

## Evaluation des risques de lixiviation de l'azote liés à la pratique du dépôt au champ de fumiers compacts

FORAY S. (1), MANNEVILLE V. (2), EL JABRI M. (3), FOUGERE M. (4), COUILLEAU B. (4)

(1) Institut de l'Élevage, Monvoisin, 35652 Le Rheu Cedex, France

(2) Institut de l'Élevage, 9 allée Pierre de Fermat 63 170 AUBIERE

(3) Institut de l'Élevage, Maison Nationale des Eleveurs - 149 Rue de Bercy 75595 Paris cedex 12

(4) Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire, Ferme Expérimentale de Derval, 15 La Touche 44590 DERVAL

### RESUME

Une expérimentation in situ sur le potentiel de transfert de l'azote par lixiviation des dépôts au champ de fumier compacts ou très compacts en élevage de ruminant a été menée sur la ferme expérimentale de Derval (44) entre fin novembre 2017 et fin mars 2018. Le protocole a été construit sur deux dispositifs conduits en parallèle. Un premier dispositif s'est intéressé à l'analyse et à la quantification des lixiviats collectés séparément sur 3 andains de fumier très compact de litière accumulée 2 mois d'une stabulation de génisses, stockés en plein air sur des bâches imperméables. Un second dispositif avait pour but l'analyse de reliquats azotés avant et après mise en dépôt du fumier provenant de la même fumièrre, sur 3 placettes en prairie et sur 3 autres placettes en CIPAN de moutarde blanche. A ce second dispositif était associée une zone témoin sans stockage de fumier par type de couverture végétale. Après 4 mois de stockage, la lixiviation mesurée en moyenne sur le premier dispositif représente 1,97% de la quantité d'azote totale présente dans les dépôts à leur confection soit un transfert vers le compartiment sol de 0,86 kg d'azote total Kjeldhal N-NTK sur 43,9 kg N-NTK contenu initialement dans les andains à leur confection. Le suivi des reliquats azotés montre que la quantité moyenne d'azote minéral dans le sol à l'issue du stockage du fumier est supérieure de  $0,35 \pm 0,14$  kg par rapport aux témoins, soit un transfert de 0.60% de la quantité d'azote totale vers le compartiment sol. Cette expérimentation confirme que le stockage du fumier compact ou très compact en andain au champ après deux mois de maturation en bâtiment ou sur un ouvrage de stockage ne présente pas de risque significatif de pollution ponctuelle nitrique. Par ailleurs, la couverture végétalisée sécurise le faible transfert de l'azote nitrique de l'andain via le sol.

### Nitrates leaching risks assessment from a compact straw manure stored on fields

FORAY S. (1), MANNEVILLE V. (2), EL JABRI M. (3), FOUGERE M. (4), COUILLEAU B. (4)

(1) Institut de l'Élevage, Monvoisin, 35652 Le Rheu Cedex, France

### SUMMARY

An in situ experiment on the potential of nitrates leaching from field deposits of compact or very compact ruminants straw manure was conducted on the Derval experimental farm (44) between November 2017 and March 2018. This study was based on two trials conducted in parallel. The first trial focused on the analysis of leachates collected separately from 3 windrows of solid manure from the accumulated litter of a heifer barn, stored outdoors on impermeable tarpaulins. The second trial was based on the analysis of nitrogen content in the soil before and after windrowing of the same manure, on 3 micro parcels in grasslands and 3 other micro parcels of white mustard (ICNAP). This second trial included a control zone per type of vegetation cover. The average leaching potential measured in the first system represents 1.97% of the total nitrogen in the windrows (loss of 0,86 kg total Kjeldhal N-NTK out of 43,9 kg N-NTK initially contained in the windrows). Monitoring of nitrogen content in the soil shows that the average amount of mineral nitrogen after manure pick-up is  $0,35 \pm 0,14$  kg higher than the controls, i.e. a transfer of 0,60% of the total nitrogen to the soil compartment. This experiment confirms that the storage of compact or very compact manure in the field after two months of maturation in a building or on a storage structure does not present a risk of nitric pollution. The vegetated cover secures the low transfer of nitrates from the windrow to the soil.

### INTRODUCTION

Les prescriptions techniques réglementaires (Arrêtés du 27/12/2013 et suivants relatifs aux prescriptions générales applicables aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement en élevage et Arrêté du 11 octobre 2016 modifiant l'arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole ) autorisent le dépôt des fumiers compacts ou très compacts produits en élevage de ruminants dans la parcelle d'épandage sous réserve d'avoir séjourné au moins deux mois sous les animaux ou dans une fumièrre étanche. Cette parcelle doit par ailleurs être initialement pourvue d'une couverture végétale.

Ces fumiers compacts, qui ne produisent plus de jus, et l'eau de pluie qui tombe sur le dépôt de fumier pourrait plus ou moins se charger en éléments fertilisants selon la solubilité

de ceux-ci. Ces deux phénomènes hydriques produisent un lixiviat qui peut s'infiltrer dans le sol situé en dessous.

La principale hypothèse soutient que pour du fumier compact, les transferts d'azote par percolation dans les sols liées à ces modalités de dépôt au champ sont limitées pour être considérées comme une pollution ponctuelle.

Par ailleurs peu d'études scientifiques ont été conduites sur ce sujet. Elles concernent avant tout les émissions gazeuses réalisées pendant la phase de stockage des fumiers, mais restent toutefois très rares (Edouard et al., 2018). Pourtant, les fumiers compacts et très compacts représentent environ 54% des effluents produits par les bovins en France (Degueurce et al., 2016). Les fumiers très compacts proviennent des litières accumulées (56% des fumiers de bovins produits en France), et les fumiers compacts (12 % des fumiers de bovins), sont issus des bâtiments en pente paillée, couloirs d'exercice ou couloirs entre rangs de logettes fortement paillés (3 à 4 kg de paille par animal et par jour).

La pratique de stockage au champ est donc très fréquente dans les élevages herbivores français. Pour alimenter le très faible nombre de références sur les transferts potentiels d'azote par lixiviation lors du dépôt au champ de fumier compact et très compact, une expérimentation in situ a été menée sur la ferme expérimentale de Derval (44) durant l'hiver 2017-2018 afin de quantifier ces transferts vers le sol.

## 1. MATERIEL ET METHODES

### 1.1. Le dispositif expérimental

L'expérimentation a été conduite entre novembre 2017 et avril 2018 sur la ferme expérimentale laitière de Derval (Chambre d'Agriculture de Loire-Atlantique). Le fumier était un fumier très compact, stocké en fumières couvertes après curage de l'aire de couchage paillée des 70 génisses (moins de 6 mois à 26 mois), qui disposaient d'une ration en bâtiment composée de 70% de foin et 30% d'herbe ensilée, d'un concentré azoté et de blé. Ce fumier a été obtenu en suivant des niveaux de paillage de 4 à 5 kg par animal et par jour. Ce fumier a mûri plus de 2 mois sous les animaux et dans la fumière. L'essai était composé de deux dispositifs conduits en parallèle. Le premier dispositif (n°1) reposait sur 3 andains de fumier stockés en plein air sur des bâches imperméables équipées d'une collecte séparée des lixiviats. La surface de chacune de ces « fumières » variait de 12,61 m<sup>2</sup> à 13,52 m<sup>2</sup>. Le second dispositif (n°2) a été mené dans les conditions réelles d'un dépôt au champ. Il se composait de 3 andains de fumier sur une parcelle en prairie et de 3 autres tas de fumier sur un CIPAN de moutarde blanche bien développé (estimation de 3 à 4 tonnes de matière fraîche/ha). Ce second dispositif était pourvu d'une zone témoin par type de couverture végétale. Chacune des placettes occupées par le fumier et les 2 zones témoins offrait une surface de 18m<sup>2</sup> (6 x 3 m). Les 9 tas de fumier ont été confectionnés le 30 novembre 2017 puis épandus le 27 mars 2018.

### 1.2. Les prélèvements et les mesures réalisés

Lors de la confection des tas, chaque chargeur a été pesé. 9 échantillons à la mise en tas ont été prélevés sur chacun d'entre eux. Ces échantillons étaient composés de 20 à 30 prélèvements élémentaires réalisés à la fourche lors du remplissage du chargeur. Ces échantillons ont été stockés à -18°C jusqu'à leur acheminement au laboratoire d'analyses afin d'éviter les transformations de l'azote. Les analyses ont porté sur les paramètres chimiques suivants : matières sèches (MS), matières organiques (MO), azote total Kjeldahl (N-NTK), azote organique (Norg), azote nitrique (N-NO<sub>3</sub>), azote ammoniacal (N-NH<sub>4</sub>), phosphore (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), potasse (K<sub>2</sub>O), carbone (Ctot), rapport C/N (tableau n°1). Les lixiviats du dispositif n°1 ont été collectés à 5 reprises environ tous les 50 à 60 mm de précipitations sur chacune des 3 cuves de collecte.

Fumier	MS	MO	Ctot	N-NTK	C/N	Norg	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Unités	g/kg brut	g/kg brut	g/kg brut	g/kg brut	/	g/kg brut	g/kg brut	mg/kg brut	g/kg brut	g/kg brut
Fumier	304 (22)	256 (20)	128 (10)	7,8 (0,8)	16,6 (1,7)	6,1 (0,7)	1,7 (0,2)	1,5 (1,9)	12,2 (0,8)	2,6 (0,3)

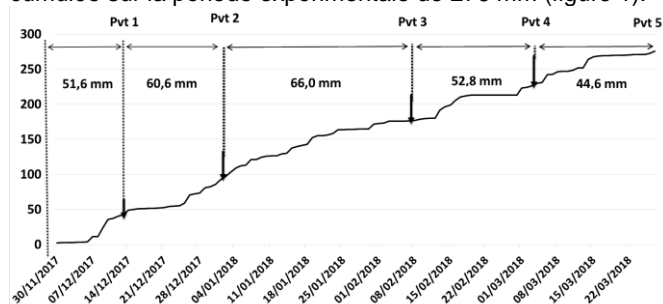
**Tableau 1** Composition du fumier (moyenne et (écart-type) ; n=9) à la mise en tas

Paramètres	Unités	Prairie	CIPAN
Argile	g/kg	255 (12)	181 (6)
Limons	g/kg	490 (4)	505 (2)
Sables	g/kg	255 (11)	313 (7)
pH	/	6,3 (0,2)	6,9 (0,1)
MO	g/kg	26,3 (1,6)	28,1 (0,7)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	mg/kg	22 (4)	47 (2)
K <sub>2</sub> O	mg/kg	131 (22)	131 (10)
CaO	mg/kg	1623 (123)	1880 (68)
CEC	(méq/kg)	83,0 (0,8)	73,0 (0,8)

Ces prélèvements ont également été stockés à -18°C. Les analyses ont porté sur les paramètres suivants : N-NTK, Norg, N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub>, azote nitrite (N-NO<sub>2</sub>), phosphore total (Ptot) et phosphates.

Les quantités percolées à travers les 3 tas de fumier ont été pesées juste en amont de ces échantillonnages.

Les données météorologiques sont issues de la station située sur la ferme de Derval et affichaient une pluviométrie cumulée sur la période expérimentale de 276 mm (figure 1).



**Figure 1.** Pluviométrie cumulée et date de prélèvements des échantillons de lixiviat

Sur le second dispositif, chaque placette a fait l'objet avant la mise en tas du fumier d'un échantillonnage de sol pour caractérisations physico-chimique et granulométrique. Un échantillon était constitué de 9 prélèvements élémentaires sur le premier horizon du sol (0-30 cm).

Les 2 parcelles sont caractérisées par des sols limoneux, avec une tendance un peu plus argileuse sur la parcelle en herbe, correctement pourvues en matières organiques, à pH neutre, d'une profondeur de 60 cm (tableau n°2). Ont également été associés des prélèvements de sol pour l'analyse des reliquats azotés en début et fin d'essai, soit la veille de la mise en tas des fumiers et le lendemain de leur épandage : 1 échantillon par placette (zones de dépôt et zones témoins), constitués de 9 prélèvements élémentaires sur chacun des 2 horizons (0-30 cm et 30-60 cm). La localisation de ces prélèvements a été matérialisée par des jalons qui ont permis d'éviter de venir prélever au même endroit lors de la seconde campagne de mesures des reliquats (après reprise du fumier).

### 1.3. Analyses statistiques

Une analyse spécifique par Anova non paramétrique a été réalisée pour déterminer l'effet du stockage de fumier sur l'évolution de la teneur des différentes formes d'azotes présentes dans le sol (N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub>, et azote minéral total N-MINtot) sur les différents horizons. Les objectifs étaient de vérifier si le dépôt de fumier au champ pouvait induire une augmentation significative des teneurs en azote minéral du sol et si la couverture végétale (herbe ou CIPAN de moutarde blanche) avait une quelconque influence sur ces teneurs.

**Tableau 2** Caractéristiques granulométriques et physico-chimiques des 2 parcelles du dispositif (moyenne et (écart-type) ; n=4)

## 2. RESULTATS

### 2.1. TRANSFERTS D'AZOTE PAR LIXIVIATION – DISPOSITIF N°1

Les 3 tas de fumier stockés sur les bâches imperméables avaient une quantité d'azote total variant de 35,3 kg à 54,1 kg N-NTK, soit une moyenne de 43,9 kg N-NTK.

L'azote total cumulé dans les lixiviats est compris entre 0,66 et 1,08 kg N-NTK, soit une moyenne de 0,86 kg N-NTK. Par conséquent, la quantité totale d'azote lixivié varie de 1,56 à

2,36 % soit 1,97% en moyenne de la quantité d'azote totale présente dans les andains à leur confection (tableau 3).

N° andains	Qtité de fumier au dépôt	Qtité N total	Volume de pluie par andain	Volume de lixiviat total	Ntotal percolée	Vol lixiviat / vol pluie	Transfert N par lixiviation
Unités	Tonnes	Kg N-NTK	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	Kg Ntot	%	%
1	4,90	42,1	3 605	1 840	0,66	51	1,56
2	5,95	54,1	3 478	1 860	1,08	53	1,99
3	4,90	35,3	3 729	2 100	0,83	56	2,36
Moyenne	5,25	43,9	3 604	1 933	0,86	54	1,97

**Tableau 3.** Quantité d'azote transféré par lixiviation et rapport entre ces transferts et la quantité d'azote initialement présente dans les tas de fumier

Références	Type de fumier	Localisation	Mise en andain	Durée et période de stockage	Pluviométrie	% transfert N par lixiviation
Lorinquer et al.	Vaches laitières	France, Bretagne	Curage après 1 mois sous les animaux	100j – nov à déc	262 mm	1,5 % à 4,5 %
Shah et al.	Taurillons	Pays-Bas	Non précisé	160 j, déc à mai	365 mm	4,9%
Petersen et al.	Vaches laitières	Danemark	Curage après 7 jours sous les animaux	64 j, oct – déc	68 mm	4,3%

**Tableau 4.** Références bibliographiques sur le % de transfert d'azote par lixiviation lors du stockage de fumier

Ces résultats sont assez similaires à ceux obtenus par Lorinquer et al. (2017) sur du fumier de vaches laitières stocké après 1 mois d'accumulation sous les animaux (transferts par lixiviation de 1,5% à 4,5 %). 2 autres publications peuvent être citées et concernent du fumier de taurillons (Shah et al., 2016) et du fumier de vaches laitières (Petersen et al., 1998), dont les transferts d'azote par lixiviation au stockage étaient respectivement de 4,9% et 4,3% (tableau 4). Ces valeurs sont légèrement plus élevées que celles obtenues dans le cadre de la présente expérimentation.

Toutefois, la principale différence avec les autres résultats d'étude est le temps de maturation du fumier de 2 mois avant dépôt au champ pour l'essai conduit sur la ferme de Derval, comparativement aux 3 autres références.

Cette phase de maturation permet en effet au fumier d'entamer les processus de fermentation (démarrage de l'activité biologique) durant laquelle une réaction exothermique s'opère. Durant cette phase, les jus de constitution sont en grande partie évacués sous forme de vapeur d'eau ou récupérés dans une fosse de stockage dédiée.

Pour les 6 zones de stockage et pour les placettes témoins, les reliquats azotés mesurés dans les deux horizons suivis (exprimés par le laboratoire en kg N-NO<sub>3</sub>, N-NH<sub>4</sub> et N-MINtot) ont été convertis en gramme d'azote total.

Alors que sur les 2 placettes témoins, le suivi des reliquats réalisés ne montre pas d'évolution des teneurs en azote minéral (azote nitrique et azote ammoniacal) sur la période d'essai et quelques soient les horizons, les reliquats observés sur les placettes où le fumier a été stocké affichent une augmentation après reprise du fumier.

En effet, pour les 6 zones de stockage, les tests statistiques montrent que quels que soient les horizons de sol, les teneurs en azote nitrique et en azote minérale totale sont significativement plus élevées à l'issue du stockage de fumier. Les teneurs en azote ammoniacal sont quant à elles significativement plus élevées uniquement sur le second horizon (tableau 5).

L'accroissement des teneurs en azote sous les fumiers dans les sols dans le temps est bien dû au dépôt du fumier.

Pour autant, si le dépôt au champ augmente la teneur en azote dans les deux horizons, il est important de noter que ces quantités sont très faibles par rapport aux quantités d'azote stockées initialement présentes sous ces zones de dépôt.

## 2.2. TRANSFERTS OBSERVEES EN CONDITIONS REELLES DE STOCKAGE AU CHAMP – DISPOSITIF N°2

### 2.2.1. L'effet du stockage sur les transferts azotés

Modalités	Herbe		CIPAN		Tests stat (p value)	
	Avant (g brut)	Après (g brut)	Avant (g brut)	Après (g brut)	Effet fumier	Effet couverture
N-NO <sub>3</sub> hz1	10,26 (0,82)	76,02 (11,70)	11,46 (4,44)	225,12 (82,31)	0,015	NS
	19,62	13,32	16,2	8,82		
N-NO <sub>3</sub> hz2	8,1 (6,42)	26,16 (12,90)	10,44 (8,08)	169,92 (15,51)	0,006	NS
	5,58	5,22	14,22	32,22		
N-NO <sub>3</sub> total	18,36 (6,86)	102,18 (22,81)	21,9 (12,51)	395,04 (95,65)	0,001	NS
	25,2	18,54	30,42	41,04		
N-NH <sub>4</sub> hz1	36,6 (4,58)	234,06 (179,46)	44,88 (4,45)	82,8 (61,87)	NS	NS
	38,88	38,52	56,88	25,56		
N-NH <sub>4</sub> hz2	2,82 (4,58)	17,88 (13,62)	4,14 (2,54)	12,72 (6,98)	0	NS
	1,26	9,72	4,32	6,84		
N-NH <sub>4</sub> total	39,42 (5,37)	251,94 (190,18)	48,96 (6,14)	95,52 (68,84)	0,03	NS
	40,14	48,06	61,2	33,3		
N-MINtot hz1	46,86 (4,46)	310,08 (171,84)	56,34 (8,74)	307,92 (92,76)	0,03	NS
	58,50	51,84	73,08	65,34		
N-MINtot hz2	10,92 (5,79)	44,04 (5,00)	14,58 (10,04)	182,64 (11,31)	0	NS
	6,84	14,94	18,54	39,96		
N-MINtot total	57,78 (9,74)	354,12 (170,87)	70,86 (18,64)	490,56 (100,29)	0,002	NS
	65,34	66,60	91,62	74,34		

**Tableau 5.** Quantités d'azote minéral (g) présentes dans les 2 horizons de sol avant et après mise en tas du fumier sur les dans les 6 placettes concernées (moyenne et (écart-type), n =3) et valeurs des 2 parcelles témoin CIPAN et Herbe

En effet, les 6 andains constitués pour ce stockage au champ contenaient une quantité moyenne de 58,9 kg N-NTK par tas, variant de 56,7 kg à 65,0 kg N-NTK. Or, le suivi des reliquats azotés a montré que la quantité moyenne d'azote minéral dans le sol (N-NH<sub>4</sub> + N-NO<sub>3</sub>) pour les 18 m<sup>2</sup> de stockage après reprise du fumier était supérieure de 0,35 ± 0,14 kg par rapport aux témoins, soit un transfert moyen de 0,60% de la quantité d'azote totale vers le compartiment sol (tableau 6).

Modalités	Quantité fumier	N fumier total	N surplus sol	Nsurplus/Nfumier
Unités	Tonnes	Kg N	Kg N	%
Herbe 1	7,41	50,39	0,48	0,94
Herbe 2	7,53	62,50	0,25	0,40
Herbe 3	7,66	56,68	0,14	0,25
CIPAN 1	8,13	65,04	0,47	0,73
CIPAN 2	8,44	60,77	0,47	0,78
CIPAN 3	7,70	57,75	0,30	0,52
<b>Moyenne</b>	<b>7,81</b>	<b>58,85</b>	<b>0,35</b>	<b>0,60</b>

**Tableau 6.** Quantité d'azote transférée vers le sol pendant la période de dépôt au champ du fumier et rapport entre ces transferts et la quantité d'azote initialement présente dans les tas de fumier

### 2.2.2. L'effet de la couverture du sol sur les transferts d'azote

Le résultat statistique testant les modalités Herbe vs CIPAN ne montre pas de différences de teneurs pour ces formes d'azote minéral (N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub> ou N-MINtot) pour les horizons analysés et pour les 2 types de couverture testés (tableau n°5).

Il est cependant intéressant de noter la répartition différente selon les formes d'azote dans les 2 horizons du sol. L'horizon de 0-30 cm présente en effet 85 % de l'azote minéral total du sol sous prairie et 62% sous CIPAN (tableau 7).

Pour le CIPAN, la forme nitrique est majoritaire avec 81% de l'azote minéral total. Cette forme nitrique est répartie de manière équivalente entre les deux horizons.

Sous prairie, la forme nitrique est minoritaire avec 35% de l'azote minéral total. 75 % de cette forme nitrique est présente dans le 1er horizon).

Il est intéressant de rappeler que ces formes NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup> sont situées dans les zones accessibles de l'exploration racinaire.

Indicateurs	Témoins herbe	Herbe (n=3)	Témoins CIPAN	CIPAN (n=3)
N-MINtot hz1 /N-MINtot sol	78%	85% (8%)	46%	62% (15%)
N-NO <sub>3</sub> /N-MINtot sol	28%	35% (19%)	55%	81% (22%)
N-NO <sub>3</sub> hz1 / N-NO <sub>3</sub> tot	72%	75% (7%)	21%	56% (26%)

**Tableau 7.** Répartition de l'azote dans les 2 horizons du sol après stockage du fumier (moyenne et (écart-type), n=3)

## 3. DISCUSSION

Le premier dispositif mis en place dans cette expérimentation caractérise la quantité d'azote maximale lixiviée lors de la phase de stockage d'un fumier compact ayant mûri au moins 2 mois dans des installations.

Ainsi, c'est moins de 2% de l'azote total contenu initialement dans le fumier qui est susceptible d'être transféré dans les horizons agronomique du sol.

Les conditions d'expérimentations en ferme démontrent que les transferts au stockage au champ, mesurées par l'intermédiaire de reliquats azotés sont encore plus faibles. Par conséquent, un stockage au champ de 60 tonnes de litière accumulée 2 mois sous les animaux ou sur une fumière, nécessiterait une surface de stockage au champ d'environ 140 m<sup>2</sup>. Cette quantité correspondrait à un curage d'une aire de couchage paillée d'une stabulation accueillant 65 vaches laitières, présentes 100 % du temps dans le bâtiment en période automnale. En prenant une teneur moyenne en azote de ce fumier de 7,8 kgN/T (en référence aux analyses réalisées dans cette étude), la quantité d'azote totale à stocker est de 467 kgN. Le potentiel de transfert maximal (équivalent au stockage sur bâche) est de 9 kg N total, ce qui représente 0,9 g N/ha.

Cette quantité lixiviée est d'autant plus réduite lorsque le fumier est stocké sur une couverture végétale (2,8 kg N total, soit 0,28 g N/ha).

Même s'il y a une légère accumulation d'éléments fertilisants immédiatement sous le tas sur une faible profondeur, ceci ne représente pas un risque pour le milieu car la forme azotée n'est pas principalement de l'azote nitrique. Enfin, 7 kg de N représente 100 kg de matière sèche pour de l'herbe ou moins de 1 quintal céréales.

## CONCLUSION

Cette expérimentation montre que le stockage du fumier compact ou très compact en andain au champ après deux mois de maturation en bâtiment ou sur un ouvrage de stockage ne présente pas de risque de pollution ponctuelle nitrique. Le taux de matière organique totale ou (et) la couverture végétalisée du sol sécurisent le transfert de l'azote inorganique via le compartiment sol. De plus, cet azote inorganique est présent dans les horizons accessibles à l'exploration racinaire.

*Cette expérimentation a été conduite avec le soutien financier de la CNE.*

**Degueurce A., Capdeville J., Perrot C., Boteay T., Martinez J., Peu P., 2016.** Sciences Eaux & Territoires, la revue irstea. Hors-série 2016, n°24.

**Edouard N., Robin P., Almeida J.G.R., Alves T.P., Lambert P., Lorinquer E., 2018.** Proceedings of the 20th Nitrogen Workshop « Coupling C – N – P – S cycles », 187-188.

**Lorinquer E., Foray S., Charpiot A., Dollé J-B., Raynal J., Bell M., Flechard M., Fauvel Y., Robin P., Hassouna M., Lecomte M., Guizou F., Loyon L., Lassalas J., Lambert P., Sidaner D. Edouard N., Faverdin P., Gabriel J., Pansard Alves T., Générmon S., Personne E., Loubet B., Decucq C., 2017.** Emissions gazeuses au Bâtiment, sStockage, Epandage et Pâturage des systèmes bovins laitiers (BTEP). 162p.

**Petersen S.O., Lind A.-M., Sommer S. G., 1998.** Journal of Agriculture Science, 130, 69-79.

**Shah G.M., Shah G.A., Groot J.C.J., Oenema O., Raza A.S., Lantinga E.A., 2016.** Journal of Agriculture Science, 154, 58-71.