

Etude de l'évolution des effets azote de fumiers apportés annuellement pendant six ans dans une rotation maïs fourrage-blé tendre d'hiver ou sur un ray-grass anglais fauché

J. M. Bodet₍₁₎, R. Trochard₍₁₎, M. Corgnet₍₁₎, P. Castillon₍₂₎ et F. Laurent₍₃₎

- (1) Service Technique de Production, ARVALIS - Institut du Végétal, Station de La Jaillière, 44370 La Chapelle Saint Sauveur,
(2) Service Technique de Production, ARVALIS - Institut du Végétal, Station Inter-Instituts, 6, chemin de la Côte Vieille, 31450 Baziège
(3) Service Technique de Production, ARVALIS - Institut du Végétal, Station Expérimentale, 91720 Boigneville

RÉSUMÉ

En 1996 et en 1997, deux essais de longue durée sur l'évolution des effets azote de fumiers apportés annuellement ont été installés dans la région des Pays de la Loire à la Station Expérimentale ARVALIS - Institut du Végétal de La Jaillière (44). Les sols sont des sols bruns lessivés hydromorphes (Néoluvisols rédoxiques) reposant sur altérite de schiste. Ils ont été drainés en 1981. L'un des essais est conduit en ray-grass anglais fauché, l'autre en rotation maïs fourrage irrigué-blé tendre d'hiver pailles enlevées.

Les traitements ont permis de comparer chaque année quatre types de fumiers (fumiers bruts et compostés de bovins, fumiers bruts et compostés de volailles), à des doses croissantes de fertilisation azotée minérale (0, X/4, X/2, 3X/4 et X, avec X = dose optimale d'azote). Ces fumiers ont toujours été appliqués sur les mêmes parcelles à des doses correspondant à 100 kg de N total ha⁻¹ (maïs) ou 200 kg de N total ha⁻¹ (blé tendre d'hiver, ray-grass anglais).

L'examen de l'évolution des coefficients apparents d'utilisation de l'azote des fumiers par le ray-grass anglais, le blé tendre d'hiver ou le maïs fourrage montre qu'il n'y a pas eu d'augmentation significative de ces derniers entre 1996 et 2004. De même, les minéralisations nettes cumulées de l'azote organique des fumiers entre 1996 et 2001 ont été des fonctions linéaires du temps exprimé en jours normalisés pour la minéralisation à 15 °C.

Dans la situation culturale considérée, les effets azote des fumiers appliqués tous les ans à doses modérées résultent principalement de l'azote minéral apporté avec ces fumiers et de l'azote issu de leur fraction organique rapidement minéralisable.

Mots clés

Arrière-effets azote, blé tendre d'hiver, coefficient apparent d'utilisation, fumiers, maïs fourrage, minéralisation nette, ray-grass anglais

SUMMARY**EVOLUTION OF NITROGEN EFFECTS OF SOLID MANURES APPLIED ANNUALLY FROM 1996 TO 2004 IN FORAGE MAIZE - WINTER WHEAT ROTATION AND ON A CUT PERENNIAL RYE GRASS**

Two perennial trials about the nitrogen effects evolution of the solid manure applied every year have been set up respectively in 1996 and 1997 at the Experimental Station of ARVALIS - Institut du Végétal located at La Jaillière (44) in the Pays de la Loire. The soil is a slow drained gleyic cambisol lying on an altérite of sandstone schist which has been drained with plastic pipes in 1981. One of these two trials is cropped with a cut perennial rye grass, the other with a rotation irrigated forage maize and harvested straw winter wheat.

The studied treatments have allowed to compare, every year, for solid manure (uncomposted and composted cattle manures, uncomposted and composted poultry manures) with increasing rates of mineral nitrogen fertilizers (0, X/4, X/2, 3X/4 and X with X = optimal nitrogen rate). Each of these solid manures have always been applied on the same plots. The solid manure rates are calculated every year so as to they fit with 100 kg of total N ha⁻¹ for the maize and 200 kg of total N ha⁻¹ for the winter wheat and the perennial rye grass.

Careful examination of the evolution of nitrogen apparent recovery indexes of the manures by the perennial rye grass, the winter wheat and the forage maize points out no significant increase of these ones between 1996 and 2004. In the same way, the cumulated net mineralizations of organic nitrogen of the manures from 1996 to 2001 have been linear functions of time counted in normalised days for the mineralization at 15 °C.

In the context of these two trials, the nitrogen effects of moderated rates of the solid manures applied every year are mainly the result of the mineral nitrogen brought with these manures plus the mineral nitrogen produced by the mineralization of the labile organic fraction of these ones.

Key-words

Nitrogen, residual effect, direct effect, composting effect, cattle solid manure, broiler litter, forage maize, winter wheat, perennial rye grass

RESUMEN**ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LOS EFECTOS NITRÓGENO DE ESTIÉRCOL APORTADOS ANUALMENTE DURANTE SEIS AÑOS EN UNA ROTACIÓN MÁIS FORRAJE – TRIGO DE INVIERNO O SOBRE UN RAY-GRASS INGLÉS CORTADO**

En 1996 y en 1997, dos ensayos de larga duración sobre la evolución de los efectos nitrógeno de estiércol fueron instalados en la región de los países de la Loira en la estación experimental ARVALIS – instituto del vegetal de la jaillière (44). Los suelos son suelos pardos lixiviados hidromórficos sobre alteritas de esquistos. Se drenaron en 1981. Uno de los ensayos se maneja con ray-grass inglés cortado, el otro en rotación más forraje irrigado – trigo de invierno pajas llevadas.

Los tratamientos permitieron comparar cada año cuatro tipos de estiércoles (estiércoles brutos y compostados de bovinos, estiércoles brutos y compostados de gallinas), a dosis crecientes de fertilización nitrogenada mineral (0, X/4, X/2, 3X/4 y X= dosis óptima de nitrógeno). Estos estiércoles fueron siempre aplicados en las mismas parcelas con dosis que corresponden a 100 kg de N total/ha (más) o 200 kg de N total ha⁻¹ (trigo de invierno, ray grass inglés).

El examen de la evolución de los coeficientes aparentes de utilización del nitrógeno de los estiércoles por el ray grass inglés, el trigo de invierno o el más forraje muestra que no hubo aumento significativo de estos últimos entre 1996 y 2004. Las mineralizaciones netas acumuladas del nitrógeno orgánico de los estiércoles entre 1996 y 2001 fueron funciones lineales del tiempo expresado en días normalizados por la mineralización a 15°C.

En la situación cultural considerada, los efectos nitrógeno de los estiércoles aplicados todos los años con dosis moderadas resultan principalmente del nitrógeno mineral aportado con los estiércoles y del nitrógeno que proviene de su fracción orgánica rápidamente mineralizable.

Palabras clave

Trigo de invierno, coeficiente de utilización, estiércoles, más, forraje, mineralización neta, ray-grass inglés.

Au cours des années 1990, les problèmes posés par l'épandage des fumiers (nuisances olfactives, maîtrise insuffisante de la qualité de l'épandage, appétence de l'herbe et risques sanitaires sur prairie...) ont conduit plusieurs organismes techniques à promouvoir la technique du conditionnement préalable des fumiers par compostage.

De nombreuses questions sur la disponibilité à court ou moyen terme de l'azote des fumiers mûrs ou compostés ont accompagné ce regain d'intérêt pour le compostage.

C'est pourquoi ARVALIS - Institut du Végétal en partenariat avec l'Institut de l'Élevage, l'ITP et l'ITAVI, a mis en place, en 1996 et en 1997, sur la Station Expérimentale de La Jaillière, un dispositif expérimental de longue durée. Ce dernier, financé de 1997 à 1999 par l'ACTA-MRT et l'ADEME, a pour but d'étudier la contribution de fumiers apportés tous les ans à l'alimentation azotée de deux cultures en rotation maïs fourrage et blé tendre d'hiver ou d'une prairie de ray-grass anglais.

L'EXPERIMENTATION

La situation culturale

L'expérimentation occupe une parcelle de la Station expérimentale d'ARVALIS - Institut du Végétal de La Jaillière (44370 La Chapelle Saint Sauveur, région des Pays de la Loire, France). La situation géographique de cette parcelle est la suivante :

- Altitude : 72,5 mètres,
- Latitude : 52,66 grades ou 47° 23' 38",
- Longitude : 3,61 grades ou 3° 14' 56",
- Relief : plateau avec une pente de 1,5 à 2 % orientée Nord – Nord – Ouest.

Les sols sont des sols bruns lessivés hydromorphes (Référentiel Pédologique Français : LUVISOLS REDOXISOLS dystriques, cultivés, quasi resaturés issus de schistes tendres ; Classification FAO : Gleyic Luvisols) reposant sur des altérites de schiste gréseux apparaissant entre 60 et 90 cm de profondeur (Kriegk O., 1980).

Le *tableau 1* présente un exemple de profil de sol observé dans cette parcelle.

La réserve en eau de ces sols est évaluée à 100 – 120 mm. Les caractéristiques moyennes de la couche labourée sont les suivantes :

- 20 – 30 % de graviers et de gravillons,
- texture limono argilo-sableuse (Jamagne M., 1967),
- CEC Metson de 10,2 cmol⁺ kg⁻¹,
- 24,4 % de matières organiques totales avec un C/N de 9,6,
- pH eau de 6,6.

L'essai est situé en limite de deux grandes régions climatiques :

Bretagne orientale et méridionale, Pays Nantais et Vendée d'une part et Moyenne Vallée de la Loire, d'autre part.

Le climat est de type océanique avec un déficit estival marqué. La pluviosité moyenne annuelle est de 645 mm, la température moyenne annuelle de 11,9 °C avec un minimum de 5,4 °C en janvier et un maximum mensuel de 19,1 °C en juillet. Les caractéristiques moyennes mensuelles figurent sur le *tableau 2*.

L'histoire culturale est celle d'une parcelle exploitée très extensivement jusqu'en 1981 (alternances de prairies temporaires de 2 à 3 ans, suivies de 2 à 3 cultures annuelles peu fertilisées). En 1981, un réseau de drains en plastique annelé de 50 mm de diamètre a été posé avec une sous-soleuse poseuse. Les drains étaient espacés de 12 m et placés à une profondeur de 90 cm. La parcelle a, ensuite, porté une prairie pâturée de ray-grass anglais-fétuque élevée jusqu'en 1987, puis une succession de blé tendre d'hiver pailles enlevées et de maïs fourrage. Il n'y a jamais eu d'apports de fumiers au cours des trente années précédant la mise en place de l'expérimentation.

Le protocole expérimental

Les traitements étudiés ont permis d'évaluer, par comparaison à des régimes croissants de fertilisation azotée minérale (nitrate d'ammonium), la contribution de quatre produits organiques issus d'élevages à l'alimentation azotée des cultures :

- fumiers bruts de bovins,
- fumiers compostés de bovins,
- fumiers bruts de volailles,
- fumiers compostés de volailles.

Les produits organiques (*tableau 3*) sont apportés tous les ans sur les mêmes parcelles, de sorte que l'effet azote mesuré une année donnée comprend l'effet direct azote de l'apport de l'année auquel s'ajoutent d'éventuels arrière-effets azote des apports des années précédentes. Les régimes de fertilisation minérale (*tableau 3*) correspondent à des doses croissantes d'engrais azotés : 0, X/4, X/2, 3X/4 et X (X est la dose calculée *a priori* pour obtenir le rendement objectif), ce qui permet de disposer chaque année d'une courbe de réponse à l'azote engrais minéral.

Le dispositif expérimental comporte deux essais contigus, l'un installé en 1996 sur un jeune ray-grass anglais, l'autre implanté en 1997 et conduit avec une rotation maïs fourrage irrigué-blé tendre d'hiver. Chaque essai est disposé en blocs factoriels avec 3 répétitions comprenant chacune 13 parcelles élémentaires. Les fertilisations azotées apportées sur ces 13 parcelles sont les suivantes :

- 4 reçoivent tous les ans le même fumier brut ou composté sans aucune complémentation minérale N, P₂O₅ et K₂O,
- 9 servent à l'établissement d'une courbe de réponse à l'azote minéral (ammonitrate) avec cinq niveaux : 0, X/4, X/2, 3X/4 et X. La dose X occupe une parcelle. Les 4 doses inférieures à X tournent une année sur 2 avec 1 dose d'homogénéisation X, ce qui nécessite 8 parcelles.

Tableau 1 - Exemple de profil pédologique rencontré sur le dispositif d'étude de l'« Evolution des effets azote de fumiers apportés annuellement dans une rotation maïs fourrage – blé tendre d'hiver ou sur un ray-grass anglais fauché » à La Jaillière (44)

Table 1 - Example of soil profile observed in the experimental design "Evolution of nitrogen effects of solid manures applied annually from 1996 to 2004 in a maize forage - winter wheat rotation and on a cut perennial rye grass" at la Jaillière (44)

Horizons		Profondeurs (en cm)	Texture ₍₁₎	Structures	Couleurs	Hydromorphie	Divers ₍₃₎
Codes	Noms						
LA	Labouré	0 – 27	A = 215 % L = 416 % S = 369 % Quartz et débris de schiste	-	Brun gris foncé		C = 14 % C/N = 11,5 CECeff = 6,6 cmol ⁺ kg ⁻¹
E	Eluvial	27 – 37/55	A = 215 % L = 416 % S = 369 % Quartz et débris de schiste	Polyédrique angulaire nette	Brun jaune	Quelques concrétions Fe et Mn	Nombreuses racines et galeries de lombrics
BCg	Accumulation	37/55 – 80	A = 362 % L = 313 % S = 325 % Débris de schiste recouvert de Mn ₍₂₎	Massive Localement polyédrique angulaire	Brun jaune	Tâches d'oxydation peu contrastées	CECeff = 13,3 cmol ⁺ kg ⁻¹
C2g	Altérite	80 – 125	A = 442 % L = 288 % S = 270 % Débris de schiste recouvert de Mn ₍₂₎	Massive	Bariolé	Tâches d'oxydation peu contrastées	CECeff = 20,9 cmol ⁺ kg ⁻¹

(1) A = argile (< 2 μ), L = limon fin + limon grossier (2-50 μm), S = sable fin + sable grossier (20-2000 μm),

(2) « Grisons »,

(3) CEC_{eff} = CEC effective avec échange cobaltihexamine (norme AFNOR NFX 31 – 130).

Les fumiers sont apportés avant le semis du blé tendre d'hiver, après la dernière coupe du ray-grass en automne et avant le semis du maïs au printemps. L'ammonitrate est épandu après le semis pour le maïs, au tallage et en début montaison pour le blé tendre d'hiver, en février et après la première coupe pour le ray-grass anglais.

Les conduites de chacune des trois cultures sont définies de telle manière que l'azote constitue le principal facteur limitant de la production dans les conditions pédoclimatiques moyennes du site, ce qui oblige à irriguer le maïs fourrage. Les cultures de blé tendre d'hiver et maïs sont systématiquement implantées après un travail à la machine à bêcher. Le maïs est récolté en fourrage et le blé tendre d'hiver en grains. Les pailles de blé sont exportées. Le ray-grass anglais est fauché à raison de deux ou trois coupes par an.

Les stocks d'azote minéral du sol (N-NO₃ + N-NH₄) sont mesu-

rés de 0 à 90 cm par couches de 30 cm dans deux traitements recevant une fertilisation minérale (0 et X) et dans les quatre traitements recevant les apports organiques. Les dates de mesures sont les suivantes :

- avant l'épandage des fumiers en automne,
- au démarrage du drainage en automne,
- à la sortie de l'hiver avant le premier apport d'azote minéral sur blé tendre d'hiver ou sur prairie et, en début de printemps, avant les épandages de fumiers pour le maïs,
- au stade 6-7 feuilles du maïs,
- immédiatement après la récolte du blé tendre d'hiver, la récolte du maïs et la troisième coupe d'herbe.

Lors de chaque épandage, un échantillon représentatif de chaque produit épandu est constitué pour déterminer les teneurs en eau, en

Tableau 2 - Conditions climatiques moyennes mensuelles sur la station météorologique d'Angers-Avrillé de 1955 à 2004**Table 2** - Monthly average climatic data of the meteorological station of Angers - Avrillé (49) from 1955 to 2004

	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Total
Pluviométrie	50,7	60,6	65,6	65,3	67,1	53,3	49,8	47,1	53,5	42,9	46,0	43,0	644,9
ETP	70,7	34,6	14,2	10,3	13,5	19,9	45,7	72,1	102,4	121,8	134,3	114,5	754,0
P-ETP	-20,0	26,0	51,4	55,0	53,6	33,4	4,1	-25,0	-48,9	-78,9	-88,3	-71,5	-109,1
Sommes de températures en base 0 °C	496	391	240	181	168	166	254	308	429	511	593	592	4 328,4
Nombres moyens de jours avec une température < 0 °C	0,0	0,5	4,9	8,9	10,1	9,0	5,4	1,4	0,1	0,0	0,0	0,0	40,3

Tableau 3 - Traitements comparés dans l'étude de l'« Evolution des effets azote de fumiers apportés annuellement dans une rotation maïs fourrage – blé tendre d'hiver ou sur un ray-grass anglais fauché » à La Jaillière (44)**Table 3** - Compared treatments in the experimentation "Evolution of nitrogen effects of solid manures applied annually from 1996 to 2004 in a maize forage - winter wheat rotation and on a cut perennial rye grass" at la Jaillière (44)

Régimes de fertilisation	Source d'azote	Doses d'azote (1) (2)	Codes
Minérale	Ammonitrate 33.5	0	M0
	Ammonitrate 33.5	X/4	M1
	Ammonitrate 33.5	X/2	M2
	Ammonitrate 33.5	3X/4	M3
	Ammonitrate 33.5	X	M4
Organique	Fumiers bruts de bovins	100 ou 200 kg de N total ha ⁻¹	FB1
	Fumiers compostés de bovins	100 ou 200 kg de N total ha ⁻¹	CB1
	Fumiers bruts de volailles	100 ou 200 kg de N total ha ⁻¹	FV1
	Fumiers compostés de volailles	100 ou 200 kg de N total ha ⁻¹	CV1

(1) Fertilisation minérale : X correspond à une dose d'azote minéral calculée pour atteindre le rendement objectif.

(2) Fertilisation organique : 100 kg de N total de l'engrais de ferme pour le maïs et 200 kg de N total pour le blé tendre d'hiver et le ray-grass anglais.

azote total (méthode Dumas), en azote minéral et en carbone (combustion sèche) de ce produit (tableau 4).

Les biomasses aériennes des couverts végétaux ainsi que leurs teneurs en azote sont mesurées à la récolte du maïs, à la récolte du blé tendre d'hiver et à chaque récolte d'herbe.

RÉSULTATS

Pour chacun des produits organiques étudiés, nous avons déterminé successivement (Corgnet M., 2003) :

- les coefficients apparents d'utilisation de l'azote total (CAU) des fumiers sur les périodes 1996-2004 (cas du ray-grass anglais fauché) et 1997-2004 (cas de la rotation maïs fourrage-blé tendre d'hiver),
- la minéralisation nette de l'azote organique au cours de chacun des intervalles de temps séparant deux mesures successives de stocks d'azote minéral du sol sur les périodes 1996-2001 (cas du ray-grass anglais fauché) et 1997-2001 (cas de la rotation maïs fourrage-blé tendre d'hiver).

Coefficients apparents d'utilisation de l'azote total des fumiers

Calculs effectués

La formule utilisée pour ces calculs de CAU est la suivante :

$$CAU_{fum} = \frac{Nabs_{fum} - Nabs_0}{N_{tot\ fum} + (R_{avt\ ep\ fum} - R_{avt\ ep.0})}$$

avec : $Nabs_{fum}$ = azote accumulé à la récolte dans les plantes ayant reçu un apport organique (y compris une fraction affectée forfaitairement aux racines)

$Nabs_0$ = azote accumulé dans les plantes du témoin sans azote à la récolte

$N_{tot\ fum}$ = azote total apporté avec le fumier

$R_{avt\ ep\ fum}$ = stock N minéral du sol dans un traitement organique juste avant l'épandage du fumier

$R_{avt\ ep.0}$ = stock N minéral du sol dans le témoin sans azote juste avant l'épandage du fumier

Tableau 4 - Composition moyenne des fumiers utilisés (en % du produit brut)**Table 4** - Average composition of applied solid manures (in % of the primary product)

Types de produits	Dose moyenne (en t de produit brut ha ⁻¹)	Teneurs en MS	Teneurs en C total	Teneurs en N total	Teneurs en N ammoniacal	Teneurs en N nitrique
Fumiers bruts de bovins	20,5	303	114	8	0,2	0,1
Fumiers compostés de bovins	18,7	327	116	9	0,1	0,2
Fumiers bruts de volailles	6,4	664	284	25	3,1	0,5
Fumiers compostés de volailles	6,5	652	255	23	2	0,2

Tableau 5 - Evolution des CAU de l'azote total des fumiers bruts et compostés apportés en automne sur ray-grass anglais fauché**Table 5** - Evolution of total nitrogen apparent recovery (NAR) index of the uncomposted and composted solid manures applied in autumn on the cut perennial rye grass

Types de produits	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Ammonitrate	0,81	0,44	0,80	0,77	0,52	0,54	0,78	0,49	0,50
Fumiers bruts de bovins	0,17*	0,10	0,08	0,09	0,09	0,09	0,12	0,12	0,15
Fumiers compostés de bovins	0,08*	0,11	0,10	0,18	0,10	0,10	0,10	0,10	0,14
Fumiers bruts de volailles	0,49*	0,21	0,32	0,30	0,32	0,17	0,19	0,25	0,34
Fumiers compostés de volailles	0,42*	0,15	0,19	0,21	0,18	0,14	0,19	0,19	0,36

* Apports effectués au printemps 1996 et non en automne 1995.

L'azote minéral présent dans le sol avant l'épandage des produits a été pris en considération afin d'éliminer du calcul les différences de stock d'azote minéral entre le témoin 0 azote et chaque traitement fumier. Il est, de ce fait, postulé que l'azote fourni à la culture par les produits organiques a le même coefficient d'utilisation que l'azote minéral présent dans le sol au moment de l'épandage.

Evolution des CAU de l'azote des fumiers apportés en automne sur ray-grass anglais

Les CAU de l'azote total des fumiers bruts et compostés de bovins apportés en automne sur prairie ont peu varié de 1997 à 2004, contrairement à ceux de l'azote minéral (tableau 5). Leur constance dans le temps (valeurs moyennes de 0,10 pour les fumiers bruts et de 0,11 pour les fumiers compostés) témoigne de la faible efficacité de l'azote de ces fumiers en apport d'automne et de l'absence d'effet perceptible de son accumulation dans le sol (« arrière effet »).

Les CAU de l'azote total des fumiers compostés de volailles sont également demeurés stables de 1997 à 2003, avec des valeurs inférieures à 0,20 pour monter à 0,36 en 2004.

Pour les fumiers bruts de volailles, les CAU, d'abord voisins de 0,30 de 1997 à 2000, sont redescendus au-dessous de 0,20 en 2001

et 2002 pour remonter à 0,25 en 2003 et 0,34 en 2004. Les fumiers utilisés au cours des deux campagnes 2001 et 2002 étaient plus riches en azote minéral que les années précédentes. Les pertes d'azote par volatilisation, dénitrification ou lixiviation pendant l'hiver qui a suivi les apports réalisés au cours des automnes 2000 et 2001 ont probablement été plus importantes que pendant les cinq campagnes précédentes, ce qui peut expliquer cette forte diminution des CAU en 2001 et 2002.

Quel que soit le type de fumiers, aucune augmentation significative des CAU n'a pu être mise en évidence entre 1997 et 2004 pour le ray-grass anglais.

Evolution des CAU de l'azote des fumiers apportés en automne sur le blé tendre d'hiver tournant avec un maïs fourrage

Comme le montre le tableau 6, les CAU de l'azote total des fumiers bruts et compostés de bovins apportés en automne sur le blé tendre d'hiver tournant avec le maïs fourrage sont restés stables et faibles (valeur moyenne de 0,04) entre 1998 et 2004.

De même, les CAU des fumiers bruts et compostés de volailles ont peu évolué au cours de ces quatre campagnes. En revanche,

Tableau 6 - Evolution des CAU de l'azote total des fumiers bruts et compostés apportés en automne sur blé tendre d'hiver tournant avec un maïs fourrage

Table 6 - Evolution of total nitrogen apparent recovery (NAR) index of the uncomposted and composted solid manures applied in autumn on the winter wheat rotating with the forage maize

Types de produits	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Ammonitrate	-	0,88	-	0,68	-	0,70	-	0,55
Fumiers bruts de bovins	-	0,03	-	0,06	-	0,06	-	0,06
Fumiers compostés de bovins	-	0,02	-	0,07	-	0,07	-	0,01
Fumiers bruts de volailles	-	0,27	-	0,17	-	0,23	-	0,23
Fumiers compostés de volailles	-	0,22	-	0,15	-	0,15	-	0,16

Tableau 7 - Evolution des CAU de l'azote total des fumiers bruts et compostés apportés au printemps sur le maïs fourrage tournant avec un blé tendre d'hiver

Table 7 - Evolution of total nitrogen apparent recovery (NAR) index of the uncomposted and composted solid manures applied in spring on the forage maize rotating with the winter wheat

Types de produits	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Ammonitrate	0,54	-	0,79	-	0,61	-	0,88	-
Fumiers bruts de bovins	0,21	-	-0,10	-	0,08	-	0,23	-
Fumiers compostés de bovins	0,30	-	0,22	-	0,14	-	0,26	-
Fumiers bruts de volailles	0,42	-	0,46	-	0,28	-	0,44	-
Fumiers compostés de volailles	0,33	-	0,45	-	0,20	-	0,44	-

ces produits présentent des CAU nettement plus élevés que ceux des fumiers de bovins avec une valeur moyenne de 0,23 pour les fumiers bruts de volailles et de 0,17 pour les fumiers compostés de volailles.

Quel que soit le type de fumiers, aucune augmentation significative des CAU n'a pu être mise en évidence entre 1998 et 2004 pour le blé tendre d'hiver.

Evolution des CAU de l'azote des fumiers apportés au printemps sur le maïs fourrage tournant avec un blé tendre d'hiver

Les CAU de l'azote total des fumiers bruts et compostés de bovins apportés au printemps sur le maïs fourrage tournant avec le blé tendre d'hiver se caractérisent par une baisse des CAU au cours des campagnes 1999 et 2001 suivie d'une remontée en 2003 au niveau de la première campagne (*tableau 7*). Les valeurs moyennes des CAU sont respectivement de 0,11 pour les fumiers bruts de bovins et de 0,23 pour les fumiers compostés de bovins.

Les CAU des fumiers bruts et compostés de volailles varient beaucoup moins entre campagnes que ceux des fumiers bruts et compostés de bovins. Leurs valeurs moyennes sont respectivement de 0,40 pour les fumiers bruts de volailles et de 0,36 pour les fumiers compostés de volailles.

Quel que soit le type de fumiers, aucune augmentation significative des CAU n'a pu être mise en évidence entre 1997 et 2003 pour le maïs fourrage.

Minéralisations nettes de l'azote organique des fumiers

Calculs effectués

La minéralisation nette de l'azote organique (MINnette) des quatre produits correspond à la différence entre la minéralisation nette observée pour chacun des produits et celle du témoin sans azote (en kg de N ha⁻¹).

Elle a été calculée pour chaque période comprise entre deux dates de mesures du stock d'azote minéral du sol avec la formule suivante:

$$\text{MINnette} = R_{\text{fin}} + N_{\text{abs}} + N_{\text{less}} - N_{\text{min fert}} (1 - V) - R_{\text{deb}}$$

Avec :

$N_{\text{min fert}}$ = azote minéral apporté par le fumier ou l'ammonitrate

R_{deb} = azote minéral présent dans le sol en début de période

R_{fin} = azote minéral présent dans le sol en fin de période

N_{abs} = azote absorbé par le couvert pendant cette période

N_{less} = azote lessivé pendant cette période, estimé avec le logiciel LIXIM (Mary B. *et al.*, 1999) qui en donne une bonne estimation pour les sols nus ou couverts d'une végétation peu développée.

Tableau 8 - Estimation des pertes moyennes annuelles d'azote par lessivage et par volatilisation dans les deux essais**Table 8** - Assessment of the annual average nitrogen losses by leaching and volatilization in both trials

Essais	Traitements	Lessivage (en kg de N ha ⁻¹ an ⁻¹)	Volatilisation (en kg de N ha ⁻¹ an ⁻¹)
Ray-grass anglais fauché	Fumiers bruts de bovins	8,7	16
	Fumiers compostés de bovins	8,5	0,8
	Fumiers bruts de volailles	10,6	2,2
	Fumiers compostés de volailles	9	1,6
Rotation maïs fourrage -blé tendre d'hiver	Fumiers bruts de bovins	47,8	0,3
	Fumiers compostés de bovins	51,6	0,3
	Fumiers bruts de volailles	66,6	0
	Fumiers compostés de volailles	61,3	3,1

Tableau 9 - Corrections effectuées sur la minéralisation de l'azote organique des fumiers pour tenir compte des effets de « l'engorgement » du sol après épandage (en kg de N ha⁻¹ an⁻¹)**Table 9** - Corrections of organic nitrogen mineralization of the applied solid manures carried out to take account of the effects of "soil waterlogging" during the fifty normalized days following each application of these products (in kg of N ha⁻¹ year⁻¹)

Traitements	Essai en ray-grass anglais fauché	Essai en rotation maïs fourrage-blé tendre d'hiver
Fumiers bruts de bovins	47	73
Fumiers compostés de bovins	20	44
Fumiers bruts de volailles	42	31
Fumiers compostés de volailles	10	33

En présence d'un couvert bien développé, LIXIM a, par contre, tendance à surestimer le lessivage (*tableau 8*).

V = taux de volatilisation de l'azote ammoniacal des fumiers déterminé avec le logiciel anglais MANNER (Nicholson F. *et al.*, date). Ce taux est fonction de la durée qui sépare la date de l'épandage de l'enfouissement du fumier (*tableau 8*).

L'unité de temps retenue pour exprimer les vitesses de minéralisation de l'azote organique est le jour normalisé à 15 °C (proche de la température moyenne annuelle à La Jaillière) avec un sol à la capacité au champ (Morvan T. *et al.*, 1997).

Chaque année, les minéralisations nettes de l'azote organique des fumiers obtenues avec la formule ont été ajustées au moyen de l'équation suivante (Stanford *et al.*, 1972):

$$N_{min} = N_0 (1 - e^{-kt})$$

avec :

N_{min} = minéralisation nette cumulée de l'azote organique du produit,

N_0 = quantité d'azote organique appliqué,

k = constante de vitesse de minéralisation de l'azote organique du produit,

t = temps cumulé depuis l'épandage en jours normalisés à 15 °C.

La confrontation, par essai et par produit, des valeurs annuelles de k avec l'importance de l'engorgement pendant les 50 jours nor-

malisés pour la minéralisation à 15 °C suivant chaque épandage aboutit à la mise en évidence de relations linéaires entre ces deux variables. Cela nous a permis d'évaluer la minéralisation nette de l'azote organique des apports successifs de fumier qui aurait dû être observée en l'absence d'excès d'eau (*tableau 9*).

Evolution de la minéralisation nette cumulée de l'azote des fumiers apportés sur le ray-grass anglais

Comme le montrent les *figures 1 et 2*, la minéralisation nette cumulée de l'azote organique des fumiers apportés tous les ans en automne sur le ray-grass anglais fauché est une fonction linéaire du temps exprimé en jours normalisés à 15 °C au cours des six premières campagnes d'essai. Les coefficients de détermination R^2 des équations établies entre ces deux paramètres sont très élevés (0,97 à 0,98 selon les traitements).

La minéralisation nette cumulée après six campagnes successives d'apports de fumiers (1 150 jours normalisés à 15 °C) a été de :

- 423 kg de N ha⁻¹ pour les fumiers bruts de bovins, soit 70 kg de N/campagne,
- 270 kg de N ha⁻¹ pour les fumiers compostés de bovins, soit 45 kg de N/campagne,
- 513 kg de N ha⁻¹ pour les fumiers bruts de volailles, soit 86 kg de N/campagne,
- 238 kg de N ha⁻¹ pour les fumiers compostés de volailles, soit 48 kg de N/campagne.

Figure 1 - Evolution de la minéralisation nette cumulée de l'azote organique des fumiers bruts (FB) ou compostés (CB) de bovins entre les apports successifs de fumier pour le ray-grass anglais fauché

Figure 1 - Evolution of the cumulated net mineralization of the uncomposted (FB) and composted (CB) cattle solid manures between successive applications of these products for the cut perennial rye grass

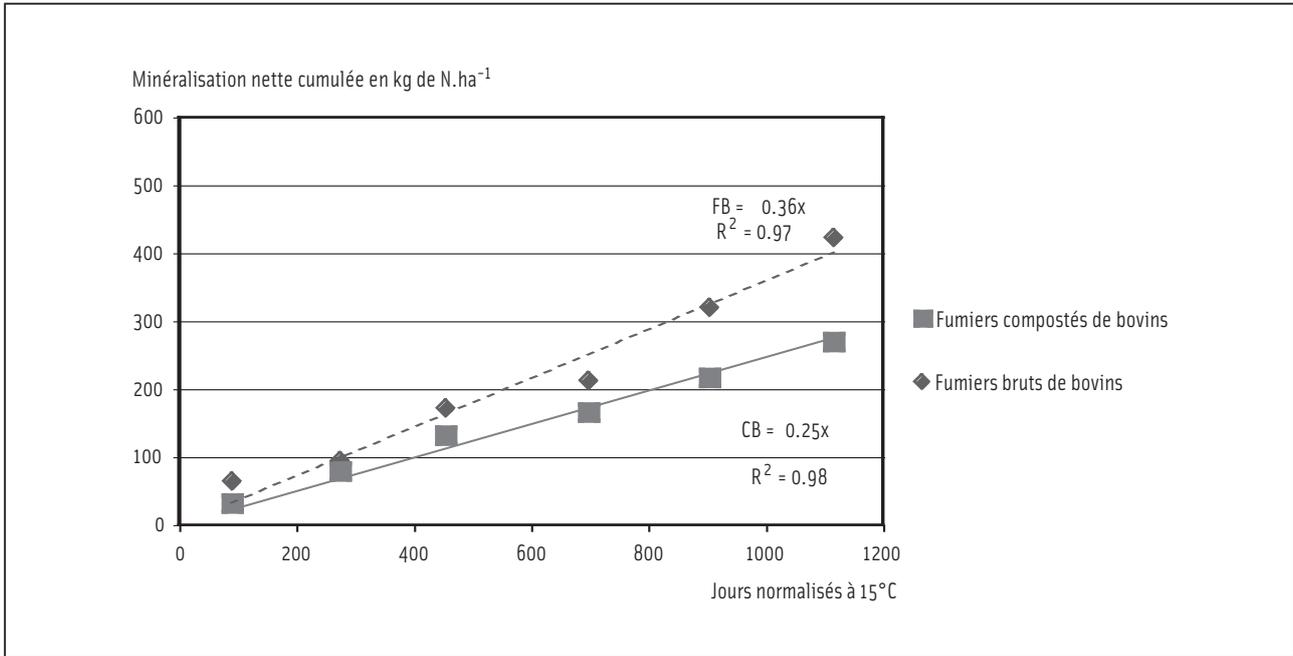
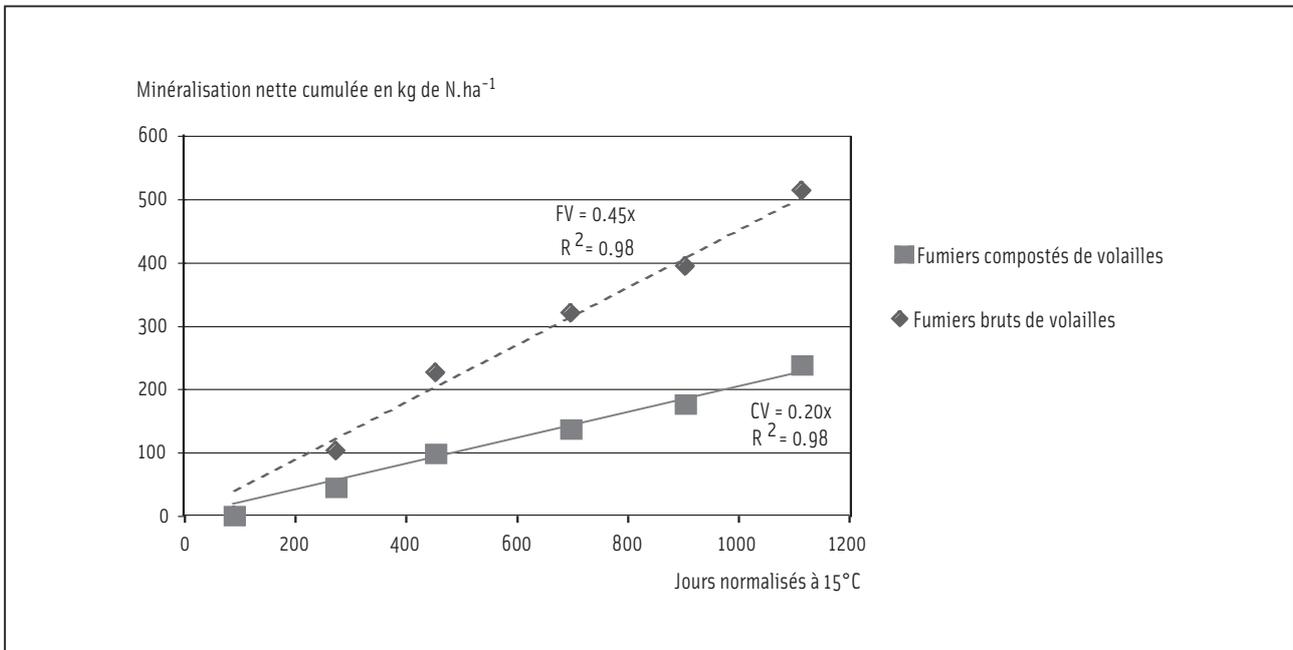


Figure 2 - Evolution de la minéralisation nette cumulée de l'azote organique des fumiers bruts (FV) ou compostés (CV) de volailles entre les apports successifs de fumiers pour le ray-grass anglais fauché

Figure 2 - Evolution of the cumulated net mineralization of the uncomposted (FV) and composted (CV) broiler litter between successive applications of these products for the cut perennial rye grass



Les taux globaux de minéralisation de l'azote organique apporté par les fumiers au cours des six premières campagnes de l'essai en ray-grass anglais, c'est-à-dire les ratios entre la minéralisation nette cumulée de cet azote organique et la quantité totale d'azote organique apporté avec ces produits, ont été les suivants :

- 42 % pour les fumiers bruts de bovins,
- 23 % pour les fumiers compostés de bovins,
- 56 % pour les fumiers bruts de volailles,
- 27 % pour les fumiers compostés de volailles.

La différence entre les taux globaux de minéralisation de l'azote organique des fumiers bruts et ceux des fumiers compostés peut s'expliquer, au moins en partie, par des corrections de la minéralisation nette pour « engorgement » du sol après épandage plus importantes pour les fumiers bruts que pour les fumiers compostés (voir *tableau 9*) et par une plus grande stabilité de la fraction organique des fumiers compostés.

Evolution de la minéralisation nette cumulée de l'azote des fumiers apportés dans la rotation maïs fourrage – blé tendre d'hiver (*figures 3 et 4*)

Comme pour le ray-grass anglais, la minéralisation nette cumulée de l'azote organique des fumiers apportés tous les ans dans la rotation maïs fourrage – blé tendre d'hiver est aussi une fonction linéaire du temps exprimé en jours normalisés à 15 °C au cours des cinq premières campagnes d'essai. Les coefficients de détermination R^2 des équations établies entre ces deux paramètres sont très élevés (0,98 à 1,00).

La minéralisation nette cumulée après cinq campagnes successives d'apports de fumiers (1 089 jours normalisés à 15 °C) a été de :

- 432 kg de N ha⁻¹ pour les fumiers bruts de bovins, soit 86 kg de N/campagne,
- 330 kg de N ha⁻¹ pour les fumiers compostés de bovins, soit 66 kg de N/campagne,
- 395 kg de N ha⁻¹ pour les fumiers bruts de volailles, soit 79 kg de N/campagne,
- 359 kg de N ha⁻¹ pour les fumiers compostés de volailles, soit 72 kg de N/campagne.

Les taux globaux de minéralisation de l'azote organique apporté par les fumiers au cours des cinq premières campagnes de l'essai en rotation maïs fourrage – blé tendre d'hiver ont été les suivants :

- 42 % pour les fumiers bruts de bovins,
- 39 % pour les fumiers compostés de bovins,
- 54 % pour les fumiers bruts de volailles,
- 49 % pour les fumiers compostés de volailles.

Pour les fumiers bruts, ces taux globaux de minéralisation sont quasi identiques à ceux observés sur ray-grass anglais. En revanche, ceux obtenus avec des fumiers compostés ont été presque doublés par rapport à ceux enregistrés sur ray-grass anglais.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans la situation culturale considérée, l'apport annuel répété de doses modérées de fumiers bruts ou compostés de bovins et de volailles n'a apparemment entraîné aucune augmentation significative de la fourniture d'azote par le sol sur des périodes de cinq à neuf ans. Cela ressort aussi bien de l'observation de l'évolution des CAU que de celle des minéralisations nettes cumulées. A cet égard, les enseignements tirés de l'essai portant un ray-grass anglais fauché sont identiques à ceux de l'essai conduit avec une rotation maïs fourrage – blé tendre d'hiver.

Cela ne signifie pas l'absence « d'arrière-effets » azote des apports réguliers de fumiers. Mais, la manifestation perceptible de tels arrière-effets nécessite des modifications importantes de la teneur en azote organique du sol. Une durée d'apports de cinq à neuf ans est probablement insuffisante pour observer un tel résultat, sauf dans le cas de sols initialement très pauvres en azote organique ou celui d'applications régulières et massives de fumiers.

Les valeurs de CAU obtenues sur ces deux essais (*tableau 10*) peuvent donc être considérées comme la résultante de l'azote minéral des fumiers étudiés et de l'azote minéralisé par la fraction organique rapidement décomposable de ces produits (durée 1 à 2 ans). Elles correspondent principalement à l'effet direct azote des fumiers épandus.

Les coefficients d'équivalence azote (ratios CAU du fumier / CAU de l'ammonitrate) déduits de ces valeurs de CAU sont très voisins des références bibliographiques (Institut de l'Élevage, ITAVI, ITCF, ITP, 2001 ; Chambres d'Agriculture de Bretagne, 2002) pour les fumiers bruts ou compostés de bovins apportés en automne sur blé tendre d'hiver, et pour les fumiers bruts de bovins apportés en automne sur ray-grass anglais et au printemps sur maïs fourrage. Dans les autres cas, ils présentent des valeurs supérieures à celles de la bibliographie, notamment les fumiers bruts ou compostés de volailles apportés en automne sur blé tendre d'hiver.

Les fumiers bruts de bovins ou de volailles apportés pendant cinq campagnes dans la rotation maïs fourrage – blé tendre d'hiver ou pendant six campagnes sur le ray-grass anglais fauché présentent des taux globaux de minéralisation de l'azote organique quasi identiques : 42 % pour les fumiers bruts de bovins, 54 et 56 % pour les fumiers bruts de volailles. En revanche, les taux globaux de minéralisation de l'azote organique des fumiers compostés sont beaucoup plus faibles sur ray-grass anglais (23 % et 27 %) que dans la rotation maïs fourrage – blé tendre d'hiver (39 % et 49 %). Il s'agit probablement d'un effet lié à l'enfouissement des produits dans le cas de la rotation maïs fourrage – blé tendre d'hiver alors qu'ils demeurent à la surface du sol pour la prairie. On peut s'interroger, toutefois, sur les raisons pour lesquelles cela ne semble pas influencer la minéralisation des fumiers bruts. Il pourrait être apporté quelques éléments de discussion quant aux aspects opérationnels (effet dates d'apport des fumiers).

Figure 3 - Evolution de la minéralisation nette cumulée de l'azote organique des fumiers bruts (FB) ou compostés (CB) de bovins entre les apports successifs de fumiers pour la rotation maïs fourrage – blé tendre d'hiver

Figure 3 - Evolution of the cumulated net mineralization of the organic nitrogen of the uncomposted (FB) and composted (CB) cattle solid manures between the successive applications of these products for the forage maize winter wheat rotation

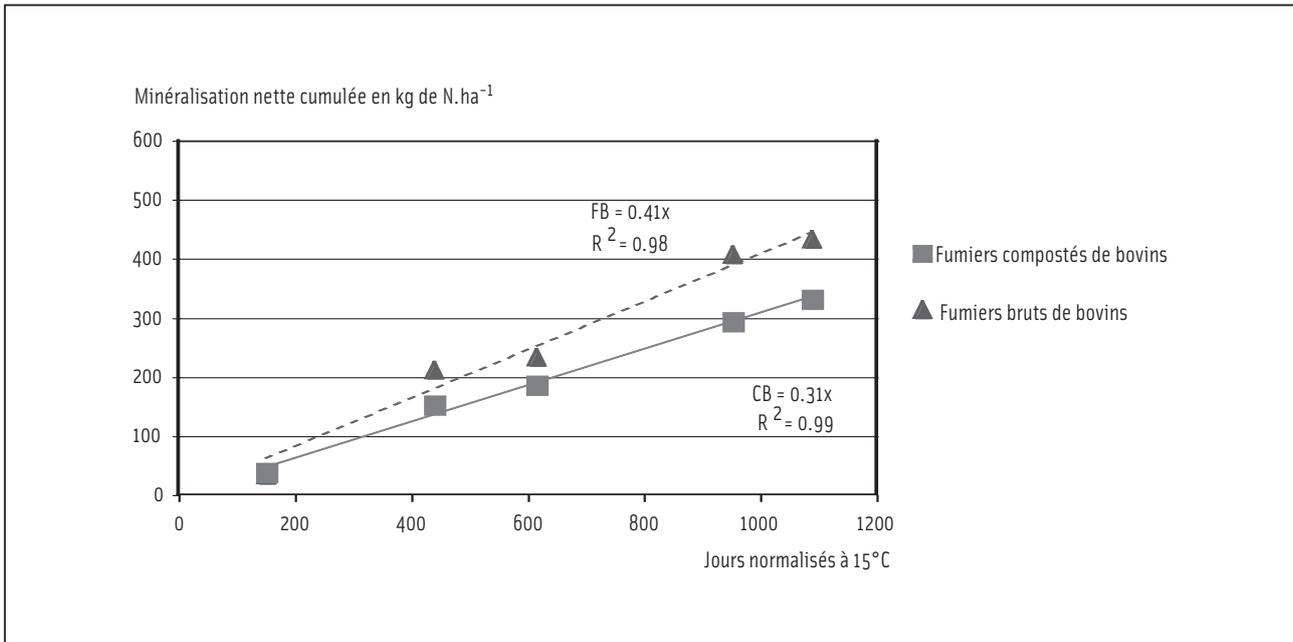


Figure 4 - Evolution de la minéralisation nette cumulée de l'azote organique des fumiers bruts (FV) ou compostés (CV) de volailles entre les apports successifs de fumiers pour la rotation maïs fourrage – blé tendre d'hiver

Figure 4 - Evolution of the cumulated net mineralization of the organic nitrogen of the uncomposted (FV) and composted (VB) broiler litter between the successive applications of these products for the forage maize winter wheat rotation

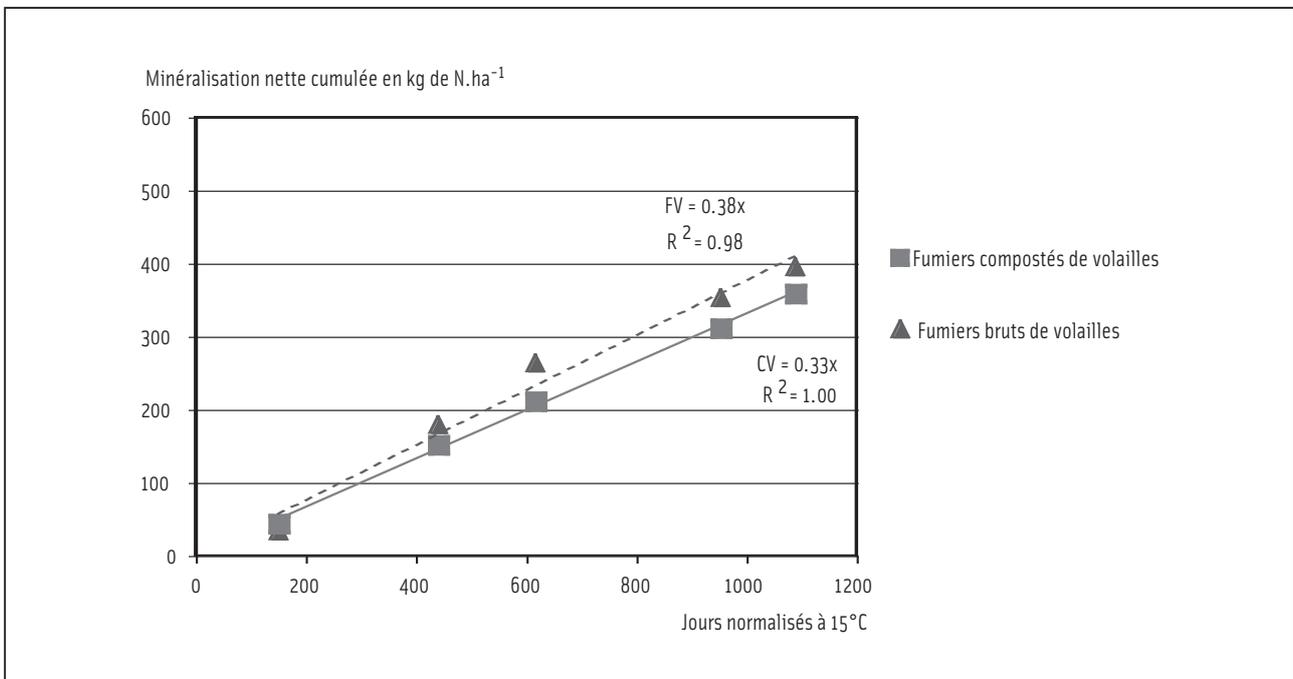


Tableau 10 - Valeurs moyennes des CAU de l'azote total des fumiers bruts et compostés**Table 10** - Average values of the total nitrogen apparent recovery (NAR) index of uncomposted and composted solid manures

Traitements	Ray-grass anglais fauché (1)	Maïs fourrage (2)	Blé tendre d'hiver (1)
Fumiers bruts de bovins	0,10	0,11	0,05
Fumiers compostés de bovins	0,12	0,23	0,04
Fumiers de bruts de volailles	0,26	0,40	0,23
Fumiers compostés de volailles	0,20	0,36	0,17

(1) Apports d'automne

(2) Apports de printemps

Cette étude de l'évolution des effets azote à moyen terme d'apports répétés de fumiers montre qu'il est nécessaire d'améliorer notre connaissance de la dynamique de minéralisation de l'azote organique des fumiers après épandage. Il importe donc que, dans ces essais, la dernière campagne soit consacrée à un examen approfondi des effets des apports répétés de fumiers sur les comportements chimiques, physiques et biologiques du sol. Il convient que les organismes de Recherche Appliquée (Instituts Techniques, Chambres d'Agriculture...), en partenariat étroit avec les Unités INRA d'Agronomie Laon-Reims et Rennes-Quimper, fassent la synthèse des jeux de données sur la minéralisation au champ et au laboratoire des produits organiques dont ils disposent.

BIBLIOGRAPHIE

- Chambres d'Agriculture de Bretagne, 2002 - Coefficients d'équivalence engrais azoté des principaux engrais de ferme. Brochure, 31 pages.
- Corgnet M., 2003 - Les arrière-effets azote : étude des effets à moyen terme d'apports répétés de fumiers de bovins ou de fumiers de volailles, bruts ou compostés, sur une rotation maïs-blé et une prairie installée . Mémoire de fin d'études, Ecole Supérieure d'Agriculture d'Angers, 77 pages.
- Institut de l'Élevage, ITAVI, ITCF, ITP, 2001 - Fertiliser avec des engrais de ferme. Brochure, 101 pages.
- Jamagne M., 1967 - Bases et techniques d'une cartographie des sols. Annales Agronomiques, volume 18, n° hors série, 142 p.
- Kriegk O., 1980 - Etude pédologique préalable à l'implantation d'une ferme expérimentale. CANA, 76 pages.
- Morvan T., Leterme P., Mary B., Arsene G.G., 1997 - Nitrogen transformation after the spreading of pig slurry on bare soil ryegrass using 15N-labeled ammonium ». *European Journal of Agronomy*, 7, pp 181-188.
- Stanford G. and Smith S.J., 1972 - Nitrogen mineralisation potentials of soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 36, pp. 465-472.
- Mary B., Beaudouin N., Justes E., Machet J.M., 1999 - Calculation of nitrogen mineralisation and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science*, 50, pp.549-566.
- Nicholson F., Chambers B., Smith K., 1997 - Welcome to MANNER, version 2.1, user guide. Advisory Development and Agricultural Service, 10 pages.