combustion à l'aide d'un analyseur azote/carbone/soufre NA 1500 (Carlo Erba). La densité volumétrique du fumier humide a été établie à partir d'un ratio de 1 g/l⁻¹ en utilisant 1 l de fumier humide.

Conditions environnementales des cuves d'entreposage

Pendant toute la durée de l'expérience, la température à la surface du fumier et au centre de la cuve a été enregistrée toutes les heures. Des observations relatives à la température ambiante, à la pression (transducteur de pression PX961-16A5V, Omega Engineering Inc., Stamford, CT), à l'humidité relative (sonde d'humidité HMP 35A, Vaisala, Helsinki, Finlande), à la vitesse du vent et à la direction du vent ont également été enregistrées sur les lieux de l'expérience, et des moyennes ont été établies sur une base horaire. Dans les cas où il manquait certaines données météorologiques en raison d'un bris d'instrument, les données en provenance de l'Aéroport d'Ottawa (à une distance d'environ 7,4 km du site à l'étude) ont été utilisées. Les valeurs moyennes de la température et de la pression ambiantes, sur des périodes de trois et de six heures, ont été calculées pour

quatre intervalles de temps (9 h 00 à 12 h 00; 6 h 00 à 9 h 00; 6 h 00 à 12 h 00; 0 h 00 à 6 h 00) avant de procéder à la mesure des émissions dans le but de déterminer quel intervalle avait le plus d'incidence sur l'émission de GES. La tendance relative à la pression a quant à elle été calculée comme étant la variation de la pression ambiante entre le moment où la mesure des émissions a été prise et 3, 6, 12 et 24 h avant cette mesure.

Analyses statistiques

L'analyse par mesures répétées (O'Brien et Kaiser, 1985) a été utilisée pour analyser les effets de l'entreposage du fumier sur les émissions de GES. Les mesures répétées d'une unité expérimentale au fil du temps sont rarement indépendantes (O'Brien et Kaiser, 1985; Von Ende, 1993). Par conséquent, parce que les émissions de GES ont été mesurées à partir des mêmes 9 cuves d'entreposage pendant plusieurs semaines, nous nous attendions à observer une absence d'indépendance dans les émissions au fil du temps. Une analyse par répétition des mesures a pour effet de segmenter la variation en un effet de traitement et un effet de temps, conjugués à une interaction temps-traitement.

Les données ont été regroupées selon trois phases en fonction du taux des émissions, lesquelles correspondent à la phase initiale (P1), à la phase intermédiaire (P2) et à la phase finale (P3) des émissions de GES, tel qu'il est illustré aux Figures 2 à 4. Nous avons utilisé une analyse par mesures répétées pour étudier l'effet de l'entreposage du fumier et de la semaine de la mesure, de même que leur interaction, sur les émissions de GES au cours des trois phases clés. Une estimation hebdomadaire des émissions de GES a été calculée en établissant la moyenne des émissions provenant des échantillons pendant une semaine. Dans les cas où un seul échantillon avait été prélevé pendant la semaine, les valeurs de cet échantillon ont été utilisées comme estimation hebdomadaire. Une analyse par mesures répétées ne peut être réalisée en l'absence de certaines valeurs, à moins que l'on ne procède à des hypothèses relativement aux données manquantes. Par conséquent, dans les cas où une moyenne hebdomadaire ne permettait pas de produire toutes les estimations nécessaires, cette semaine était exclue de l'analyse. Dans le cadre de l'expérience sur le fumier de bovins laitiers, nous n'avons pu obtenir les valeurs relatives aux émissions de N₂O au cours de la troisième semaine et à celles du CO₂ pour la deuxième semaine. Dans le cadre de l'expérience sur le fumier de bovins de boucherie, ce sont les émissions initiales de CH₄ et les émissions de CO₂ au cours de la cinquième semaine qui n'ont pu être mesurées. Des analyses par mesures répétées distinctes ont donc été réalisées pour chacune de ces phases et pour chacun des gaz à l'aide de la procédure GLM (General Linear Model, SAS, version 6) par répétitions des mesures. Cette procédure permet l'analyse tant unidimensionnelle que multidimensionnelle des

mesures répétées. Conformément aux recommandations formulées par Potvin et coll. (1990), les conclusions ont été fondées sur les tests unidimensionnels dans les cas où les seuils de signification corrigés selon la méthode de Greenhouse-Geisser concordaient à ceux ayant été soumis à la correction de Huynh & Feldt, auquel cas nous publions les seuils de signification corrigés selon la méthode de Huynh & Feldt. Dans les cas où les seuils de signification corrigés n'étaient pas concordants, nous avons utilisé les tests multidimensionnels assortis d'un seuil de signification de $\alpha = 0,1$ puisque nous disposions de nombreuses semaines, comparativement au nombre d'échantillons (Stevens 1992). L'analyse séquentielle de la régression a été utilisée pour déterminer l'existence d'une corrélation entre les émissions de GES et les variables environnementales. Plus précisément, nous avons vérifié l'existence de relations entre les émissions de GES et la température ambiante moyenne (T_a), la pression ambiante moyenne (P), la variation de pression (DP), l'humidité relative (RH), la vitesse du vent (U), la direction du vent (H), la température à la surface du fumier (T_s) et la température au centre du fumier (T_c). Nous avons également procédé à une analyse séquentielle de la régression afin de déterminer s'il était possible d'expliquer les variations dans les émissions de GES par des différences dans la composition chimique du fumier de bovins de boucherie. Nous avons ainsi vérifié l'existence de corrélations entre les émissions et les 12 variables chimiques suivantes : le NH₄⁺, le NO₃⁻, l'azote inorganique (INN), le carbone total (TC), le carbone inorganique (IC), le carbone organique total (TOC), le taux d'humidité (%W), le pH, le pourcentage d'azote (%N), le pourcentage de carbone (%C), la densité volumétrique (BD) et la teneur en cendres (ASH).

Estimation des émissions de GES annuelles

La totalité des émissions de GES produites par les différentes méthodes d'entreposage a été quantifiée en mesurant les émissions de GES provenant d'un volume connu de fumier. Contrairement à la pratique courante dans les fermes d'élevage, aucun fumier frais n'a été ajouté dans les installations d'entreposage. Nous avons choisi cette approche afin d'être en mesure d'assigner la totalité des émissions de GES à un volume connu de fumier. Les émissions de GES cumulatives pendant la période d'échantillonnage sont réputées représenter environ 90 % du total des émissions annuelles.

Conversion des données exprimées en kg par volume de fumier sec en kg par tête de bétail par année

Les quantités moyennes de fumier sec produites par année et par tête de bétail en Amérique du Nord par les bovins laitiers (GIEC, 2001, Tableau B-1, p. : 4.39) et les autres bovins (GIED, 2001, Tableau B-3, p. : 4.43) ont été converties en solides volatils (VS) en divisant ces

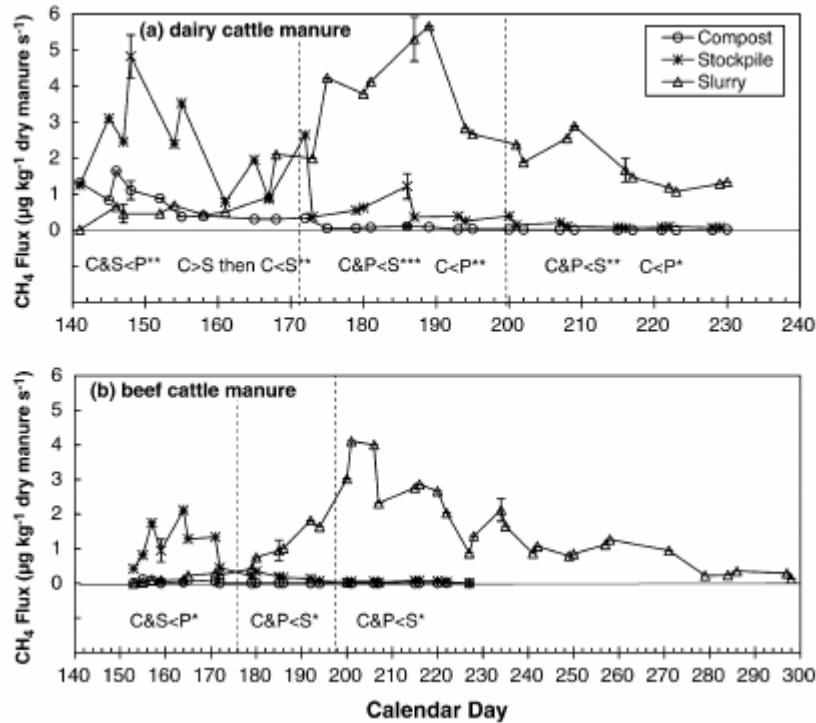


Figure 2 : Émissions de méthane provenant a) de fumier de bovins laitiers et b) de fumier de bovins de boucherie entreposé sous forme de compost, en tas et sous forme liquide pendant la période estivale. Les différences importantes observées entre les trois méthodes d'entreposages et mises en lumière à la suite de l'analyse par mesures répétées sont illustrées pour les phases délimitées par les lignes pointillées. * $P = 0,05$; ** $P = 0,01$; *** $P = 0,001$.

quantités par 92 % (compte tenu d'une teneur en cendres de 8 %, GIEC, 2001). La valeur de la production quotidienne de VS a ensuite été multipliée par 365 jours; la valeur de la production annuelle a donc été estimée à 1 909 kg de VS/tête⁻¹/année⁻¹ pour les bovins laitiers et à 858 kg de VS/tête⁻¹/année⁻¹ pour les autres bovins. La valeur moyenne de la production de fumier des bovins autres que les bovins laitiers a été appliquée aux bovins de boucherie. Les émissions de GES annuelles estimatives tirées des mesures que nous avons prises et exprimées en équivalents de CO₂ ont été divisées par le pourcentage de VS (92 %), puis multipliées par la production annuelle moyenne de VS, de manière à pouvoir les exprimer en kg par tête de bétail par année.

Émissions totales de GES au Canada provenant d'installations d'entreposage et pertinentes dans le cadre de la présente expérience

La population de bovins laitiers au Canada s'établit à 1,06 M de vaches et à 0,72 M de génisses (Statistiques Canada, 2003). Comme les génisses produisent environ 50 % moins de fumier que les vaches laitières, la population effective de bovins laitiers a été estimée à 1,48 M de têtes de bétail. La population de bovins de boucherie élevés sur des fermes disposant d'installations d'entreposage du fumier a été estimée à 6,80 M de bêtes (Statistiques Canada, 2003). Étant donné que la population de veaux de boucherie représente environ

40 % du nombre total de bovins de boucherie et que la quantité de fumier produit par les génisses est semblable à celle produite par les vaches de boucherie, la population effective de bovins de boucherie a été estimée à 4,09 M de têtes. Les émissions annuelles de CH₄ et de N₂O produites par le fumier de bétail, exprimées en équivalents de CO₂, ont été multipliées par la population effective de bovins au Canada élevés sur des fermes disposant d'installations d'entreposage du fumier, puis par un facteur lié à la proportion de l'entreposage du fumier pertinente dans le cadre de la présente étude (pour les bovins laitiers : 33 % sous forme liquide/purin et 40 % sous forme solide; pour les bovins de boucherie : 6 % sous forme liquide/purin et 57 % sous forme solide; Statistiques Canada 2003). Ces opérations ont permis de quantifier les émissions totales au Canada à partir des installations d'entreposage visées par la présente étude.

Les valeurs des émissions totales imputables aux bovins laitiers et aux bovins de boucherie, si l'on tient pour acquis que les méthodes d'entreposage ont été adoptées intégralement par les éleveurs, ont été obtenues en multipliant les émissions annuelles de CH₄ et de N₂O, exprimées en équivalents de CO₂ par le produit de la population effective de bovins au Canada multipliée par le facteur lié à la proportion de l'entreposage pertinente dans le cadre de la présente étude, laquelle population totalise 1,09 M de bovins laitiers et 2,59 M de bovins de boucherie.

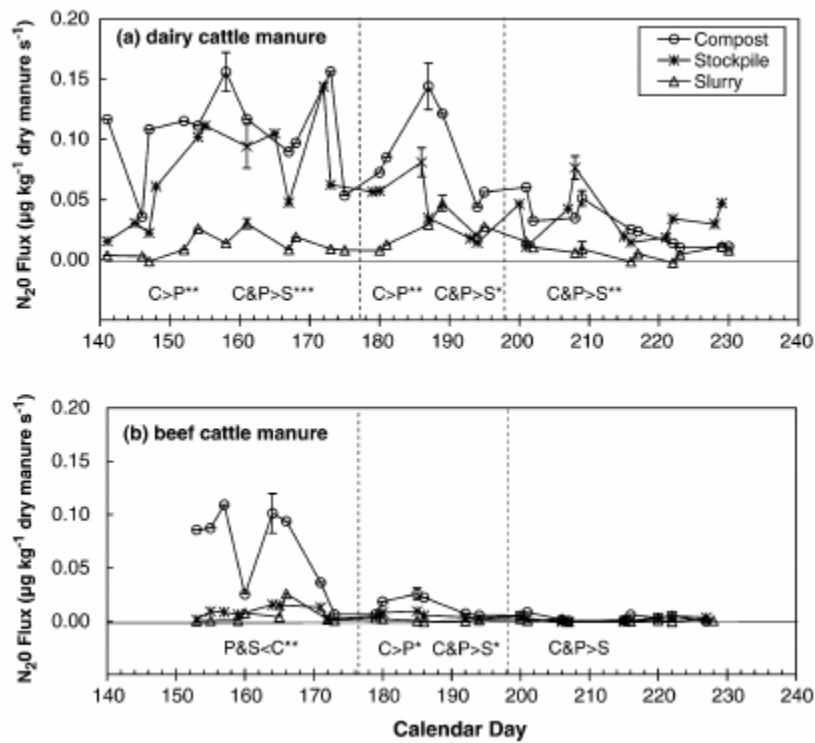


Figure 3 : Émissions d'oxyde nitreux provenant a) de fumier de bovins laitiers et b) de fumier de bovins de boucherie entreposé sous forme de compost, en tas et sous forme liquide pendant la période estivale. Les différences importantes observées entre les trois méthodes d'entreposages et mises en lumière à la suite de l'analyse par mesures répétées sont illustrées pour les phases délimitées par les lignes pointillées. * $P = 0,05$; ** $P = 0,01$; *** $P = 0,001$.

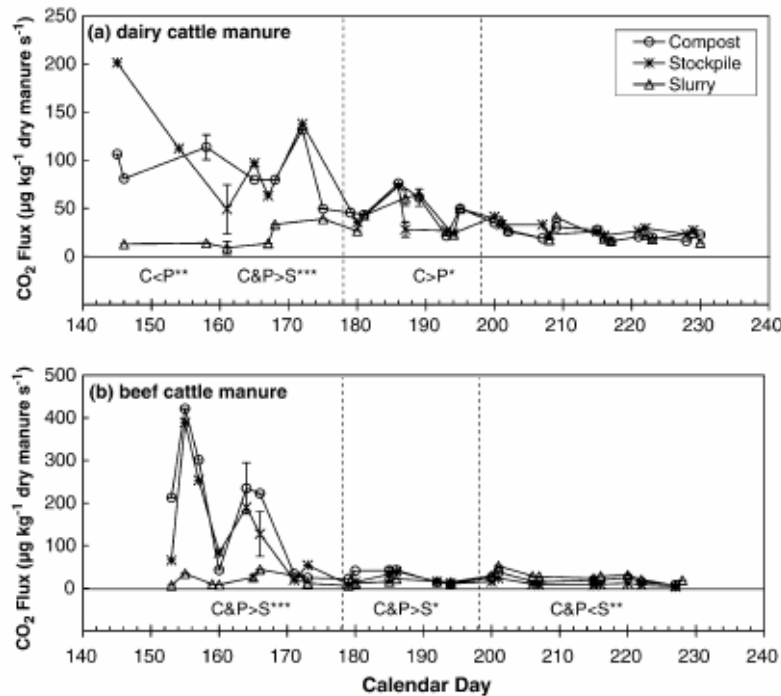


Figure 4 : Émissions de dioxyde de carbone provenant a) de fumier de bovins laitiers et b) de fumier de bovins de boucherie entreposé sous forme de compost, en tas et sous forme liquide pendant la période estivale. Les différences importantes observées entre les trois méthodes d'entreposages et mises en lumière à la suite de l'analyse par mesures répétées sont illustrées pour les phases délimitées par les lignes pointillées. * $P = 0,05$; ** $P = 0,01$; *** $P = 0,001$.

Réduction des émissions

La réduction des émissions de GES a été évaluée en défalquant les émissions totales réelles au Canada imputables à l'entreposage soit du fumier de bovins laitiers ($0,57 + 0,35 \text{ Tg d'ég-CO}_2/\text{année}^{-1}$), soit du fumier de bovins de boucherie ($0,08 + 0,15 \text{ Tg d'ég-CO}_2/\text{année}^{-1}$) le total des émissions imputables à l'adoption intégrale de l'une ou de l'autre des méthodes d'entreposage. Aucuns résultats relatifs au fumier sous forme liquide n'ont été publiés puisque l'adoption de cette méthode d'entreposage entraîne un surplus dans les cas où le méthane n'est pas recyclé.

Résultats et discussion

Émissions de méthane

Les émissions de méthane provenant du fumier composté de bovins laitiers étaient initialement peu élevées ($< 2 \mu\text{g}/\text{kg}^{-1}$ de FS/s⁻¹) et ont diminué tout au long de l'expérience (Figure 2). D'importantes émissions épisodiques de CH₄ provenant du fumier en tas ont été mesurées pendant la phase initiale, avec des pics allant de 2 à 5 $\mu\text{g}/\text{kg}^{-1}$ de FS/s⁻¹, puis ces émissions ont diminué pendant les phases intermédiaire et finale. Les émissions de méthane provenant du fumier sous forme liquide étaient initialement peu élevées, mais ont augmenté au cours de la phase initiale, atteint un pic à 5,7 $\mu\text{g}/\text{kg}^{-1}$ de FS/s⁻¹ pendant la phase intermédiaire, puis ont diminué au cours de la phase finale. À la fin de l'expérience, ces installations continuaient de produire des émissions de méthane. Les émissions de méthane provenant du fumier en tas étaient considérablement plus élevées que celles des deux autres méthodes d'entreposage pendant la phase initiale (P1 $P < 0,001$), et plus élevées que les émissions provenant du fumier en compost pendant les phases intermédiaire et finale (P2 $P < 0,01$; P3 $P < 0,05$).

Les émissions de méthane provenant du fumier de bovins de boucherie en compost étaient très faibles (Figure 2b). Les émissions de méthane provenant du fumier de bovins de boucherie en tas ont affiché une tendance semblable à celle des émissions imputables au fumier de bovins laitiers en tas, bien qu'elles étaient considérablement moins élevées ($P = 0,0012$), soit le tiers des émissions provenant du fumier de bovins laitiers. Les émissions de CH₄ saisonnières attribuables au fumier de bovins de boucherie sous forme liquide étaient similaires aux émissions de CH₄ provenant du fumier de bovins laitiers sous forme liquide (Figure 2a et 2b).

Une corrélation positive entre les émissions de méthane provenant du fumier de bovins de boucherie en compost et l'azote inorganique total a été démontrée (Tableau 1), soit surtout sous forme de NH₄⁺ pendant la phase initiale et de NO₃⁻ pendant la phase intermédiaire. L'ammonium est une source importante d'azote pour les bactéries méthanigènes (Knowles, 1993) et favorise par conséquent la croissance bactérienne, de même que la production de CH₄. Une corrélation positive a été établie entre les émissions produites par le fumier en tas et la teneur en carbone inorganique qui était initialement élevée à la P1, puis a diminué au cours des phases subséquentes. Dans le cas du fumier sous forme liquide, les émissions de CH₄ ont affiché une corrélation positive avec le pH. En revanche, le R² relativement peu élevé du modèle de régression indique que différents descripteurs sont nécessaires pour arriver à mieux prévoir les émissions de CH₄.

Une corrélation positive a par ailleurs été démontrée entre les émissions de méthane et les températures de surface et au centre du fumier (Tableaux 2 et 3). À mesure que les températures augmentaient, la méthanogénèse augmentait dans les trois types d'installations d'entreposage, bien que ce soit l'augmentation globale de la température dans l'installation d'entreposage du fumier sous forme liquide qui ait entraîné la plus importante augmentation de la production de CH₄.

Tableau 1 : Incidence de la composition chimique du fumier de bovins de boucherie sur les émissions de GES

Traitement	Gaz	Variable 1	R ² partiel	Variable 2	R ² partiel	Variable 3	R ² partiel	Autres variables sign.	R ² partiel
Compost	CH ₄	+INN	0,71						0,71
	N ₂ O	+NH ₄ ⁺	0,64	-%N	0,13				0,77
	CO ₂	+NH ₄ ⁺	0,52	-%N	0,21	-BD	0,09		0,81
En tas	CH ₄	+IC	0,89	+A _{sh}	0,04				0,92
	N ₂ O	+pH	0,35	+IC	0,19				0,53
	CO ₂	+IC	0,81	-A _{sh}	0,09	+%W	0,06	-%N	0,98
Liquide	CH ₄	+pH	0,27						0,27
	N ₂ O	Aucune variable significative							
	CO ₂	Aucune variable significative							

Les modèles ont été créés avec la procédure Stepwise de SAS. Seules les variables qui étaient significatives à $\alpha = 0,05$ au moyen du SS Type II ont été incluses. %W = taux d'humidité; INN = azote inorganique; TC = carbone total; IC = carbone inorganique; BD = densité volumétrique; TOC = carbone organique total

Tableau 2 : Incidence des conditions environnementales sur les émissions de GES provenant du fumier de bovins laitiers

Traitement	Gaz	Variable 1	R ² partiel	Variable 2	R ² partiel	Variable 3	R ² partiel	Autres variables sign.	R ² partiel
Compost	CH ₄	+T _S	0,58	-T _a 3	0,07				0,65
	N ₂ O	+T _C	0,36	-ΔP 1	0,05				0,40
	CO ₂	+T _C	0,54	+RH	0,03				0,57
En tas	CH ₄	+T _S	0,50	+T _C	0,08	-Θ		-T _a 1; -ΔP 3	0,70
	N ₂ O	AUCUN							
	CO ₂	+T _S	0,50	-U	0,04	+T _C		+RH	0,62
Liquide	CH ₄	+T _C	0,52	+T _S	0,03				0,55
	N ₂ O	+T _S	0,20	-ΔP 3	0,05				0,25
	CO ₂	+T _C	0,45	-U	0,05				0,50

Les modèles ont été créés avec la procédure Stepwise de SAS. Seules les variables qui étaient significatives à $\alpha = 0,05$ au moyen du SS Type II ont été incluses.

T_a = température ambiante moyenne entre 1 : 9 h et 12 h; 2 : 6 h et 9 h; 3 : 6 h et 12 h; 4 : 0 h et 6 h

P = pression ambiante moyenne entre 1 : 9 h et 12 h; 2 : 6 h et 9 h; 3 : 6 h et 12 h; 4 : 0 h et 6 h

ΔP = variation de pression; variation calculée sur 1 : 3 heures; 2 : 6 heures; 3 : 12 heures; 4 : 24 heures

RH = humidité relative

U = vitesse du vent

Θ = direction du vent

T_S = température de surface

T_C = température au centre

Ainsi, les bactéries méthanigènes ont réagi à l'augmentation de la température et à l'amélioration des conditions anaérobiques du milieu. Comme les microsites anaérobiques étaient moins nombreux dans le fumier en tas, les augmentations de température dans ce milieu ont entraîné une augmentation moins importante de la production de CH₄, comparativement au fumier sous forme liquide. Au cours de la phase initiale, de petites quantités de CH₄ ont été produites par le fumier en compostage lorsque la température au centre de l'installation augmentait et qu'un certain nombre de sites anaérobiques demeuraient présents. La production de CH₄ en provenance du fumier en tas et du fumier en compostage était peu élevée au cours des phases intermédiaire et finale. À mesure que la température diminuait et que la matière organique se décomposait, le fumier devenait plus poreux et mieux aéré, entraînant une diminution des émissions de CH₄.

Émissions d'oxyde nitreux

Les émissions d'oxyde nitreux imputables au fumier de bovins laitiers composté et en tas étaient variables au cours de la phase initiale, s'établissant entre 0,05 et 0,16 μg/kg⁻¹ de FS/s⁻¹ (Figure 3a), puis ont diminué considérablement au cours de la phase finale (<0,08 μg/kg⁻¹ de FS/s⁻¹). Les émissions d'oxyde nitreux provenant du fumier composté étaient considérablement plus élevées que celles du fumier en tas au cours des phases initiale et intermédiaire ($P < 0,01$; $P < 0,01$). Les émissions d'oxyde nitreux provenant du fumier sous forme liquide étaient, quant à elles, relativement faibles (< 0,05 μg/kg⁻¹ de FS s⁻¹) et considérablement moins élevées que celles qui provenaient du fumier composté

et en tas ($P < 0,05$). Les émissions d'oxyde nitreux imputables au fumier de bovins de boucherie composté étaient initialement très variables (0,03 à 0,11 μg/kg⁻¹ de FS/s⁻¹), et ont été faibles au cours des phases intermédiaire et finale (< 0,03 μg/kg⁻¹ de FS/s⁻¹). Les émissions d'oxyde nitreux provenant du fumier en tas et du fumier sous forme liquide sont demeurées faibles pendant toute la durée de l'expérience (< 0,03 μg/kg⁻¹ de FS/s⁻¹). Les émissions d'oxyde nitreux attribuables au fumier composté étaient plus importantes que celles provenant du fumier en tas et du fumier sous forme liquide au cours de la phase initiale ($P < 0,001$), tandis que les émissions provenant du fumier en tas étaient similaires à celles qui provenaient du fumier sous forme liquide. Au cours des phases intermédiaire et finale, les émissions de N₂O provenant du fumier composté et en tas étaient supérieures à celles produites par le fumier sous forme liquide ($P < 0,01$; $P < 0,05$).

Des changements chimiques dans le fumier de bovins de boucherie composté et entreposé en tas indiquent que les émissions initiales de N₂O étaient imputables à la nitrification, tandis que les émissions subséquentes étaient attribuables à un taux de dénitrification peu élevé (Tableau 4). Pendant le compostage, la teneur en NH₄⁺ a atteint un pic à 4,2 mg/g⁻¹ après 12 jours, puis a diminué pour s'établir à 0,2 mg/g⁻¹ (données non illustrées). La concentration en carbone inorganique a suivi une tendance similaire à celle du NH₄⁺. Le NO₃⁻ a atteint un pic à 1 300 mg/g⁻¹ immédiatement après que l'ammonium ait commencé à diminuer et se soit stabilisé à 700 mg/g⁻¹. La concentration en ammonium est demeurée peu élevée dans le fumier en tas, alors que le carbone inorganique a augmenté de 40 à 78 ppmv en 12 jours, puis a diminué pour s'établir à 19 ppmv.

Tableau 3 : Incidence des conditions environnementales sur les émissions de GES provenant du fumier de bovins de boucherie

Traitement	Gaz	Variable 1	R ² partiel	Variable 2	R ² partiel	Variable 3	R ² partiel	Autres variables sign.	R ² partiel
Compost	CH ₄	T _s	0,60	U	0,16				0,75
	N ₂ O	T _s	0,68	Θ	0,06	ΔP 1	0,02	RH	0,80
	CO ₂	T _s	0,74	U	0,11	Θ	0,001		0,86
En tas	CH ₄	T _C	0,43	U	0,05				0,48
	N ₂ O	T _C	0,08	T _a 3	0,07				0,20
	CO ₂	T _C	0,68	U	0,10	T _s	0,02		0,81
Liquide	CH ₄	T _a 1	0,20	U	0,05				0,25
	N ₂ O	Aucune variable sign.							
	CO ₂	U	0,37	T _a 1	0,10	Θ	0,07		0,54

Les modèles ont été créés avec la procédure Stepwise de SAS. Seules les variables qui étaient significatives à α = 0,05 au moyen du SS Type II ont été incluses.

T_a = température ambiante moyenne entre 1 : 9 h et 12 h; 2 : 6 h et 9 h; 3 : 6 h et 12 h; 4 : 0 h et 6 h

P = pression ambiante moyenne entre 1 : 9 h et 12 h; 2 : 6 h et 9 h; 3 : 6 h et 12 h; 4 : 0 h et 6 h

ΔP = variation de pression; variation calculée sur 1 : 3 heures; 2 : 6 heures; 3 : 12 heures; 4 : 24 heures

RH = humidité relative

U = vitesse du vent

Θ = direction du vent

T_s = température de surface

T_C = température au centre

Peu de temps après que le carbone eut commencé à diminuer, la concentration de NO₃⁻ a augmenté, indiquant de ce fait que le carbone inorganique était la principale source d'azote pour la nitrification. Comme les émissions de N₂O provenant du fumier sous forme liquide étaient limitées, ni le modèle statistique environnemental, ni le modèle statistique chimique n'ont permis de segmenter efficacement la variance et, dès lors, n'ont eu que peu de valeur prévisionnelle (Tableaux 1, 2 et 3). Pour les deux types de fumier composté, c'est la température (de surface et au centre) qui était responsable de la plus grande partie des variations observées au chapitre des émissions de N₂O (Tableaux 2 et 3). La température moyenne la plus élevée au centre au cours de la phase initiale a été observée dans le fumier composté de bovins laitiers et de bovins de boucherie (50 et 72 °C). Ces résultats

démontrent que le système d'aération passive en andains s'est avéré efficace pour améliorer la ventilation du fumier et que les réactions exothermiques avec l'O₂ étaient nombreuses. La température au centre du fumier en tas et du fumier sous forme liquide était supérieure, respectivement de 10 et de 60 °C et de 5 et de 15 °C, à celle de l'air ambiant pendant la journée.

Les émissions de N₂O saisonnières provenant du fumier de bovins laitiers et du fumier de bovins de boucherie étaient très différentes (Figure 3a et b). Le fumier de bovins laitiers en tas a produit davantage d'émissions de N₂O que le fumier de bovins de boucherie en tas. Les émissions d'oxyde nitreux provenant du fumier de bovins laitiers composté étaient similaires aux émissions provenant du fumier de bovins de boucherie au cours de la phase initiale, mais supérieures à ces dernières au cours des phases

Tableau 4 : Changements dans la composition chimique du fumier entreposé dans des conditions variables

Conditions d'entreposage	Moment de l'échantillonnage	NH ₄ ⁺ (μg g ⁻¹)	NO ₃ ⁻ (μg g ⁻¹)	pH	C/N	Densité volumétrique (g l ⁻¹)	% humidité
<i>Fumier de bovins laitiers</i>							
	Début	1 383	9	n.d.	20,1	n.d.	74,2
Compost	37 jours	2 010	1 790	n.d.	16,5	n.d.	74,2
En tas	37 jours	850	679	n.d.	14,8	n.d.	74,3
Sous forme liquide	37 jours	940	0	n.d.	19,9	n.d.	82,2
<i>Fumier de bovins de boucherie</i>							
	Début	1 670	4	9,01	35,0	69,2	58,0
Compost	Fin	197	722	9,15	17,6	113,8	57,7
En tas	Fin	265	1 078	8,65	17,4	79,0	63,1
Sous forme liquide	Fin	492	53	7,31	21,5	89,7	86,2

Les mesures ont été prises au début de l'expérience, après 37 jours (fin de la première phase) pour le fumier de bovins laitiers, et à la fin de l'expérience pour le fumier de bovins de boucherie. « n.d. » : mesure non disponible.

Tableau 5 : Émissions de GES (en g kg⁻¹ et en éq-CO₂) pendant une période d'entreposage estivale de 3 mois avec un potentiel de réchauffement de 23 pour le méthane et de 296 pour le N₂O

Conditions d'entreposage	CH ₄ (g CH ₄ /kg ⁻¹ FS)	N ₂ O (g N ₂ O/kg ⁻¹ FS)	CO ₂ (g CO ₂ /kg ⁻¹ FS)	CH ₄ (g éq-CO ₂ /kg ⁻¹ FS)	N ₂ O (g éq-CO ₂ /kg ⁻¹ FS)	CH ₄ + N ₂ O (g éq-CO ₂ /kg ⁻¹ FS)
<i>Fumier de bovins laitiers</i>						
Compost	1,52	0,582	398,58	35,0	172,3	207,2
En tas	7,92	0,403	440,00	182,2	119,3	301,4
Liquide	15,96	0,101	208,13	367,1	29,9	397,0
Liquide (5 mois) ^a	24,77	0,101	231,25	569,8	29,9	599,7
<i>Fumier de bovins de boucherie</i>						
Compost	0,14	0,162	340,06	3,2	48,0	51,2
En tas	2,85	0,034	358,11	65,6	10,1	75,6
Liquide	9,76	0,017	141,69	224,5	5,0	229,5
Liquide (5 mois) ^a	15,15	0,017	157,43	348,5	5,0	353,5

a : Estimation obtenue en multipliant la valeur des émissions provenant du fumier liquide de bovins laitiers sur 3 mois par 5/3 mois pour les émissions provenant du fumier liquide de bovins de boucherie.

intermédiaire et finale. La dénitrification plus importante du fumier de bovins laitiers au cours des phases intermédiaire et finale pourrait expliquer l'augmentation des émissions de N₂O.

Émissions de dioxyde de carbone

Les émissions de dioxyde de carbone provenant du fumier composté et en tas de bovins laitiers étaient initialement élevées (50 et 200 µg/kg⁻¹ de FS/s⁻¹), mais ont diminué avec le temps (Figure 4a). Les émissions de dioxyde de carbone imputables au fumier sous forme liquide ont augmenté lentement pour atteindre un maximum de 65 µg/kg⁻¹ de FS/s⁻¹ le JC 189, puis ont diminué. Les émissions de dioxyde de carbone attribuables au fumier en compostage et en tas étaient considérablement plus élevées que celles provenant du fumier sous forme liquide ($P < 0,001$) au cours de la phase initiale. Pendant la phase intermédiaire, les émissions de CO₂ provenant du fumier en compostage et du fumier sous forme liquide étaient plus élevées que les émissions imputables au fumier en tas ($P < 0,05$). À la troisième phase, les émissions de CO₂ étaient faibles (< 50 µg/kg⁻¹ de FS/s⁻¹), et aucune différence significative entre les traitements n'a été observée.

Les émissions de dioxyde de carbone provenant du fumier de bovins de boucherie en compost et en tas ont augmenté au cours de la première semaine pour atteindre 400 µg/kg⁻¹ de FS/s⁻¹, puis ont rapidement diminué (Figure 4b). Aucune tendance saisonnière relative aux émissions de CO₂ n'a été observée à l'égard du fumier sous forme liquide. Initialement, les émissions de CO₂ provenant du fumier en compost et en tas étaient plus élevées que celles du fumier sous forme liquide ($P < 0,001$), mais aucune différence significative n'a été observée entre les émissions de CO₂ attribuables au fumier en compost et celles provenant du fumier en tas.

Les émissions ont été faibles pour le reste de la saison (< 50 mg/kg⁻¹ de FS/s⁻¹), malgré que les émissions provenant du fumier en compost et en tas soient demeurées supérieures à celles du fumier sous forme liquide ($P < 0,01$).

Une corrélation positive entre les émissions de dioxyde de carbone imputables au fumier de bovins de boucherie en compost et la concentration en NH₄⁺ a été observée. Dans le fumier en tas, les émissions de CO₂ ont affiché une corrélation avec les concentrations de carbone inorganique. Comme le fumier sous forme liquide n'a produit que peu d'émissions de CO₂, les corrélations entre ce facteur et les variables chimiques sont demeurées limitées. Les émissions de dioxyde de carbone provenant du fumier en compost et en tas ont par ailleurs affiché une corrélation positive avec les variables de température (en surface et au centre) (Tableaux 2 et 3), lesquelles étaient considérablement plus élevées que les températures ambiantes. Ces résultats démontrent une décomposition aérobie importante au cours de la phase initiale. Le recul des émissions de CO₂ avec le temps indique que la plus grande partie de la matière organique a vraisemblablement été consommée par les microbes.

Les tendances observées au chapitre des émissions de CO₂ étaient semblables pour les deux expériences, bien que les émissions initiales aient été plus importantes dans le cas du fumier de bovins de boucherie que dans celui du fumier de bovins laitiers. Le fumier de bovins de boucherie était mieux ventilé en raison de la plus grande proportion de litière. Le dégagement rapide du carbone organique est responsable du pic des émissions de CO₂ est vraisemblablement attribuable au niveau élevé de O₂. Les émissions de dioxyde de carbone provenant du fumier de bovins laitiers sous forme liquide ont atteint un pic vers le milieu de l'expérience, tandis que les émissions de CO₂

provenant du fumier de bovins de boucherie sous forme liquide sont demeurées faibles.

Recommandations relatives à la gestion et incidence potentielle au Canada

Les émissions totales de CH₄ et de N₂O (en g/kg⁻¹ de FS) ont été calculées pour chaque méthode d'entreposage pour les deux types de fumier (Tableau 5). Pour obtenir une estimation de l'incidence de chaque type de traitement de fumier sur le réchauffement de la planète, les émissions de CH₄ et de N₂O ont été multipliées par leur potentiel de réchauffement planétaire respectif (GIEC, 2001). Les plus importantes émissions combinées de N₂O-CH₄, exprimées en équivalents de CO₂, ont été observées, dans l'ordre, dans le traitement du fumier sous forme liquide, dans celui du fumier en tas et, finalement, dans le traitement de compostage par aération passive. Cette classification est tributaire des émissions de CH₄ et de leur incidence sur les conditions aérobiques dans le fumier. Le forçage radiatif imputable au fumier en tas, en équivalents de CO₂, était 1,46 fois plus important que celui du compost et ce, pour les deux types de fumier. Le forçage radiatif imputable au fumier de bovins laitiers sous forme liquide était presque deux fois plus élevé, et celui du fumier de bovins de boucherie sous forme liquide était entre quatre et sept fois plus élevé que le forçage radiatif attribuable au compost. À la suite de l'épandage du fumier de bovins laitiers en tas et composté au taux de 100 mg/ha⁻¹ (ce qui équivalait à 20 mg de FS/ha⁻¹), des émissions peu importantes de méthane ont été observées (Lessard et coll., 1997) et des émissions de N₂O dix fois moins

importantes que celles qui ont été observées pendant l'entreposage ont également été observées, ce qui représente 1 % de l'azote ajouté (Lessard et coll., 1996) ou 0,047 g de N₂O-N/kg⁻¹ de FS. À l'aide du modèle développé par Sommer et coll. (2004) et de la composition chimique du fumier de bovins laitiers sous forme liquide décrite par Pauland Zebart (1997) et destinée à évaluer les émissions de N₂O à la suite de l'épandage de fumier liquide, nous avons estimé que ces émissions sont de l'ordre de 0,20 g de N₂O-N/kg⁻¹ de FS, ce qui représente le double des émissions mesurées pendant l'entreposage. Rochette et coll. (2000) ont obtenu un coefficient d'émission de 1,65 % pour l'azote épandu obtenu par le lisier de porc. En combinant les effets de l'entreposage et de l'épandage, il a été démontré que les plus importantes émissions de N₂O-CH₄, exprimées en équivalents de CO₂, sont imputables au fumier entreposé sous forme liquide, suivi du fumier en tas et du fumier composté. En effet, les émissions produites à la suite de l'épandage de fumier sont inférieures ou égales à 7 % du total des émissions de N₂O et de CH₄ produites par l'entreposage et l'épandage et exprimées en équivalents de CO₂/kg de FS.

À partir des résultats de la présente étude (Tableau 5), nous avons extrapolé des données pour l'ensemble du Canada (Tableau 6) de la manière décrite à la section « Matériel et méthodes » et en utilisant le fumier sec produit par tête de bétail par année, de même que l'indice de conversion du fumier sec en solides volatils proposé par le GIEC (2001) et les résultats du recensement de 2001 et du sondage spécial de 2003 de Statistiques Canada. Cette extrapolation ne tient pas compte des variations possibles des conditions

Tableau 6 : Émissions annuelles de GES pendant l'entreposage, exprimées en coefficients de CO₂ par tête de bétail, applicables par temps frais au Canada

	Bovins laitiers			Bovins de boucherie		
	S. forme liquide	En tas	Compost	S. forme liquide	En tas	Compost
Émissions de CH ₄ (t d'éq-CO ₂ /tête ⁻¹ /an ⁻¹) ^a	1,301	0,416	0,080	0,357	0,067	0,003
Émissions de N ₂ O (t d'éq-CO ₂ /tête ⁻¹ /an ⁻¹) ^a	0,068	0,272	0,393	0,005	0,010	0,049
N ^{bre} effectif d'animaux/système d'entreposage au Canada (milliers) ^b	401	597		249	2 345	
Émissions totales/système d'entreposage au Canada (Tg d'éq-CO ₂ /an ⁻¹)	0,672	0,411		0,090	0,182	
Émissions totales au Canada du fumier de bovins laitiers/de boucherie à l'adoption intégrale d'une méthode d'entreposage donnée (Tg d'éq-CO ₂ /an ⁻¹)	1,489	0,749	0,515	0,941	0,201	0,136
Réduction des émissions au Canada (Tg d'éq-CO ₂ /an ⁻¹)		-0,334	-0,568		-0,071	-0,136

Émissions annuelles réelles et potentielles au Canada pendant l'entreposage pour les systèmes décrits dans le cadre de l'expérience et réduction potentielle attribuable à l'adoption intégrale d'un système d'entreposage donné, toutes exprimées en T g d'éq-CO₂.

^a Dans l'hypothèse d'une augmentation de 10 % des émissions pour tenir compte des émissions postérieures à la fin de l'étude. En fonction d'un potentiel de réchauffement planétaire sur 100 ans, et selon la production annuelle de fumier sec par les bovins et la conversion du fumier sec en solides volatils décrites par le GIEC (2001). ^b Nombre effectif d'animaux de bétail multiplié par la proportion des pratiques d'entreposage pertinente dans le cadre de la présente étude, données tirées Statistiques Canada (2003).

météorologiques et de la composition du fumier dans toutes les régions du pays. Les réductions des émissions de GES attribuables à plusieurs scénarios d'atténuation ont été estimées à partir des données extrapolées pour le Canada. Une réduction de 0,70 Tg d'éq-CO₂/an⁻¹ pourrait être réalisée en compostant, au moyen du système d'aération passive par andains (Tableau 6), l'ensemble du fumier entreposé sous forme liquide et en tas au Canada. Le compostage n'entraînerait qu'une petite hausse des coûts (pour l'acquisition des tubes perforés, par exemple) si la technique décrite ci-dessus était adoptée puisqu'aucune opération de ventilation mécanique n'est requise. Une autre solution d'atténuation consisterait à recueillir et à brûler le CH₄ émis par les installations existantes d'entreposage du fumier sous forme liquide. Cette solution se traduirait par une réduction de 0,76 Tg d'éq-CO₂/an⁻¹. Si l'ensemble du fumier de bovins entreposé dans des installations telles que celles décrites dans la présente étude était plutôt entreposé sous forme liquide et que le CH₄ ainsi produit était recueilli et brûlé, une réduction de 1,08 Tg d'éq-CO₂/an⁻¹ pourrait être réalisée. La collecte et la combustion du CH₄ sur les fermes nécessitent des investissements additionnels, lesquels pourraient cependant être atténués partiellement grâce aux économies d'énergie ainsi réalisées (Martin, 2003; Engler et coll., 2003). Compte tenu de l'engagement du Canada à réduire ses émissions de GES de 6 % d'ici 2008-2012, dans le cadre du Protocole de Kyoto, on estime que le secteur agricole canadien devra réduire ses émissions de GES d'environ 7,75 Tg d'éq-CO₂/an⁻¹ (Boehm et coll., 2004). Dans l'hypothèse d'une adoption intégrale des solutions d'atténuation proposées, les pratiques liées à la gestion du fumier de bovins pourraient compter pour 9 à 14 % de cet objectif. Il serait également possible d'épandre le fumier entreposé sous forme liquide à titre d'engrais avant la saison de croissance et donc, lorsque la température est plus fraîche, diminuant de ce fait les émissions de GES. S'il faut entreposer le fumier liquide pendant l'été, Sommer et coll. (2000) suggèrent de recouvrir la surface, par exemple avec de la paille, pour réduire les émissions de GES.

Pour l'ensemble des méthodes d'entreposage, le fumier des bovins laitiers était assorti d'un forçage radiatif supérieur à celui du fumier de bovins de boucherie (Tableau 5). Afin d'estimer l'incidence des résultats de la présente étude sur l'Amérique du Nord par temps frais, de nouveaux coefficients d'émissions de CH₄ ont été calculés, d'abord en divisant la masse de fumier sec par 0,92 pour convertir cette mesure en solides volatils, puis en incorporant les émissions mesurées dans la méthodologie du GIEC, laquelle propose une ventilation en fonction de la méthode d'entreposage adoptée. Les coefficients d'émission ont été calculés i) en utilisant les émissions mesurées comme données d'entrée; ii) dans l'hypothèse d'une augmentation de 10 % des émissions pour tenir compte des émissions postérieures à la fin de l'étude. Pour

l'Amérique du Nord, par temps frais, les nouveaux coefficients d'émissions de CH₄ ont été estimés à 45,2 kg de CH₄/tête⁻¹/an⁻¹ pour le fumier de bovins laitiers, plutôt que 36 kg de CH₄/tête⁻¹/an⁻¹, et à 2,7 kg de CH₄/tête⁻¹/an⁻¹ pour le fumier de bovins boucherie, plutôt que 1 kg de CH₄/tête⁻¹/an⁻¹. Selon la proportion de chacune des pratiques d'entreposage pertinentes au Canada, les coefficients d'émission seraient alors de 35,8 kg de CH₄/tête⁻¹/an⁻¹ pour le fumier de bovins laitiers et 4,1 kg de CH₄/tête⁻¹/an⁻¹ pour le fumier de bovins de boucherie. Ces estimations illustrent la sensibilité des coefficients d'émission par rapport à l'incidence des proportions de pratiques d'entreposage du fumier.

Remerciements

Nous remercions Brendon McCormick et Mark Edwards qui ont aidé à colliger les données et à réaliser les analyses, Théophile Paré qui a procédé aux analyses chimiques, Lucie Bourque qui a aidé à interpréter les données de recensement et du sondage spécial, de même que Xavier Vergé pour les suggestions apportées au moment de la révision du document. N° de contribution CRECO : 03-337.

Références

- Amon, B., T. Amon, J. Boxberger et C. Alt. « Emissions of NH₃, N₂O and CH₄ from dairy cows housed in a farmyard manure tying stall (housing, manure storage, manure spreading) », *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, n° 60 (2001), pp. : 103 à 113.
- Boehm, M., B. Junkins, R.L. Desjardins, S.N. Kulshreshtha et W. Lindwall. « Sink potential of Canadian agricultural soils », *Clim. Change*, vol. 65, n° 3 (2004), pp. : 297 à 314.
- Desjardins, R.L. et R. Riznek. « Agricultural greenhouse gas budget », dans McRae T., C.A.S. Smith et L.J. Gregorich (eds), *Environmental Sustainability of Canadian Agriculture*, rapport du Projet sur les indicateurs agroenvironnementaux, 20002, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, pp. : 133 à 140.
- Desjardins, R.L., S.N. Kulshreshtha, B. Junkins, W. Smith, B. Grant et M. Boehm. « Canadian greenhouse gas mitigation options in Canada », *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, vol. 60, pp. : 317 à 326.
- Engler, C.R., E.R. Jordan, M.J. McFarland et R.D. Lacewell. *Economics and environmental impact of biogas production as a manure management strategy*, 2003, <http://tammi.tamu.edu/Engler2.pdf>, pp. : 109 à 114.
- Gaudy, A.F. Jr. et E.T. Gaudy. *Elements of Bio-Environmental Engineering*. Engineering Press, San Jose, California, 1988.
- Hao, X., C. Chang, F.J. Larney et G.R. Travis. « Greenhouse gas emissions during cattle feedlot manure composting », *J. Environ. Qual.*, vol. 30 (2001), pp. : 376 à 386.
- Hayes, L.A., R. Richards et S.P. Mathur. *Economic Viability of Commercial Composting of Fisheries Waste by Passive Aeration at Shigawake Organics and Genesis Organic*, travaux de la 3^e réunion annuelle du Conseil canadien du compostage, Environment Canada, Montreal, Canada, 1993.

- Husted, S. « Seasonal variation in methane emission from stored slurry and solid manures », *J. Environ. Qual.*, vol. 23 (1994), pp. : 585 à 592.
- Hutchinson, G.L. et G.P. Livingston. « Use of chamber systems to measure trace gas fluxes », dans Harper, L.A., A.R. Mosier, J.M. Duxbury et D.E. Rolston (eds). *Agricultural Ecosystem Effects on Trace Gases and Global Climate Change*, no de publication ASA 55, 1993, Amer. Soc. Agron, Madison, Wisconsin, pp. : 63 à 78.
- Keeney, D.R. et D.W. Nelson. « Nitrogen-inorganic Forms », dans Page A.L., R.H. Miller et D.R. Keeney, *Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. Amer. Soc. Agron., 1982, Madison (Wisconsin), pp. : 643 à 698.
- Knowles et R. « Methane: processes of production and consumption », dans Harper L.A., A.R. Mosier, J.M. Duxbury et D.E. Rolston D.E., *Agricultural Ecosystem Effects on Trace Gases and Global Climate Change*, no de publication ASA : 55, Amer. Soc. Agron., 1993, Madison (Wisconsin), pp. : 145 à 156.
- Kulling, D.R., F. Dohme, H. Menzi, F. Sutter, P. Lischer et M. Kreuzer. « Methane emissions of differently fed dairy cows and corresponding methane and nitrogen emissions from their manure during storage », *Environ. Monit. And Assess.*, n° 79 (2003), pp. : 129 à 150.
- Kulling, D.R., H. Menzi, F. Sutter, P. Lischer et M. Kreuzer. « Ammonia, nitrous oxide and methane emissions from differently stored dairy manure derived from grass- and hay-based rations », *Nutr. Cycl. Agroecosyst*, n° 65 (2003), pp. : 13 à 22.
- Lessard, R., P. Rochette, E.G. Gregorich, R.L. Desjardins, E. Pattey. « CH₄ fluxes from a soil amended with dairy cattle manure and ammonium nitrate », *Can. J. Soil Sci.*, n° 77 (1997), pp. : 179 à 188.
- Lessard, R., P. Rochette, E.G. Gregorich, E. Pattey et R.L. Desjardins. « Nitrous oxide fluxes from manureamended soil under maize », *J. Environ. Qual.*, n° 25 (1996), pp. : 1371 à 1377.
- Martin, J.H.Jr. *A Comparison of Dairy Cattle Manure Management with and without Anaerobic Digestion and Biogas Utilization*, rapport produit pour le programme AgSTAR du ministère de la protection de l'environnement des É.-U., contrat 68-W7-0068, bon de travail 400, 2003, 58 pages.
- Mathur, S.P. « Composting processes », dans Martin, A.M., *Bioconversion of Waste Materials to Industrial Products*, Elsevier, Londres, 191, pp. : 147 à 186.
- Mathur, S.P. *Agriculture Canada's Passively Aerated Windrow System of Composting Farm, Food and Industrial Wastes*, travaux de la 2^e réunion annuelle du Conseil canadien du compostage, 1992, Environnement Canada, Ottawa (Canada).
- O'Brien, R.G. et M.K. Kaiser. « MANOVA method for analyzing repeated measures designs: an extensive primer », *Psych. Bull.*, n° 97 (1985), pp. : 316 à 333.
- Overcash, M.R., F.J. Humenik et J.R. Miner. *Livestock Waste Management II*, 1983, CRC Press Inc, Boca Raton (Floride).
- Paul, J.W. et B.J. Zebarth. « Denitrification during the growing season following dairy cattle slurry and fertilizer application for silage corn », *Can. J. Soil Sci.*, n° 77 (1997), pp. : 241 à 248.
- Potvin, C., M.J. Lechowicz et S. Tardif. « The statistical analysis of ecophysiological response curves obtained from experiments involving repeated measures », *Ecology*, n° 71 (1990), pp. : 1389 à 1400.
- SAS 1990, Version 6.09. SAS Institute, Cary (Caroline du Nord).
- Rochette, P., B. Ellert, E.G. Gregorich, R.L. Desjardins, E. Pattey, R. Lessard et B.G. Johnson. « Description of a dynamic closed chamber for measuring soil respiration and its comparison with other techniques », *Can. J. Soil Sci.*, n° 77 (1997), pp. : 195 à 203.
- Rochette, P., E. van Bochove, D. Prévots, D.A. Angers, D. Côté et N. Bertrand. « Soil Carbon and Nitrogen dynamics following application of pig slurry for the 19th consecutive year: II. Nitrous oxide fluxes and mineral nitrogen », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, n° 64 (2000), pp. : 1396 à 1403.
- Sommer, S.G., S.O. Petersen et H.B. Moller. « Algorithms for calculating methane and nitrous oxide emissions from manure management », *Nutr. Cycl. Agroecosyst*, n° 69 (2004), pp. : 143 à 154.
- Sommer, S.G., S.O. Petersen S.O. et H.T. Sogaard. « Atmospheric pollutants and trace gases », *J. Environ. Qual.*, n° 29 (2000), pp. : 744 à 751.
- Statistiques Canada. *Gestion environnementale des fermes au Canada*, n° de catalogue : 21-021, 2003, 52 pages, (<http://www.statcan.ca/bsolc/francais/bsolc?catno=21-021-MWF>).
- Stevens, J. *Applied Multivariate Statistics for the Social Sciences*, 2^e édition, 1992, Lawrence Erlbaum, Hillsdale (New Jersey).
- Su, J.-J., B.-J. Liu et Y.-C. Chang. « Emission of greenhouse gas from livestock waste and wastewater treatment in Taiwan », *Agric. Ecosyst. Env.*, n° 95 (2003), pp. : 253 à 263.
- Svensson, B.H., J.C. Lantsheer et H. « Sources and sinks of methane in Sweden », *Ambio*, n° 20 (1991), pp. : 155 à 160.
- von Ende et C.N. « Repeated-measures analysis: growth and other time-dependent measures », dans Scheiner S.M. et J. Gurevitch J., *Design and Analysis of Ecological Experiments*, Chapman and Hall, New York, 1993, pp. : 113 à 137.