HAL
open science

Influence du mode de ventilation des litières sur les émissions gazeuses d'azote NH3, N2O, N2 et sur le bilan d'azote en engraissement porcin

Christophe Kermarrec, Paul Robin, Nicolas Bernet, Fabienne Trolard, Paulo Armando Victoria de Oliveira, Alain Laplanche, Daniel Souloumiac

To cite this version:

Christophe Kermarrec, Paul Robin, Nicolas Bernet, Fabienne Trolard, Paulo Armando Victoria de Oliveira, et al.. Influence du mode de ventilation des litières sur les émissions gazeuses d'azote NH3, N2O, N2 et sur le bilan d'azote en engraissement porcin. Agronomie, 1998, 18 (7), pp.473-488. 10.1051/agro:19980704 . hal-02696318

HAL Id: hal-02696318

https://hal.inrae.fr/hal-02696318v1

Submitted on 1 Jun 2020

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

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

Agronomie 18 (1998) 473–488
© Inra/Elsevier, Paris

Agriculture and Environment

Article original

Influence du mode de ventilation des litières sur les émissions gazeuses d'azote NH_3, N_2O, N_2 et sur le bilan d'azote en engraissement porcin

Christophe Kermarrec[a,b]*, Paul Robin[a], Nicolas Bernet[c], Fabienne Trolard[a], Paulo Armando de Oliveira[a,d], Alain Laplanche[b], Daniel Souloumiac[a]

[a] Inra, U.R. sol et agronomie, 65, rue de Saint-Brieuc, 35042 Rennes, France
[b] E.N.S.C. de Rennes – C.N.G.E., Avenue du Général Leclerc, 35700 Rennes, France
[c] Inra, Biotechnologie de l'Environnement, Boulevard du Général de Gaulle, 11100 Narbonne, France
[d] E.M.B.R.A.P.A., C.N.P.S.A., caixa postal 21, 89700 Concordia, Brésil

(Reçu le19 février 1998 ; accepté le 6 août 1998)

Abstract – The Influence of aeration of sawdust litter in fattening pig units on the relative gaseous emission of NH_3, N_2O, N_2 and on N-budget. This study aims at testing experimentally the effect of aeration of litter in intensive pig units on nitrogen budget and the nature of nitrogen gaseous emissions. Rearing animals on deep litter provides treatment of these manures at an early stage by composting and aeration of litter could offer a method of controlling the compost temperature and water content. Two aeration systems for the litter (upflow and downflow) were checked against a control system without aeration, over a period of 65 days corresponding to two shortened fattening periods (25–60 kg). Detailed nitrogen balances were obtained, and uncertainties estimated, from which the N_2 fraction was evaluated by difference. Rearing animals on sawdust litter enables the removal of nitrogen from the compost as N_2 with efficiencies of 44, 53 and 74 ± 13 %, respectively, of total nitrogen excreted for each of the three systems: upflow aeration, downflow aeration and control. The smaller efficiencies of aerated systems with respect to the control are due to the supply of oxygen by aeration. Nitrogen accumulated in the litter is mainly under organic form, and amounts to 19, 27 and 6 ± 1.5 %, respecively, of the nitrogen content of the manure for the three systems. Nitrates only accumulate in the aerated systems (3–7 %). Irrespective of the system, about 30 % of the total nitrogen in the manure was removed as gases NH_3 and N_2O. The NH_3/N_2O ratio is 1.3 for the control and downflow aeration as opposed to 1.7 for upflow aeration. (© Inra/Elsevier, Paris.)

ammonia / budget / litter / livestock / nitrogen / speciation / gaseous emission / pig

Résumé – L'objectif de ce travail est de tester expérimentalement l'effet de la ventilation des litières sur le devenir de l'azote, dans un élevage intensif porcin. L'élevage sur litière permet de composter les déjections et l'aération des litières

Communicated by Gérard Guyot (Avignon)

* Correspondance et tirés à part : tél : (33) (0)2 99 28 52 23 ; fax : (33) (0)2 99 28 54 30 ; e-mail : probin@roazhon.inra.fr

permet de contrôler le régime thermohydrique. Deux systèmes de ventilation de litière (ascendante et descendante) sont testés par rapport à un système témoin sans ventilation, sur une période de 65 jours correspondant à deux bandes d'engraissement réduites (25 à 60 kg). Des bilans d'azote détaillés sont réalisés et la fraction de gaz émis sous forme N_2 est évaluée par défaut. Selon les systèmes : ventilation ascendante, descendante et témoin, l'élevage sur litière de sciure permet d'éliminer l'azote du compost sous forme N_2 avec une efficacité respectivement de 44, 53 et 74 ± 13 % de l'azote des déjections. L'efficacité moindre des systèmes ventilés vient de l'apport d'oxygène par la ventilation. L'azote est accumulé dans la litière principalement sous forme organique. Cette forme représente respectivement 19, 27 et 6 % ± 1,5 de l'azote des déjections selon les systèmes. Seuls les systèmes ventilés accumulent des nitrates (3–7 %). Quel que soit le système, environ 30 % de l'azote des déjections est éliminé sous forme de gaz NH_3 et N_2O. Le rapport NH_3/N_2O est de 1,3 pour le témoin non ventilé et pour la ventilation descendante, et de 1,7 pour la ventilation ascendante.
(© Inra/Elsevier, Paris.)

azote / ammoniac / bilan / élevage / litière / porc / spéciation / émission gazeuse

1. INTRODUCTION

L'élevage de porcs sur litière bénéficie d'un regain d'intérêt par suite des nuisances occasionnées par l'élevage intensif sur caillebotis [2, 11, 18]. Cette technique présente différents avantages par rapport au système sur caillebotis : coût de la place par porc moindre malgré l'augmentation de la surface attribuée à chaque animal, amélioration du bien-être des animaux, importante diminution des odeurs liées aux produits volatils issus des processus de fermentation anaérobie des déjections (amines, SH_2, aldéhydes et cétones,...), suppression de la nécessité de stocker, traiter et épandre le lisier et obtention d'un compost final réduit en volume (départ d'eau des déjections par évaporation) et en charge azotée [20]. En outre, une dénitrification complète, avec comme produit final le dinitrogène gazeux (N_2), peut avoir lieu au niveau des litières [7, 8, 15, 21].

Deux problèmes subsistent néanmoins.

- D'une part, la quantité d'azote émis sous forme de gaz NH_3 et N_2O est du même ordre de grandeur qu'en élevage sur caillebotis.
- D'autre part, un certain savoir-faire est nécessaire pour établir un compostage satisfaisant des litières et en maintenir l'activité [16]. En effet, l'éleveur doit particulièrement surveiller l'évolution des zones souillées, de manière à prévenir l'arrêt du compostage qui se traduit par un refroidissement des litières, celui-ci étant accentué par l'augmentation de leur taux d'humidité.

Pour diminuer les rejets azotés dans les élevages (flux gazeux émis et stock final à gérer), on peut jouer, d'une part, sur la composition des aliments de façon à limiter l'entrée en azote sans nuire à la croissance des animaux [4], d'autre part, on peut jouer sur les conditions de compostage des litières, en testant différents types de supports ainsi que des additifs biologiques, on parle alors de litières biomaitrisées [1]. Enfin on peut utiliser une technique qui consiste à diffuser de l'air au travers des litières, comme pour les techniques de compostage hors bâtiment d'élevage. Une importante diminution des émissions d'ammoniac a été observée dans le cas des litières aviaires traversées par un faible débit d'air [19], mais cette technique est encore insuffisamment caractérisée.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de la ventilation traversante des litières de sciure sur les émissions de gaz azotés NH_3, N_2O et N_2, ainsi que sur le stock final en azote contenu dans la litière. En raison de l'impossibilité actuelle de mesurer directement le surplus de N_2, produit in-situ par les litières par rapport aux 80 % en volume de N_2 contenus dans l'air ambiant, le flux de N_2 est estimé par défaut de bilan en tenant compte des incertitudes sur chacun des autres termes liées aux conditions expérimentales en bâtiment réel.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Protocole expérimental

Les travaux sont réalisés dans le bâtiment climatisé d'élevage expérimental (*figure 1*) de l'Unité de recherche sol et agronomie de l'Inra de Rennes. Ce local (L = 12 m; l = 8,5 m; h = 4,5 m) est divisé en six cellules (surface utile au sol : 3,6 m^2; volume interne : 8 m^3), permettant chacune l'élevage de quatre porcs. Les conditions « extérieures » aux cellules sont ainsi homogènes, contrôlées et reproductibles.

Par ailleurs, afin de mettre en évidence des différenciations rapides et franches entre les systèmes, les expérimentations sont menées sur des bandes d'engraissement réduites (porcs élevés de 25 à 60 kg). Deux bandes d'engraissement se sont succédé sans interruption du 10/10/96 au 29/12/96. Le 16/12/96, un porc a été extrait de chaque cellule de manière à pouvoir prolonger la durée de l'expérimentation. La température sèche du local expérimental a été maintenue à 17 ± 1,5 °C pour la première bande et à 8 ± 1,5 °C pour la seconde. Les températures sèches des ambiances de vie des animaux sont maintenues constantes à 20 ± 1,5 °C. Nous opérons avec une densité animale plus élevée que dans la profession (0,9 m^2/porc au lieu de 1,2 m^2/porc). La densité adoptée simule l'évolution du flux des déjections de porcs entre 30 et 80 kg en conditions réelles. Les animaux sont des femelles de race Piétrain × Large White et d'âge identique (naissances à ± 2 j) fournies par la Station de Recherche Porcine de l'Inra à Saint-Gilles. Les porcs sont nourris *ad libitum* à l'aide de nourrissoupes (type Socobac®) avec de l'aliment en granulés (Guyomarc'h®) adapté à cette première phase d'engraissement. La ventilation des litières a commencé le 30/10/96, selon les deux modalités suivantes (*figures 1* et *2*).

– Dans les cellules A.* (cellule n°A.1 et n°A.2), la litière est traversée par un flux d'air ascendant (A) provenant de l'extérieur des cellules et sortant dans l'aire de vie des animaux. Les variations de température sèche du local selon les bandes ont pour but de tester l'influence de la température de ce flux d'air traversant sur les productions gazeuses. En particulier, on cherchera à observer si l'air froid ne porte pas préjudice au fonctionnement de la litière.

– Dans les cellules D.* (cellule n°D.1 et n°D.2), la litière est traversée par un flux d'air descendant (D) issu

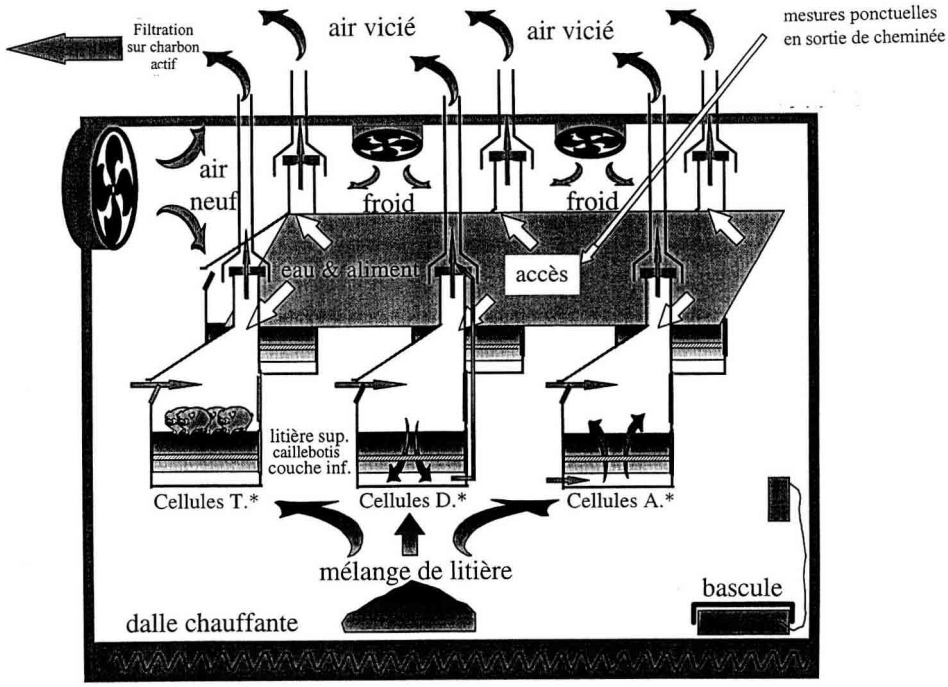


Figure 1. Disposition générale du local expérimental et modalités de ventilation pour chaque couple de cellules.

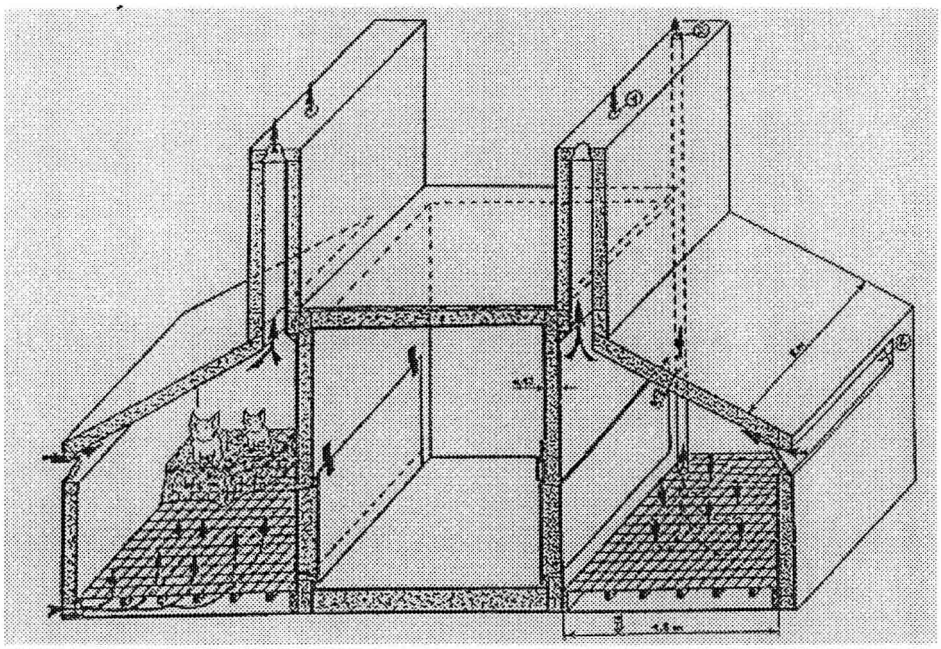


Figure 2. Disposition d'un couple de cellules et principe de ventilation. A noter que chaque couple de cellules est soumis à la même modalité de ventilation. La couche d'homogénéisation n'est pas représentée.

de l'aire de vie des animaux et sortant sous la litière avant d'être rejeté dans le milieu extérieur.

– Dans les cellules T.* (cellule n°T.1 et n°T.2), cellules témoins (T), la litière n'est pas ventilée.

Les caractéristiques de l'aération de la litière sont identiques à celles mises en œuvre en élevage de poulet sur litière [19] : soit une vitesse de l'air au travers de la litière d'environ 1 mm s^{-1}, ce qui représente un débit de 5 m^3 d'air par m^2 de litière et par heure. La litière est fournie par une scierie locale. Une couche de 25 cm de sciure est disposée uniformément au fond de chaque cellule. L'ensemble de la surface est ensuite recouvert par des caillebotis en béton d'une épaisseur de 5 cm. Une couche de 30 cm de sciure recouvre l'ensemble (*figure 1*). La présence de la couche inférieure a pour but d'homogénéiser le flux d'air traversant et de protéger les thermocouples disposés juste en dessous des caillebotis. Les bilans des éléments non volatils (P, K, Mg, Ca, Zn, Cu) effectués au niveau de la litière des cellules témoins (T.1 et T.2, voir plus loin) montrent que la présence du caillebotis n'entraîne pas de discontinuité significative entre les couches supérieures et inférieures de la litière. Par la suite on appellera « litière » uniquement ce qui correspond à la couche supérieure. Cette litière a ensuite servi à trois bandes réduites d'engraissement (25 à 60 kg) sur une période de 5 mois, durant laquelle la litière a été brassée régulièrement mais non ventilée, ceci de façon à rendre reproductible l'historique de la litière. Cette période a été mise à profit pour parfaire l'ensemble du dispositif technique. A l'issue de cette période, les litières des cellules A.1, D.1 et T.1 sont pesées, homogénéisées entre elles, échantillonnées pour les analyses et redistribuées de façon équitable dans les cellules concernées (*figure 1*). Un complément en copeaux de résineux (France Copeaux® : à 10,8 % d'humidité) est alors ajouté. On procède de la même façon pour les cellules A.2, D.2 et T.2. La litière a été brassée manuellement, une fois par semaine ou par quinzaine selon les besoins, à l'aide de fourches et de pelles à raison d'une quinzaine de minutes par cellule. Au moment du changement de bande, les litières sont brassées et des copeaux (6 kg par cellule) sont ajoutés. Les échantillons de sciure, de copeaux, de litière et d'aliment sont analysés par le Laboratoire Départemental d'analyses agricoles de l'Ile et Vilaine à Combourg et par le Laboratoire d'analyse des sols de l'Inra à Arras. La période de mesure débute au moment de l'homogénéisation des litières, soit deux semaines après le début de la première bande d'engraissement et

Tableau I. Définition des différentes périodes de l'expérimentation.

n°	Périodes	Bande	Nombre de jours	Porcs (i)	Commentaires
0	26/10 au 29/12/96	1 et 2	65	3,8	Durée totale de l'expérimentation
1	26/10 au 30/10/96	1	5	4	Phase sans ventilation des litières : cellules indifférenciées
2	31/10 au 04/11/96	1	5	4	Démarrage des ventilations litières : cellules différenciées
3	05/11 au 19/11/96	1	15	4	Evolution jusqu'à la fin de la bande 1
4	20/11 au 02/12/96	2	13	4	Première période sans brassage des litières
5	03/12 au 16/12/96	2	14	4	Évolution jusqu'à la sortie d'un porc par cellule
6	17/12 au 29/12/96	2	13	3	Évolution jusqu'à la fin de la bande 2

(i) : Nombre moyen de porcs dans les cellules pour la période considérée

se poursuit jusqu'à la fin de la seconde bande, du 26/10/96 au 29/12/96. Différentes sous-périodes définies dans le *tableau I* serviront à la présentation de certains résultats.

2.2. Mesures

2.2.1. Mesures journalières

Les consommations en aliment et en eau sur les 24 h précédentes sont déterminées en ramenant jusqu'à un repère fixe les différents réservoirs. L'eau et l'aliment ajoutés sont pesés à l'aide d'une bascule Mettler™ type TE 120 J (± 0,05 kg). Une analyse est effectuée à chaque arrivée d'un nouveau lot d'aliment. Les vitesses d'air sont mesurées manuellement sur des orifices calibrés, au moyen d'un anémomètre de précision à hélice (LCA 6000 Air flow™, 0,15 à 12 m s^{-1}). Les débits d'air correspondants sont exprimés en m^3 h^{-1}. Chaque cellule possède en sortie de cheminée six orifices calibrés d'un diamètre de 0,1 m. Les circuits de soufflage ou d'extraction d'air sous litière sont également munis en fin de ligne d'un unique orifice calibré de 0,1 m. Le choix du régime permanent (constante des climats intérieur et extérieur) assure la représentativité temporelle de ces mesures.

2.2.2. Mesures en continu

Les mesures des températures sèches et humides de l'air extérieur aux cellules sont réalisées dans le local expérimental avec deux psychromètres centrés chacun juste au-dessus des entrées d'air des cellules D.1 et D.2 et dans les cellules d'élevage avec un psychromètre par cellule situé à la base des cheminées d'extraction d'air. Les températures sèches des litières sont prises en deux points fixes pour chaque cellule, juste en dessous des caillebotis, permettant ainsi de suivre les variations globales de température. Ces mesures sont effectuées à l'aide de thermocouples type T, toutes les deux minutes et moyennées toutes les heures par une centrale d'acquisition AOIP™ SA70 avec une précision de ± 0,1 °C. Les mesures des concentrations en gaz NH_3 et N_2O sont effectuées par prélèvements à trois niveaux distincts :

- 1. dans le local expérimental, en deux points de prélèvement centrés juste au-dessus des entrées d'air des cellules D.1 et D.2 ;
- 2. en sortie des cellules d'élevage à raison d'un par cellule, soit six points de prélèvement, centrés en haut des cheminées d'extraction d'air ;
- 3. en sortie de litière à raison d'un par sortie, soit deux points de prélèvement dans le cas des ventilations à flux d'air descendant : cellules D.1 et D.2.

Les mesures des concentrations sont effectuées en continu, toutes les 1 min 50 s, par balayage successif des différents points de mesures. L'appareil utilisé est un analyseur multi-gaz Bruel et Kjaer™ 1302, utilisant la méthode photoacoustique de détection par infrarouge. Une vérification de l'étalonnage, de l'étanchéité et de la neutralité des matériaux composant les différents circuits de prélèvement a été effectuée juste avant le début de la période d'expérimentation.

2.2.3. Autres mesures

Des mesures ponctuelles complémentaires de gaz sont effectuées de façon hebdomadaire à l'aide de tubes

Draeger™. Les gaz suivants sont ainsi analysés : les oxydes d'azote (N_2O, NO, NO_2) et NH_3 à titre de contrôle des mesures effectuées par l'appareillage en continu. Au cours de l'expérimentation, des mesures ponctuelles sont réalisées à l'École nationale supérieure de chimie de Rennes, sur les gaz suivants : amines (NH_3 compris), cycles azotés (indole, scatole,...), par barbotage de l'air dans les solutions acides appropriées. Une pesée, un échantillonnage et une analyse des litières sont effectués en début et fin d'expérimentation. Le principe d'échantillonnage des litières est donné sur la *figure 3*. Un premier échantillonnage est réalisé sur chacune des cinq zones, puis les échantillons de chacune de ces cinq zones sont mélangés pour constituer un échantillon moyen représentatif de l'ensemble de la litière. On recommence les opérations pour obtenir le nombre souhaité d'échantillons moyens représentatifs de l'ensemble de la litière, variable de 3 à 5, que l'on envoie à l'analyse. Les concentrations mesurées sont l'azote total par la méthode de Kjeldahl, l'azote organique, l'azote ammoniacal et l'azote nitrique, ainsi que le carbone organique par la méthode Anne. Les bilans sur les éléments non volatils (P, K, Cu, Zn) de ces litières ont aussi été effectués.

Une pesée des porcs est effectuée en début et fin de chaque bande.

2.3. Estimation de la production gazeuse N_2

La production gazeuse de N_2 est estimée par défaut de bilan selon le schéma présenté sur la *figure 4*, et les différents termes du bilan sont définis ci-après.

2.3.1. N entrant

Il s'agit de l'azote entrant dans le système par le biais de l'alimentation (aliment et eau). Les analyses donnent la teneur en azote de l'aliment ($C_{N\text{-alim}}$), en complément des mesures de la consommation journalière (MJ). On détermine ainsi l'azote apporté par l'aliment tout au long de l'expérimentation (i jours) :

$$\text{N-aliment} = \Sigma_i\, C_{N\text{-alim}} \cdot MJ_i \qquad (1)$$

où N-aliment est en g d'N et connu à ± 3 % en incertitude relative, $C_{N\text{-alim}}$ en g/kg et MJ_i en kg.

La fraction *N-eau*, ne représentant au maximum que 0,2 % du N-aliment, est négligée dans le bilan et l'incertitude sur N-entrant modifiée en conséquence. On a :

$$\text{N-entrant} \cong \text{N-aliment}, \qquad (2)$$

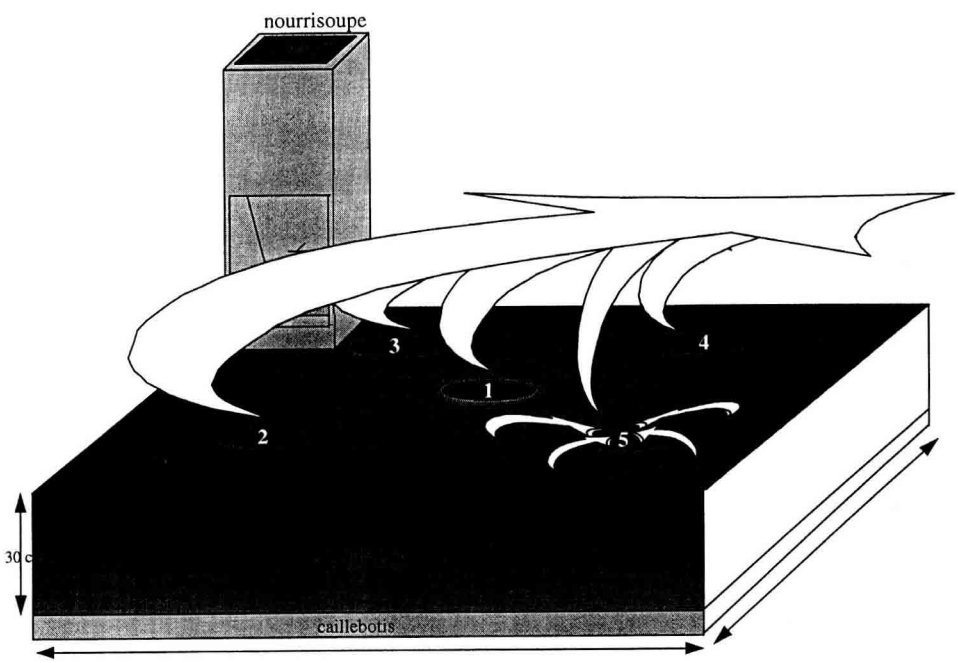
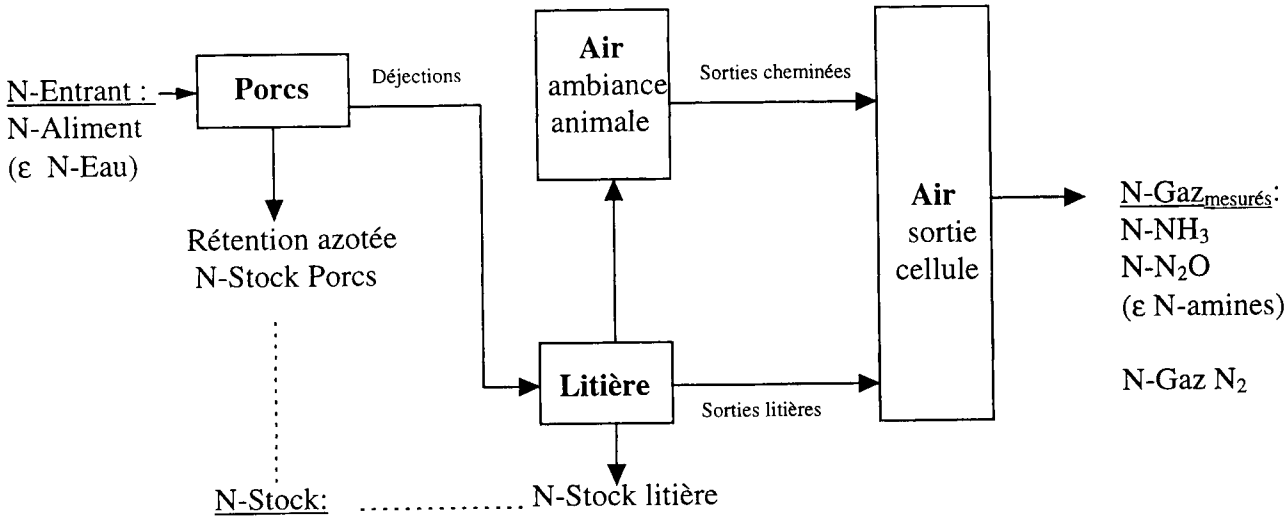


Figure 3. Principe de prélèvement des échantillons de litière.



$$\text{N-Gaz } N_2 \pm \Sigma_{erreurs} \cong \text{N-Entrant} - \{(\text{N-Stock Porc} + \text{N-Stock litière}) + \text{N-Gaz}_{mesurés}\}$$

Figure 4. Schéma de principe pour le bilan de masse de l'azote.

où N-entrant est en g d'N et connu à ± 3,5 % en incertitude relative.

2.3.2. N-stock Porcs

C'est la fraction d'azote qui est assimilée par les animaux pour constituer leur biomasse. Elle est principalement fonction de la nature de l'aliment et de la génétique des animaux utilisés. Pour calculer cette fraction on utilise les données de la littérature [9, 12, 15] valides pour la composition de l'aliment et la lignée génétique des animaux utilisées dans notre expérimentation. On a :

$$\text{N-stock Porcs} = \text{N-entrant. ram}, \quad (3)$$

où ram est la rétention azotée moyenne sur l'ingéré, qui vaut ici 33 ± 2 %, N-stock Porcs est en g d'N et connu à ± 10 % en incertitude relative.

2.3.3. N-stock litière

La masse de la litière (M) et la concentration totale en azote de la litière (C_{Ntotal}) sont déterminées en début (d) et fin (f) d'expérimentation. On a :

$$C_{Ntotal} = C_{NTK} + C_{N\text{-}NO3^-}, \quad (4)$$

$$C_{NTK} = C_{Norganique} + C_{N\text{-}NH4^+}, \quad (5)$$

où C_{NTK} est la concentration en azote total Kjeldahl, $C_{N\text{-}NO3^-}$ la concentration de l'azote nitrique, $C_{Norganique}$ la concentration en azote organique et $C_{N\text{-}NH4^+}$ la concentration en azote ammoniacal.

Pendant le changement de bande, $N_{copeaux}$ g d'azote par cellule ont été ajoutés par l'apport des copeaux. ΔN-stock litière représente la variation du stock azote sur la période d'expérimentation. On a :

$$\Delta\text{N-stock litière} = \{(C_{Ntotal\,f} \cdot M_f) - ((C_{Ntotal\,d} \cdot M_d) + N_{copeaux})\}, \quad (6)$$

où ΔN-stock litière est en g d'azote, avec une incertitude relative de ± 6 %, et ici $N_{copeaux}$ = 6 g. On a donc :

$$\text{N-stock} = \text{N-stock Porcs} + \Delta\text{N-stock litière}, \quad (7)$$

où N-stock est en g d'azote, avec une incertitude relative de ± 9 %.

2.3.4. N-gaz$_{mesuré}$

Il s'agit principalement des productions gazeuses nettes en NH_3 et N_2O, exprimées en équivalent azote (N-NH_3 et N-N_2O), avec une incertitude relative de ± 5 % pour chacun des termes. La contribution des

autres gaz azotés est peu ou pas significative. Ainsi, NO n'a pas été détecté au seuil de 0,2 ppmv, les cycles azotés (indols, scatols) n'ont pas été détectés par CPG, et ne seront donc pas intégrés au bilan. Les analyses réalisées indiquent des concentrations en amines 100 fois inférieures à celles de l'ammoniac.

Le terme N-Amines ≈ $N\text{-}NH_3/100$ n'apparaît donc pas dans le bilan azote. En conséquence, la marge d'erreur sur l'ensemble du terme $N\text{-}gaz_{mesuré}$ est majorée. On a :

$$N\text{-}gaz_{mesuré} = N\text{-}NH_3 + N\text{-}N_2O, \quad (8)$$

où $N\text{-}gaz_{mesuré}$ est en g d'azote et est connu avec une incertitude relative de ± 6 %, et

$$N\text{-}gaz_{total} = N\text{-}gaz_{mesuré} + N\text{-}gaz\ N_2. \quad (9)$$

2.3.5. Bilan d'azote

Le bilan de l'azote s'écrit :

$$N\text{-}entrant = N\text{-}stock + N\text{-}gaz_{total}. \quad (10)$$

L'estimation de la fraction N-gaz N_2 est donc obtenue par défaut de bilan à partir des équations (9) et (10) selon :

$$N\text{-}gaz\ N_2 = N\text{-}entrant - (N\text{-}stock + N\text{-}gaz_{mesuré}), \quad (11)$$

N-gaz N_2 étant exprimé en g d'azote.

À partir des incertitudes relatives évaluées ci-dessus pour chaque terme, les incertitudes absolues sont calculées cas par cas pour définir l'incertitude absolue sur le défaut de bilan. Les résultats ci-après (*tableau III*) montrent que l'incertitude relative sur le défaut de bilan varie de 17 à 63 %. Ceci représente 8 à 13 % de l'azote entrant.

3. RÉSULTATS

3.1. Validation des résultats en fonction des performances zootechniques

Nous considérons que les résultats zootechniques (*tableau II*) obtenus lors de la bande n°1 valident les observations faites par ailleurs sur ces cellules. En revanche, au cours de la bande n°2, les porcs des cellules A.2 et D.2 ont un gain moyen de poids quotidien (*GMQ*) anormalement faible respectivement de 0,505 et 0,591 kg j^{-1}. Les résultats de ces cellules ne seront pas pris en compte pour l'ensemble de l'expérimentation, en ce qui concerne l'établissement des bilans moyens par systèmes (*figure 5*), ni pour l'évolution du N-stock litière moyen par système (*tableau IV*). Pour la bande n°2, seules les évolutions des émissions gazeuses (*figures 6a, b* et *7*) et des températures moyennes des litières (*tableau V*) seront retenues.

Tableau II. Résultats zootechniques relatifs aux deux bandes de l'expérimentation.

Bande n°	Paramètres \ Cellule	A.1	A.2	D.1	D.2	T.1	T.2	Moy.\ σ
1	IC	2,24	2,28	2,35	2,19	2,22	2,19	2,24 \ 0,05
	Eau/Alim	2,87	2,56	2,78	2,69	2,56	2,62	2,68 \ 0,11
	Aliment/Porc/j (kg)	1,73	1,74	1,59	1,70	1,80	1,70	1,71 \ 0,06
	Eau/Porc/j (kg)	4,96	4,43	4,40	4,59	4,60	4,45	4,52 \ 0,10
	G.M.Q. (kg.j^{-1})	**0,769**	**0,761**	**0,674**	**0,777**	**0,808**	**0,775**	**0,760 \ 0,04**
2	IC	2,39	2,97	2,70	3,37	2,40	2,39	(i) 2,47 \ 0,13
	Eau/Alim	2,10	2,09	2,14	2,01	2,59	2,20	(i) 2,25 \ 0,19
	Aliment/Porc/j (kg)	2,01	1,53	2,14	1,96	1,92	1,86	(i) 1,98 \ 0,10
	Eau/Porc/j (kg)	4,22	3,21	4,58	3,93	5,05	4,11	(i) 4,49 \ 0,36
	G.M.Q. (kg.j^{-1})	**0,809**	**0,505**	**0,760**	**0,591**	**0,744**	**0,716**	**(i) 0,757 \ 0,03**

(i) Les résultats obtenues pour la deuxième bande les cellules A.2 et D.2 non prises en compte dans le calcul des moyennes.

Tableau III. Bilans azote selon les différentes modalités de ventilation des litières. Les différentes fractions sont exprimées en grammes équivalent azote, pour l'ensemble de l'expérimentation (65 jours) et pour l'ensemble des porcs de la cellule.

	Litière ventilation ascendante Cellules A.*				Litière ventilation descendante Cellules D.*				Litière non ventilée Cellules témoins T.*			
	A.1	%	A.2	%	D.1	%	D.2	%	T.1	%	T.2	%
N-entrant	11 822 ± 414	*100*	10 494 ± 368	*100*	12 317 ± 431	*100*	11 746 ± 411	*100*	12 114 ± 424	*100*	11 489 ± 402	*100*
N-stock :	5 447 ± 483	*46*	5330 ± 459	*51*	6280 ± (540+500)	*51*	6677 ± (556+500)	*57*	4908 ± 455	*41*	3 753 ± 381	*33*
N-stock Porcs	3 901 ± 390	*33*	3 463 ± 347	*33*	4 064 ± 407	*33*	3 876 ± 388	*33*	3 998 ± 400	*33*	3 791 ± 379	*33*
N-stock Litière (i)	1 546 ± 93	*13*	1 867 ± 112	*18*	2 216 ± (133+500)	*18*	2 801 ± (168+500)	*24*	910 ± 55	*8*	–38 ± 2	*0*
N-gaz mesuré :	2 160 ± 130	*18*	2 487 ± 150	*24*	2 355 ± 140	*19*	2 522 ± 151	*21*	1 937 ± 116	*16*	2 288 ± 137	*20*
$N–N_2O$	805 ± 40	*7*	998 ± 50	*10*	1 051 ± 53	*9*	976 ± 49	*8*	756 ± 38	*6*	1 114 ± 56	*10*
$N–NH_3$	1 355 ± 70	*11*	1 489 ± 75	*14*	1 304 ± 65	*11*	1 546 ± 77	*13*	1 181 ± 59	*10*	1 174 ± 59	*10*
«N-gaz N_2»	4 215 ± 1 027	*36*	2 677 ± 977	*25*	3 682 ± (1121+500)	*30*	2 547 ± (1118+500)	*22*	5 269 ± 995	*44*	5 448 ± 920	*47*
					D.1sl		D.2sl					
Sorties sous litières			$N–N_2O$		851 ± 40	*7*	750 ± 35	*6*				
			$N–NH_3$		33 ± 2	*0.3*	29 ± 1	*0.2*				

(i) Les valeurs indiquées entre parenthèses représentent : la marge d'erreur attendue + la marge d'erreur maximale due à la présence de la couche d'homogénéisation inférieure.

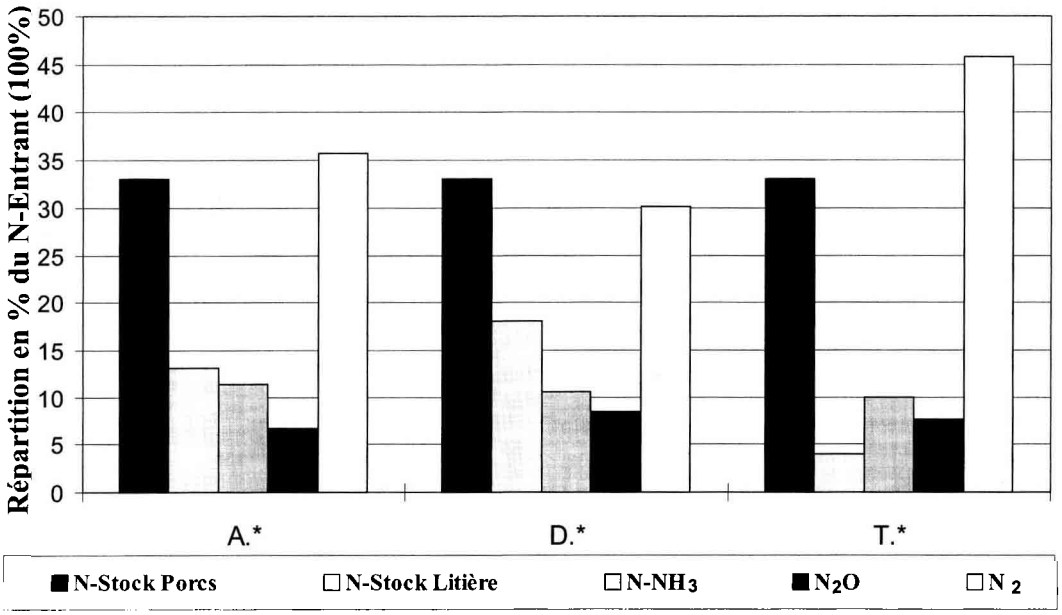


Figure 5. Bilans et compartimentation de l'azote pour les trois modes de ventilation : A.*, ascendant ; D.*, descendant ; T.*, témoin sans ventilation.

Tableau IV. Compartimentation et évolution de la fraction N-Stock Litière (g d'N/Litière).
DB2 = Début de Bande n°2

		A.*		D.*		T.*	
	paramètres	N-Stock L	%	N-Stock L	%	N-Stock L	%
Début	Humidité		*48*		*48*		*45*
	C/N	16		16		16	
1	$N\text{-}NH_4^+$	494	*10,0*	495	*10,0*	653	*12,8*
2	N-org	4 416	*89,5*	4 447	*89,5*	4 442	*87,2*
3	$N\text{-}NO_3^-$	0	*0*	0	*0*	0	*0,0*
1 + 2 (i)	**N-NTK**	4 933	*100*	4 941	*100*	5 095	*100*
1 + 2 + 3	**N-total**	4 933	*100*	4 941	*100*	5 095	*100*
DB2	Humidité		*53*		*48*		*54*
	C/N	13		13		14	
Fin	Humidité		*55*		*49*		*51*
	C/N	11		11		14	
1	$N\text{-}NH_4^+$	136	*2,1*	168	*2,3*	173	*3,1*
2	N-org	6 213	*95,8*	6 619	*92,4*	5 352	*96,7*
3	$N\text{-}NO_3^-$	136	*2,1*	377	*5,3*	16	*0,3*
1 + 2 (i)	**N-NTK**	6 349	*97,9*	6 786	*94,7*	5 521	*99,7*
1 + 2 + 3	**N-total**	6 485	*100*	7 163	*100*	5 537	*100*

(i) N-NTK (azote total kjeldahl) = $N\text{-}NH_4^+$ + N-org. Chacun de ces trois termes a été estimé individuellement d'après leur concentration respective dans les litières (début et fin) et les masses de litières correspondantes (cf. Matériels et méthodes). La somme obtenue comparée avec la valeur en N-NTK indiquée dans le tableau permet de contrôler la fiabilité de cette valeur.

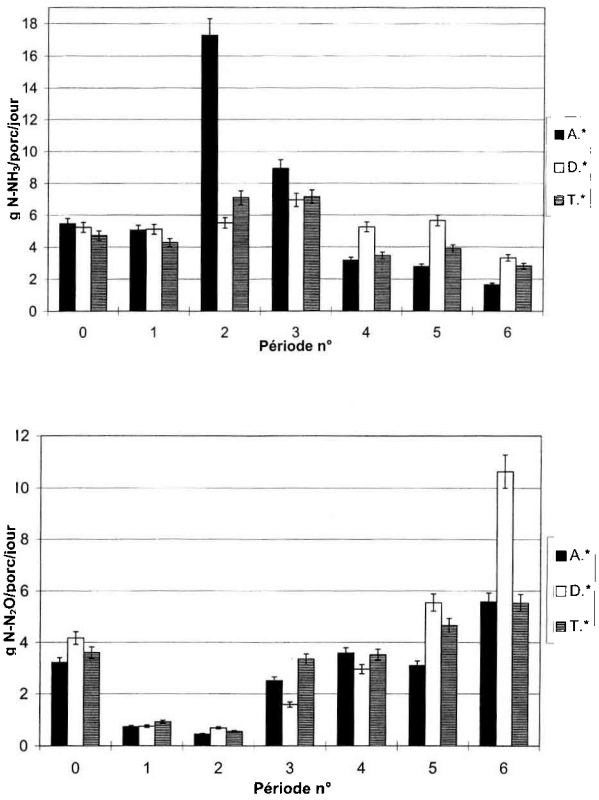


Figure 6. Evolution des émissions gazeuses pour les trois modes de ventilations : A.*, ascendant ; D.*, descendant ; T.*, témoin sans ventilation.

3.2. Bilans des éléments non volatils (P, K, Zn, Cu)

On observe de très bons recouvrements entre les quantités d'éléments mesurées et les quantités théoriquement présentes à l'issue de l'expérimentation. Par exemple, pour l'élément K, le recouvrement moyen est de 99 ± 2 % suivant les modèles de rejets des éléments minéraux [12, 15]. Ceci démontre également pour l'ensemble des cellules sur cette expérimentation qu'il n'y a pas eu de percolation des jus vers la couche inférieure.

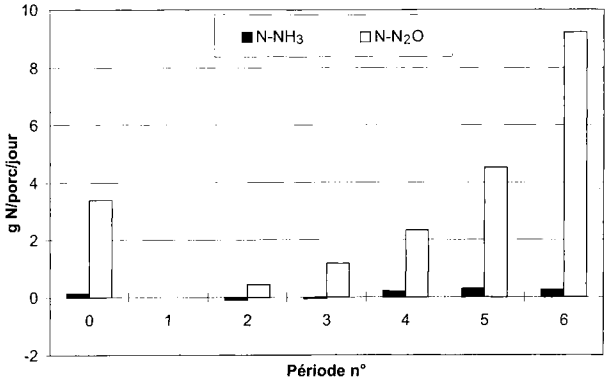


Figure 7. Flux de $N\text{-}NH_3$ et $N\text{-}N_2O$ en sortie de litière des cellules D.*.

Tableau V. Température moyenne des litières (TL en °C) et du local expérimental (Ts en °C) et écart-type (σ) selon les différentes périodes d'expérimentation (cf. *tableau I).*

	A.*		D.*		T.*		Ext.	
période *n*°	TL	σ	TL	σ	TL	σ	Ts	σ
0	30,5	6,7	40,2	5,6	39,8	5,1	16,8	0,7
1	50,0	4,2	56,3	5,6	51,1	4,6	17,5	0,1
2	31,0	7,1	42,2	5,8	46,6	3,1	17,1	0,3
3	25,5	2,5	37,4	1,4	39,9	0,9	16,5	0,7
4	32,8	0,7	40,3	2,6	41,9	1,3	8,8	0,8
5	29,0	0,8	39,5	2,2	36,4	1,5	8,1	0,3
6	28,1	1,4	37,5	1,1	34,5	0,3	7.6	0,2

3.3. Bilans de l'azote

3.3.1. N-gaz N_2, N-gaz$_{mesurés}$ et N-stock litière

Les différents termes du bilan, pour chaque cellule, sont donnés dans le *tableau III* avec les incertitudes absolues qui ont été ici maximisées. Les bilans de l'azote indiquent que l'estimation de la contribution N-gaz N_2 dans les bilans est toujours significativement positive, variant de 2 547 g N à 5 448 g N, alors que les incertitudes absolues associées ne dépassent pas 1 200 g N. La fraction N-gaz$_{mesuré}$ varie peu selon les systèmes testés et représente de 18 à 21 % du N-entrant, avec une légère dominance de N-NH_3. Les valeurs du rapport N-NH_3/N-N_2O sont respectivement de 1,7 ; 1,3 et 1,3 pour A.*, D.* et T.*. Compte tenu des masses molaires des gaz considérés, à l'émission d'une mole de NH_3 correspond 0,3 à 0,4 mole de N_2O émis. Le système de ventilation par mise en dépression sous litière (cellules D*.) permet de canaliser près de 80 % du flux total en N-N_2O. Le N-stock litière apparaît comme étant dépendant des modalités de ventilation des litières. Les litières ventilées accumulent l'azote (13 à 24 ± 1 % du N-entrant) ; à l'inverse les litières témoins n'accumulent pas ou peu l'azote apporté par les déjections au cours de l'expérimentation (T.* : 4 ± 5 %). La *figure 5* résume les différences des moyennes par systèmes. Les résultats correspondant aux cellules présentant une zootechnie anormale ont été éliminés.

3.3.2. Caractéristiques des litières (N-NO_3^-, N-organique, N-NH_4^+, C/N et Température sèche T_s)

On constate que l'azote est très majoritairement sous forme organique et que la fraction azote sous forme NH_4^+ (ammoniaque ou ion ammonium) est de l'ordre de grandeur de la fraction NO_3^-. En fin d'expérimentation, dans les cellules ventilées, les quantités de NO_3^- sont nettement supérieures (moyenne A.* et D.* 4 ± 1 % du N-entrant) à celles mesurées dans les litières témoins (T.* : 0,3 ± 0,4 %) (*tableau IV*). Il n'est pas observé d'augmentation significative de la concentration en eau dans le système D.*. Par ailleurs, la diminution du rapport C/N est identique dans les deux systèmes ventilés à l'inverse du système témoin qui stabilise son évolution. La température moyenne de la litière du système A.* est inférieure d'environ 10 °C à celles des deux autres systèmes (*tableau IV*). Le fait que la température baisse fortement de 50 à 25 °C au cours de la bande n°1, traduit certainement une ventilation efficace par l'air extérieur à 18 °C. Au cours de la seconde bande, malgré une température de l'air insufflé de 8 °C, on n'observe pas de refroidissement consécutif, qui serait dramatique le cas échéant pour l'activité des litières.

3.3.3. Évolution des flux N-gaz$_{mesurés}$ au cours des différentes périodes

Les *figures 6* et *7* donnent l'évolution des flux en N-NH_3 et N-N_2O au cours des différentes périodes tout au long de l'expérimentation. Ceci met en évidence l'effet du démarrage des ventilations litières lors de la période n°2, où seuls les flux de N-NH_3 sont affectés. Ces flux sont élevés dès le début de la bande n°1 et ont tendance à diminuer pour l'ensemble des systèmes pendant et jusqu'à la fin de la seconde bande. Les flux en N-N_2O ne s'élèvent qu'à partir de la période n°3 et augmentent régulièrement jusqu'à la fin. Pour les flux en sorties sous litière des cellules D.*, N-N_2O est très largement majoritaire et augmente régulièrement. Le flux en N-NH_3 est tout d'abord négatif, ce qui indique que l'air extrait sous litière est moins chargé en NH_3 que l'air extérieur aux cellules. Ce flux augmente ensuite régulièrement, mais reste faible.

4. DISCUSSION

4.1. Composition et évolution des litières

4.1.1. Aspects microbiologiques

La diffusion d'un flux d'air au travers de la litière augmente la proportion de sites aérobies dans la

masse. Suite à l'oxydation de NH_3 en NO_3^-, la réduction en N_2O ou N_2 des nitrates formés est défavorisée. Le sens de la ventilation a une influence sur les quantités de nitrates accumulées dans la litière à l'issue de l'expérimentation. La diffusion du flux d'air dans la litière est plus efficace dans le cas du système D.*, ce qui expliquerait le taux final plus élevé de nitrates. Les phénomènes de nitrification/dénitrification sont importants et notamment dans les litières témoins. Des microsites anoxiques de l'ordre de 200 mm de diamètre suffisent pour que la dénitrification puisse avoir lieu [13]. Du fait des phénomènes de tassement ou d'isolement au sein de la litière, il est très probable que de tels microsites anoxiques se créent de façon continue et que des bactéries aérobies-anaérobies facultatives, s'adaptent alors à cet environnement difficile et mettent en place une respiration utilisant les nitrates comme accepteurs d'électrons. Il a été démontré que les NO_3^- – et NO_2^- – réductases sont alors les premières enzymes à être déréprimées au bout de quelques heures d'anoxie. Le produit majoritairement formé est N_2O. Après 24 à 48h, le produit principal issu de la dénitrification devient N_2 [5, 12, 14]. L'ammonification apparaît comme l'étape limitante, les taux de nitrates et d'ammoniaque présents restant faibles par rapport à l'azote sous forme organique.

4.1.2. Évolution de l'humidité, des températures et du C/N

Le système D.* semble être le mieux adapté pour prévenir une éventuelle dérive du compostage à long terme. L'augmentation d'humidité y est lente, la ventilation descendante constitue peut-être à ce titre une possibilité de régulation de l'activité des litières. La stabilisation du rapport C/N à 14 du système témoin lors de la bande n°2, conforte l'hypothèse de l'absence de stockage d'azote. Corrélée à l'augmentation des flux N-N_2O au cours de cette même bande, on peut supposer que « l'épuration » azotée (dénitrification totale produisant N_2) s'est déroulée essentiellement au cours de cette seconde bande, et cela pour l'ensemble des systèmes.

Il est probable que l'homogénéité de la diffusion de l'air au sein de la litière diminue avec l'avancement du compostage et l'humidification de la litière. La densité augmente certainement de façon considérable par endroits et l'air diffuse selon des cheminements où les pertes de charge sont moindres. La répercussion de la diffusion d'un air froid sur les températures de litière du système A.* est donc fortement limitée. En revanche, la stabilisation de la température à 30 °C modifie l'état des populations bactériennes, très largement issu de la flore intestinale accoutumée à une température de 37–40 °C. De plus cette température limite les phénomènes d'évaporation d'eau. Ainsi ce système présente la plus forte humidité finale. Les systèmes D.* et T.* ont des températures de litière situées entre 35 et 40 °C, et ne présentent donc pas les inconvénients du système précédent.

4.2. Émissions gazeuses

L'analyse des résultats (figures 6 et 7) permet de discuter les processus agissant sur les émissions gazeuses. Durant la période n°1, les litières, suite aux travaux d'homogénéisation, sont particulièrement peu denses et bien aérées. On suppose que la microflore bactérienne fonctionne très largement de façon non réprimée et effectue une digestion aérobie des déjections. Ces processus se déroulent principalement en surface au niveau des zones souillées et au niveau des premières couches superficielles de la litière. L'ammoniaque (NH_{3aq}) est produit dans le mélange fèces/urine [10]. C'est une base faible qui ne réagit donc que partiellement sur la fraction aqueuse du mélange, pour donner un équilibre acide (NH_4^+) / base (NH_{3aq}). Cet équilibre, fonction de multiples paramètres, est déplacé par l'émission d'NH_{3g} au niveau de l'interface gaz/Liquide, selon des mécanismes décrits par [6] et [17]. La période n°2 permet de valider les hypothèses relatives aux différents systèmes. Ainsi, au démarrage des ventilations, les litières A.* sont balayées par un flux d'air ascendant particulière-

ment efficace et uniforme compte tenu de la structure du matériau traversé. Cela provoque un « dégazage » massif en NH_{3g}, sans doute par évaporation d'une partie de l'eau, limitant ainsi la dissolution de NH_{3aq} et déplacant les équilibres vers l'émission d'NH_{3g}, ainsi que par un effet de purge des interstices des couches superficielles où NH_{3g} s'accumulait et diffusait de façon naturelle vers l'ambiance (*stripping* du NH_3 libre). Le système D.* présente en revanche la plus forte accumulation d'azote au niveau du bilan litière. On suppose qu'au fur et à mesure de l'avancement de l'expérimentation une partie du NH_3 libre au niveau des interstices superficiels va être entraînée vers des zones plus profondes de la litière. Cet NH_3 va réagir et se solubiliser progressivement dans les fractions aqueuses des couches profondes. Ce phénomène est particulièrement bien mis en évidence par l'évolution des flux de sorties sous litière (*figure 7*). Les premières valeurs, négatives, indiquent que l'air extrait sous la litière est initialement moins chargé en NH_3 que l'air de ventilation des cellules. Les valeurs deviennent ensuite légèrement positives lorsque l'eau des couches les plus profondes de la litière est atteinte. Les gaz en équilibre peuvent alors s'échapper à l'extérieur. Il est à noter que la présence de la couche inférieure d'homogénéisation des flux (cf. Matériel et méthodes) joue ici un rôle sur l'évolution des émissions de NH_3. En effet, sans cette couche, il est probable qu'au démarrage des ventilations le dégazage en NH_3 du système D.* se serait également produit. Mais la présence de cette couche permet certainement le piégeage de cet NH_3. Le piégeage de NH_3 au démarrage des ventilations au niveau de cette couche inférieure, explique très probablement l'émission en N_2O plus importante du système D.* au cours de la bande n°2.

Le flux de N_2O en sortie sous litière, représente progressivement de 70 à 85 % du flux total produit par le système D.*. On peut estimer que cette fraction de N_2O correspond principalement au processus de dénitrification au niveau des couches profondes de la litière. Ceci, initialement par l'ensemble des micro-organismes présents dans des zones nouvellement anoxiques, puis par certaines espèces présentes qui n'ont pas la possibilité génétique de mettre en place les mécanismes nécessaires pour effectuer une dénitrification complète, et vont donc continuer à produire du N_2O, alors que la majorité de la population bactérienne va évoluer vers la production de N_2. Le flux restant peut représenter la contribution de ces mêmes processus localisés au niveau de microsites à proximité de la surface mais, certainement plus majoritairement, comme le produit secondaire de nitrification ou de nitrification incomplète [3, 13, 22]. En comparaison avec les flux infimes de N-NH_3 sous litière, le N_2O produit est quant à lui un gaz très peu soluble (2,2 mg L^{-1} d'eau pure) et à faible réactivité chimique. Il n'est donc que très peu retenu par dissolution dans l'eau interstitielle et une fois produit, il s'échappe donc très largement, uniquement limité par sa vitesse de diffusion au sein de la litière. Le tirage sous litière permet ainsi de capter plus de 80 % des émissions N-N_2O au niveau d'un flux d'air réduit. Un traitement à ce niveau serait donc envisageable si l'on souhaite limiter l'émission de ce gaz à effet de serre.

4.3. Bilans de l'azote

Les défauts de bilan nettement mis en évidence sont en faveur d'une dénitrification allant jusqu'au stade N_2. Les incertitudes ont été évaluées. Il est cependant possible en ventilation descendante que les couches inférieures de litières puissent piéger une partie de l'azote. Ceci ne fausse pas néanmoins les bilans azotés de façon significative. Avant le démarrage des ventilations les couches inférieures ne sont pas affectées. En fin d'expérimentation il est raisonnable de penser que les quantités en NH_3 et par suite NO_3^- dans la couche inférieure ne peuvent certainement pas être supérieures à celles de la litière « active » et donc au maximum de l'ordre de 500 g. Ceci correspond à une sous-estimation supplémentaire maximale de 4 % par rapport au N-entrant du stock litière pour ce système. Compte tenu de l'élimination probable de cet azote sous forme de N_2O (cf paragraphe précédent), ce maximum de 4 % est d'autant plus justifié. Il en est tenu compte dans les incertitudes correspondantes (*tableau III*).

Les bilans sur l'ensemble de l'expérimentation ne différencient pas les différents systèmes pour les émissions NH_3 et N_2O, e.g. environ 20 % du N-entrant, soit 30 % du N-Déjections. L'intérêt des systèmes ventilés n'est pas mis en évidence par un potentiel « épurateur » représentatif moindre : A.* : 35 % et D.* : 30 %. Il sera probablement difficile de restreindre de façon significative les flux en NH_3 et N_2O en agissant en aval de l'azote entrant sans générer d'autres problèmes, telle que par exemple, une accumulation excessive d'azote dans la litière. Il est donc impossible de définir le meilleur système à l'issue de cette expérimentation et des études à plus long terme seraient à prévoir. La ventilation en continu des litières n'est sans doute pas adaptée pour maintenir voire augmenter l'élimination d'azote sous forme N_2, qui nécessite la coexistence de réactions d'oxydation aérobie et de réduction anaérobie. Cette technique demande donc à être mise au point selon des modalités qui restent à définir, par exemple en temporisant les périodes de ventilations, alternant le sens du flux d'air etc. Les valeurs élevées obtenues pour l'estimation de la production du gaz N_2 dans les cellules témoins indiquent néanmoins que le principe même d'élevage sur litière de sciure semble être une bonne piste pour gérer les problèmes de pollution azotée au niveau des systèmes d'élevage.

5. CONCLUSIONS

Globalement, quel que soit le système, environ 20 % du N-entrant, soit environ 30 % du N-Déjections, est éliminé sous forme de gaz NH_3 et N_2O.

Aucune différence notable sur les émissions en NH_3 et N_2O n'a pu être mise en évidence entre les cellules d'élevage à litières ventilées et les cellules témoins à litière non ventilées.

Dans les litières témoins, non ventilées, la fraction de gaz N_2 généré in situ est estimée à environ 46 ± 10 % de l'azote alimentaire (soit 60 % du N-déjections). Ceci explique l'importante diminution de la charge azotée observée au niveau du compost final dans ce type d'exploitation qui ne peut pas être expliqué uniquement par les flux sortants en gaz NH_3 et N_2O.

Remerciements : Ces travaux ont été réalisés grâce au soutien financier et matériel de l'Inra, de la Région Bretagne, des différents partenaires du Programme Bretagne Eau Pure II et des sociétés Guyomarc'h et Coopagri. Les auteurs remercient chaleureusement Pierre Perrin, pour son aide à la réalisation des dispositifs expérimentaux et à la conduite des expérimentations. Les auteurs remercient également deux lecteurs anonymes et Guilhem Bourrié pour leur suggestions constructives sur le manuscrit.

RÉFÉRENCES

[1] Andersson M., Performance of bedding materials in affecting ammonia emissions from pig manure, J. Agric. Engng. Res. 65 (1996) 213–222.

[2] Chan D.K.O., Chaw D., Lo C.Y.Y., Management of the sawdust litter in the 'pig-on-litter' system of pig waste treatment, Resources, Conservation and Recycling 11 (1994) 51–72.

[3] Conrad R., Metabolism of nitric oxide in soil and soil microorganisms and regulation of flux into the atmosphere, in : Murell J.C., Kelly D.P. (Eds.), Microbiology of Atmospheric Trace Gases, NATO ASI Series 39, 1996, pp. 167–203.

[4] Dourmad J.Y., Henry Y., Bourdon D., Quiniou N., Guillou D., Effect of growth potential and dietary protein input on growth performance, carcass characteristics and nitrogen output in growing-finishing pigs, in : Nitrogen Flow in Pig Production and Environmental Consequences, EAAP Publication, Wageningen, The Netherlands 69, 1993, pp. 206–211.

[5] Focht D.D., Verstraete W., Biochemical Ecology of Nitrification and Denitrification, Adv. Microbiol. Ecol. 1 (1977) 135–214.

[6] Génermont S., Modélisation de la volatilisation d'ammoniac après épandage de lisier sur parcelle agricole, thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1996.

[7] Groenestein C.M., Oosthoek J., Van Fassen H.G., Microbial processes in deep-litter systems for fattening pigs and emission of ammonia, nitrous oxide and nitric oxide, in : Nitrogen flow in pig production and environmental consequences EAAP Publication, Wageningen, The Netherlands 69, 1993, pp. 307–312.

[8] Groenestein C.M., Van Fassen H.G., Volatilization of ammonia, nitrous oxyde in deep-litter

systems for fattening pigs, J. Agric. Engin. Res. 65 (1996) 269–274.

[9] Guillou D., Dourmad J.Y., Noblet J., Influence de l'alimentation, du stade physiologique et des performances sur les rejets azotés du porcs à l'engrais, de la truie et du porcelet, Journées de la recherche porcine en France, 25 (1993) 307–314.

[10] Guingand N., L'ammoniac en porcherie, Institut technique du porc, 1996.

[11] Hacker R.R., Do Z., Livestock pollution and politics, in : Nitrogen Flow in Pig Production and Environmental Consequences, EAAP Publication, Wageningen, The Netherlands 69, 1993, pp. 3–21.

[12] Jongbloed A.W., Lenis N.P., Excretion of nitrogen and some minerals by livestock, in : Nitrogen Flow in Pig Production and Environmental Consequences, EAAP Publication, Wageningen, The Netherlands 69, pp. 1993, 22–36.

[13] Killham K., Heterotrophic nitrification, in : Prosser J.I. (Ed.), Nitrification, IRL Press 20, 1986, pp. 117–126.

[14] Knowles R., Denitrification, Microbiol. Rev. 46 (1982) 43–70.

[15] Lesguillier F., Gouin R., Guiziou F., Orain B., L'élevage de porcs sur litières biomaitrisées; contribution au dossier environnemental par l'évaluation des rejets ; bilans des éléments azoté et minéraux des litières, Journées de la recherche porcine en France 27 (1995) 343–350.

[16] Mustin M., Le compost : Gestion de la matière organique, Ed Dubusc, Paris, 1987.

[17] Moal J.F., Volatilisation de l'azote ammoniacal des lisiers après épandage : Quantification et étude des facteurs d'influence, thèse, Université de Perpignan, 1994.

[18] Roelofs J.G.M., Houdijk A.L.F.M., Ecological effects of ammonia. In : Nielsen, Voorburg, L'Hermite (éd.), Odour and Ammonia Emissions from Livestock Farming, Elsevier Applied Science, 1990, pp. 10–16.

[19] Souloumiac D., Control of liquid and gaseous effluents from intensive breeding units, in : CIGR, XII World Congress on Agricultural Engineering, Milan, 1994, pp. 535–542.

[20] Théobald O., L'élevage de porcs sur litière : Compte rendu du colloque de Rosmalen 21–22 septembre 1992, Techni-Porc 16193 (1993) 39–42.

[21] Thelosen J.G.M., Heitlager B.P., Voermans J.A.M., Nitrogen balances of two deep litter systems for finishing pigs, in : Nitrogen Flow in Pig Production and Environmental Consequences, EAAP Publication, Wageningen, The Netherlands 69, 1993, pp. 318–323.

[22] Van Faassen H.G., Microbial processes of the nitrogen cycle in deep-litter sytems for pig farming, in : Voermans J.A.M. (Ed.), Proceeding Workshop on Deep Litter Systems for Pig Farming, Rosmalen, 1992, pp. 157–165.