

# Efficacité de l'utilisation de l'azote contenu dans le lisier fermenté

Klaus Jarosch<sup>1,2</sup>, Walter Richner<sup>1</sup> et Jochen Mayer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

<sup>2</sup>Institut géographique, Université de Berne, 3012 Berne, Suisse

Renseignements: Jochen Mayer, e-mail: jochen.mayer@agroscope.admin.ch



Le digestat produit dans les installations de biogaz est une source idéale d'azote à action rapide pour les grandes cultures ou les herbages: installation de méthanisation agricole à Kaisten (AG).

(Photo: Jacques Fuchs, FiBL)

## Introduction

La fermentation de déchets organiques pour la production de biogaz a pris de l'importance ces dernières années en Suisse. En raison d'une croissance constante depuis les années 1990, la Suisse compte actuellement une centaine d'installations de méthanisation industrielle ou de biogaz agricoles (Mandaliev et Schleiss 2016). Dans ces installations, les engrais de ferme (fumier et lisier) sont mis à fermenter seuls ou mélangés à des déchets biogènes provenant de la collecte municipale ou de la transformation des denrées alimentaires (déchets végétaux, déchets de légumes, graisses, etc.). Pendant le processus de fermentation, des liaisons organiques complexes, comme la cellulose, les protéines ou les acides gras sont décomposés par des microorganismes anaérobies. Ce processus libère du biogaz (méthane) qui est utilisé pour produire de l'énergie sous forme de chaleur ou d'électricité. Les liaisons azotées organiques libèrent des liaisons azotées anorganiques, notamment de l'azote ammoniacal ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), qui sont directement dispo-

nibles pour les plantes. La part de  $\text{NH}_4\text{-N}$  dans le digestat augmente grâce au processus de fermentation, tandis que la part d'azote organique lié ( $\text{N}_{\text{org}}$ ) baisse. Comme les microorganismes décomposent le carbone facilement disponible, il faut s'attendre à une immobilisation plus faible de  $\text{NH}_4\text{-N}$  après épandage de digestat qu'après épandage de substrats non fermentés. La fermentation représente donc une valorisation de la matière première initiale par rapport à disponibilité de l'azote pour les plantes, notamment dans le cas de la fermentation de liaisons organiques facilement décomposables. C'est pourquoi le digestat est une source idéale d'azote à action rapide pour les grandes cultures ou les herbages. Toutefois, même après la fermentation, le digestat contient encore des quantités importantes d'azote organique. En cas d'épandage répété de produits de fermentation sur plusieurs années, un stock d'azote organique s'accumule dans le sol. La minéralisation de l'azote organique dans le sol lui permet, à long terme, d'être

assimilable par les plantes. Jusqu'à présent, on sait peu de choses sur l'efficacité d'utilisation de l'azote contenu dans le digestat à long terme, notamment grâce à la minéralisation des stocks d'azote organique liés à un épandage répété (Richner *et al.* 2017). Cela est dû premièrement au fait que la technologie de la fermentation ne commence à être appliquée à grande échelle que depuis quelques années; et, deuxièmement, au fait que la qualité et la composition du digestat varient beaucoup car les différents substrats utilisés au départ et les paramètres du processus de fermentation (durée, température) influencent beaucoup les propriétés du produit final.

A l'avenir, il faut s'attendre à une multiplication des installations de méthanisation agricoles et à une augmentation des volumes de digestat liquide. Actuellement, il n'existe pas d'études suffisamment approfondies sur les essais de terrain longue durée relatifs à l'efficacité d'utilisation de l'azote pour pouvoir tirer des conclusions fondées. C'est pourquoi l'objectif de ce travail était, à partir de recherches bibliographiques et d'une simulation, d'estimer l'efficacité, à moyen et long terme, de l'utilisation de l'azote contenu dans le digestat liquide issu des installations de biogaz agricoles en Suisse.

## Matériel et méthodes

### Recherches bibliographiques

Une recherche a été faite pour voir si la littérature scientifique s'était penchée sur l'efficacité d'utilisation de l'azote à long terme. Il s'est avéré que relativement peu de travaux avaient généralement été publiés pour les conditions caractéristiques de la Suisse. Par ailleurs, la plupart des études allaient rarement au-delà d'une période d'essai de trois ans. Néanmoins, ces recherches ont permis d'aboutir à quelques déclarations générales:

- L'effet fertilisant de l'azote contenu dans les produits de la fermentation était dans de nombreux cas supérieur à ce que la teneur en  $\text{NH}_4\text{-N}$  aurait laissé supposer. Cela indique une minéralisation supplémentaire des liaisons azotées organiques après l'épandage du digestat, au bénéfice des plantes (Möller et Müller 2012; Fouda *et al.* 2013; Nkoa 2014).
- La minéralisation de l'azote organique issu des produits de la fermentation n'est pas constante dans le temps. Au contraire, les taux de minéralisation sont généralement plus élevés pendant les premières années qui suivent l'épandage qu'après (Gutser *et al.* 2005; Webb *et al.* 2013).
- La plage de minéralisation de l'azote organique du lisier fermenté trouvée dans la littérature va de 7–20 %

### Résumé

La fermentation des engrais de ferme et des autres matériaux organiques a pris beaucoup d'importance ces dernières années. Le processus de fermentation produit du biogaz (méthane) et augmente la part de composés azotés facilement disponibles dans le lisier fermenté. A ce jour, peu de recherches ont été faites sur la valeur fertilisante du lisier fermenté dans les conditions propres à la Suisse, notamment en ce qui concerne la disponibilité de l'azote à long terme. Dans cette étude, un modèle numérique est employé pour estimer l'efficacité de l'utilisation de l'azote des lisiers fermentés couramment utilisés en Suisse. Suivant la qualité du lisier fermenté, l'efficacité d'utilisation de l'azote atteint des pourcentages compris entre 64 % et 83 % en l'espace de 80 ans. La minéralisation d'azote organique dans les années qui suivent l'épandage de l'engrais contribue considérablement à l'efficacité élevée d'utilisation de l'azote lors d'épandages répétés.

(40 %<sup>1</sup>) l'année de l'épandage, à 2,6–5 % (9 %<sup>1</sup>) l'année suivante pour finir à 1,1–2 % (3 %<sup>1</sup>) dans les années ultérieures (Klausner *et al.* 1994; Schröder *et al.* 2007; Gunnarsson *et al.* 2010; Rigby et Smith 2013).

Par conséquent, la teneur en  $\text{NH}_4\text{-N}$  ne peut pas être le seul indicateur servant à estimer la disponibilité de l'azote des produits fermentés à long terme. Il faut en effet aussi tenir compte de la minéralisation des liaisons azotées organiques présentes dans les digestats avant de pouvoir se prononcer sur la disponibilité de l'azote sur de longues périodes d'épandage. La grande diversité des substrats utilisés initialement pour la fermentation entraîne également des taux de décomposition très variables de l'azote organique des digestats.

### Estimation de l'efficacité de l'utilisation de l'azote

Un modèle mathématique a été développé sur la base des résultats des recherches bibliographiques. Il entend estimer le potentiel fertilisant effectif de l'azote contenu dans les produits de la fermentation en cas d'épandage répété. La quantité d'azote disponible pour les plantes ( $N_{\text{disponible}}$ ) se compose de la quantité de  $\text{NH}_4\text{-N}$  présente dans le digestat plus la quantité d'azote libéré à partir

<sup>1</sup> Les pourcentages entre parenthèses indiquent les valeurs maximales issues de la revue de la littérature qui n'ont pas été prises en compte dans les scénarios présentés.

de la minéralisation de  $N_{org}$ . Les principales modalités de pertes sont également prises en compte:

$N_{disponible} = NH_4-N$  (l'année de l'épandage) – pertes de  $NH_4-N$  lors de l'épandage + cumul de  $N_{org}$  minéralisé – pertes dues au lessivage et à la dénitrification

Ce mode de calcul part de l'hypothèse que la totalité de  $NH_4-N$  est directement disponible pour les plantes. Il ne prend donc pas en compte la possibilité d'une immobilisation microbienne de l'azote. Vu la concentration relativement faible de sources de carbone facilement accessibles aux microorganismes dans le digestat et les taux réduits d'immobilisation de l'azote qui en découlent (Albuquerque *et al.* 2012; Webb *et al.* 2013), le modèle utilisé n'a pas pris en compte ce processus d'immobilisation.

L'azote organique  $N_{org}$  minéralisé est la part d'azote organique qui est minéralisé en  $NH_4-N$  dans le sol et qui devient donc assimilable par les plantes. On distingue trois phases de la minéralisation de l'azote dans le temps: 1) la minéralisation de l'azote l'année de l'épandage, 2) la minéralisation de l'azote l'année qui suit l'épandage et 3) la minéralisation de l'azote les années ultérieures. Un taux de minéralisation propre a été attribué à chacune de ces phases en fonction des informations disponibles dans la littérature. Sachant que les taux de minéralisation peuvent varier suivant les conditions environnementales (température du site, humidité du sol) et la décomposition de  $N_{org}$ , deux scénarios ont été calculés avec des taux de minéralisation différents pour chaque phase. Le scénario A prend pour hypothèse une minéralisation moyenne de l'azote organique  $N_{org}$  épandu (20 % la première année; 5 % l'année suivante et 2 % les années ultérieures) (tabl. 1). Le scénario B au contraire choisit des taux de minéralisation lents de 7 %, 2,6 % et 1,1 % pour les trois phases.

Dans l'hypothèse d'un épandage répété de digestat, la quantité totale d'azote organique minéralisé est la somme de tous les produits de la minéralisation issus des apports de  $N_{org}$  pendant les différentes années. Les réserves de  $N_{org}$  des années précédentes diminuent certes chaque année, mais les nouveaux apports de digestat mettent à disposition du  $N_{org}$  frais. Par conséquent, si une parcelle a été fertilisée pendant cinq ans à l'aide de digestat, il faut prendre en compte cinq fractions d'azote organiques différentes avec chacune leur taux de minéralisation:

Somme d'azote organique minéralisé après cinq ans d'épandages répétés =

$N_{org}$  nouvellement apporté l'année 5 \* taux de minéralisation l'année de l'épandage +

**Tableau 1 | Scénarios représentant un taux moyen (A) et un taux lent (B) de minéralisation de l'azote  $N_{org}$  répartis en fonction des années suivant l'épandage, sur la base des données disponibles dans la littérature.**

	Scénario A	Scénario B
Année d'épandage	20 %	7 %
Première année suivant l'épandage	5 %	2,6 %
Années ultérieures	2 %	1,1 %

Reste de  $N_{org}$  de l'année 4 \* taux de minéralisation l'année suivant l'épandage +  
 Reste de  $N_{org}$  de l'année 3 \* taux de minéralisation dans les années ultérieures +  
 Reste de  $N_{org}$  de l'année 2 \* taux de minéralisation dans les années ultérieures +  
 Reste de  $N_{org}$  de l'année 1 \* taux de minéralisation dans les années ultérieures

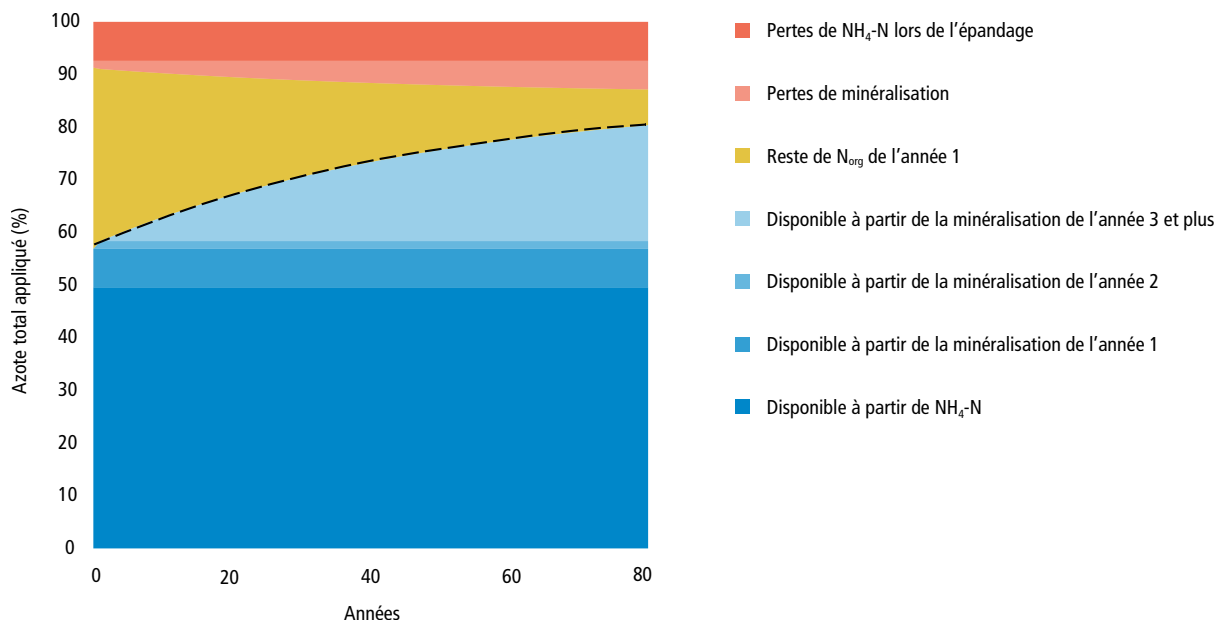
Les pertes par lessivage et émanation gazeuse sont prises en compte car le modèle suppose qu'en moyenne 15 % de l'azote anorganique libéré par la minéralisation se perd. Le modèle prend également en compte des pertes potentielles d'ammoniac ( $NH_3$ ) liées à l'épandage (volatilisation), estimant les pertes moyennes à 13 % de  $NH_4-N$  (Häni *et al.* 2016) en cas d'épandage à l'aide de tuyaux souples.

Afin d'avoir une synthèse représentative des digestats disponibles en Suisse, les résultats d'analyse de la base de données centrale de CVIS de 2013 à 2016 ont été évalués. Cette base de données recueille les données d'analyse des engrais de recyclage pour les autorités d'exécution cantonales. Les données sélectionnées représentent l'échelle des teneurs en azote de digestat agricole liquide, appelé ici lisier fermenté, et correspondent au percentile supérieur (90 %), à la médiane ainsi qu'au percentile inférieur (10 %). La part de  $NH_4-N$  dans l'azote total était de 72 %, 57 % et 39 % pendant la période étudiée (tabl. 2).

## Résultats

### Simulation de la disponibilité de l'azote

La simulation a permis d'estimer les effets dynamiques de différentes variantes de lisier fermenté et différents taux de minéralisation sur la disponibilité et les potentiels de pertes de l'azote. La figure 1 représente l'évolution dans le temps du lisier fermenté ayant un pourcentage de  $NH_4-N$  de 57 % pour le scénario A (minéralisation moyenne). Avec ce calcul, il se produit une perte constante de 13 % de  $NH_4-N$  (soit 7 % de l'azote



**Figure 1** | Calcul modélisé pour un lisier fermenté présentant 57 % de  $\text{NH}_4\text{-N}$  pour le scénario A (taux moyen de minéralisation de  $\text{N}_{\text{org}}$ ).

La ligne en pointillés noirs indique la variation de l'efficacité de l'utilisation de l'azote sur une période de 80 ans en cas d'application répétée de lisier fermenté par rapport à la quantité d'azote contenu dans l'engrais apporté en une année.

total) lors de l'épandage. Le reste de  $\text{NH}_4\text{-N}$  (50 % de l'azote total) est directement disponible pour les plantes l'année de l'épandage. En plus, la minéralisation l'année de l'épandage (année 1) rend disponible 20 % de l'azote organique, ce qui équivaut à environ 7 % de l'azote total. La première année qui suit l'épandage (année 2), 5 % supplémentaire de  $\text{N}_{\text{org}}$  restant de l'année 1 sont minéralisés. A partir de la 3<sup>e</sup> année, la minéralisation des restes de  $\text{N}_{\text{org}}$  issus de l'année 1 ne contribuent plus que de manière marginale (2 %) à la disponibilité totale de l'azote (0,6 % de l'azote total). A la suite d'un épandage répété, les réserves d'azote organique minéralisable augmentent chaque année, ce qui se traduit par un potentiel de minéralisation élevé sur de longues périodes. La quantité de  $\text{N}_{\text{org}}$  restant de l'année d'épandage diminue progressivement du fait de la minéralisation annuelle. Tandis qu'à peine 23 % sont encore présents au bout de 20 ans, avec cette simulation, il reste encore, après 80 ans, 7 % de  $\text{N}_{\text{org}}$  issu de la première année d'épandage dans le sol, susceptible d'être minéralisé. Un équilibre stable, c'est-à-dire des taux constants de libération d'azote issu de la minéralisation, n'est obtenu que lorsque le  $\text{N}_{\text{org}}$  de la première année a atteint un niveau minimal.

Le tableau 2 représente les disponibilités d'azote calculées pour une période de 20, 40, 60 et 80 ans pour les trois variantes de lisier fermenté et les deux scénarios de décomposition de  $\text{N}_{\text{org}}$ . La disponibilité de l'azote, notamment au début de l'épandage, dépend largement du pourcentage de  $\text{NH}_4\text{-N}$ . Ainsi, dans les lisiers fermentés

qui présentent un faible pourcentage de  $\text{NH}_4\text{-N}$ , au bout de 20 ans, seuls 47–58 % de l'azote total ne devient effectivement disponible pour les plantes, tandis que dans les lisiers fermentés qui présentent un pourcentage élevé de  $\text{NH}_4\text{-N}$ , ce pourcentage est de 68–74 %. Etant donné la minéralisation systématique des restes de  $\text{N}_{\text{org}}$  et des nouveaux apports de  $\text{N}_{\text{org}}$  chaque année, ces différences s'atténuent toutefois au fil du temps. Les deux scénarios avec leurs taux de minéralisation différents exercent également une influence importante sur la disponibilité de N. Dans les lisiers fermentés avec de faibles pourcentages de  $\text{NH}_4\text{-N}$ , le pourcentage relatif de  $\text{N}_{\text{org}}$  est naturellement plus élevé, d'où une plus grande quantité de  $\text{N}_{\text{org}}$  susceptible d'être minéralisé.

#### Disponibilité de l'azote escomptée dans la pratique

Une application de lisier fermenté de  $150 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$  doit servir à illustrer la pertinence de la minéralisation de  $\text{N}_{\text{org}}$  décalée dans le temps: le lisier présente 57 % de  $\text{NH}_4\text{-N}$ , c'est-à-dire que 86 kg de N sont épandus sous forme de  $\text{NH}_4\text{-N}$  et 64 kg de N sous forme de  $\text{N}_{\text{org}}$ . Lors de l'épandage, 13 % de  $\text{NH}_4\text{-N}$  (soit 11 kg de N) se perd sous forme de  $\text{NH}_3$ . Il reste donc 139 kg de N sur la parcelle. La première année, dans l'hypothèse de conditions optimales, 62 % (87 kg) de cette quantité peuvent être utilisés. L'efficacité de l'utilisation de l'azote (NAE) rapportée aux 150 kg de N épandus est donc de 57 %. Si la même quantité de lisier fermenté est appliquée chaque année, les réserves de  $\text{N}_{\text{org}}$  dans le sol augmentent. Une petite partie de ces réserves toujours plus importantes

est minéralisée chaque année (20 % l'année de l'épandage, 5 % l'année suivante et 2 % les années ultérieures [scénario A]). La NAE augmente donc pour atteindre 67 % au bout de 20 ans et 73 % au bout de 40 ans. Après 80 ans, 80 % (120 kg) de la quantité d'azote épandue (150 kg) sont effectivement utilisés.

Cette simulation suppose les meilleures pratiques agricoles, c'est-à-dire une couverture végétale la plus complète possible avec des cultures dérobées, l'épandage de lisier fermenté en plusieurs apports à des dates optimales et à l'aide de tuyaux souples. Le modèle prend comme hypothèse un lessivage de 15 % de l'azote minéralisé à partir des réserves de  $N_{org}$ . Si les pertes doublent et atteignent 30 %, la NAE ne varie que légèrement dans notre exemple (scénario A): 64 % au bout de 20 ans, 69 % au bout de 40 ans et 75 % au bout de 80 ans. La multiplication par deux des pertes de  $NH_3-N$  lors de l'épandage pèse plus lourd dans la balance, rabaisant la NAE à 59 %, 66 % et 73 % après 20, 40 et 80 ans.

#### Estimation de l'efficacité de l'utilisation de l'azote (NAE) d'une qualité spécifique de lisier fermenté

Une approche pragmatique déduisant la NAE du digestat liquide de deux paramètres analytiques simples à déterminer, repose sur le calcul suivant:

$$NAE (\%) = \frac{(NH_4 - N * 0.87) + (N_{org} * \text{Facteur})}{N_{tot}} * 100$$

NAE = Efficacité de l'utilisation de N en % de la quantité de N appliquée en une année

$NH_4-N$  = Concentration de  $NH_4-N$  (N soluble) en g  $kg^{-1}$  de matière sèche

$N_{org}$  = Concentration de  $N_{org}$  ( $N_{org} = N_{tot} - NH_4-N$ ) en g  $kg^{-1}$  de matière sèche

**Facteur** = Facteur d'utilisation de  $N_{org}$  après application répétée de lisier au bout de x années

$N_{tot}$  = Azote total du lisier en g  $kg^{-1}$  de matière sèche

On part ici du principe que 13 % de  $NH_4-N$  se perd lors de l'épandage (multiplication de  $NH_4-N$  par le facteur 0,87). L'utilisation de  $N_{org}$  dépend du déroulement de

**Tableau 2 |** Disponibilité de l'azote, somme de  $NH_4-N$  et  $N_{org}$  minéralisé sur une période de 80 ans pour trois qualités de lisier fermenté typiques en Suisse et deux scénarios avec des taux de minéralisation de  $N_{org}$  différents (tableau 1).

	Disponibilité de N en % de N total			
	20 ans	40 ans	60 ans	80 ans
<b>39 % <math>NH_4-N</math></b>				
Scénario A	58	67	74	78
Scénario B	47	54	60	64
<b>57 % <math>NH_4-N</math></b>				
Scénario A	67	73	78	80
Scénario B	59	64	68	71
<b>72 % <math>NH_4-N</math></b>				
Scénario A	74	78	81	83
Scénario B	68	72	74	77

la minéralisation (p. ex. scénario A ou scénario B), des pertes effectives de N minéralisé à partir de  $N_{org}$  et de la période considérée. Au bout de 80 ans, aucun équilibre n'était atteint dans le modèle utilisé entre l'apport et la minéralisation de  $N_{org}$  dans aucun des scénarios.

Les facteurs d'utilisation de  $N_{org}$  présentés dans le tableau 3 se réfèrent aux deux scénarios de minéralisation de  $N_{org}$  (A et B) et aux 15 % et 30 % de pertes de N provenant de la minéralisation de  $N_{org}$ . Elles ont été déduites du modèle décrit ci-dessus. Après 80 ans, les taux d'utilisation de  $N_{org}$  atteints étaient de 43 % minimum et de 72 % maximum.

## Conclusions

Les résultats des simulations de cette étude montrent clairement que la NAE du lisier fermenté peut être estimée de manière réaliste sur une très longue période de plus de 80 ans, si l'on se base sur un épandage annuel du lisier, courant dans la pratique. Compte tenu des pertes d'azote lors de l'épandage, un lisier fermenté suisse typique d'origine agricole atteint une NAE d'environ 80 % dans des conditions de minéralisation de  $N_{org}$  optimales et 70 % avec une minéralisation plus lente ou des pertes plus élevées de  $N_{org}$  minéralisé. ■

**Tableau 3 |** Facteur d'utilisation de  $N_{org}$  dans le lisier fermenté sur la base de différentes hypothèses et durées choisies dans les simulations. Scénarios A et B: voir tableau 1; pourcentage de pertes de N provenant de  $N_{org}$  minéralisé de 15 % et 30 %.

Années	Scénario A (moyen)			Scénario B (lent)		
	20	40	80	20	40	80
Pertes 15 %	0,40	0,55	0,72	0,22	0,34	0,53
Pertes 30 %	0,33	0,45	0,59	0,18	0,28	0,43

**Riassunto**

**Efficienza dello sfruttamento dell'azoto nei liquami di biogas**

La fermentazione dello stallatico e di altri materiali organici è diventata sempre più importante negli ultimi anni. Il processo di fermentazione produce biogas (metano) e aumenta la proporzione di composti azotati facilmente reperibili nel liquame di fermentazione. Finora sono state effettuate poche ricerche sul valore come fertilizzante del liquame di fermentazione applicate alle condizioni svizzere, in particolare per quanto riguarda la disponibilità di azoto nel lungo termine. Sulla base di un modello numerico, abbiamo valutato l'efficienza dello sfruttamento dell'azoto del liquame di fermentazione comunemente presente in Svizzera. A seconda della qualità del liquame di fermentazione, l'efficienza dello sfruttamento dell'azoto varia tra il 64 e l'83 % nell'arco di 80 anni. La mineralizzazione dell'azoto organico negli anni successivi contribuisce in modo sostanziale all'elevata efficienza di sfruttamento dell'azoto in applicazioni ripetute.

**Summary**

**Nitrogen-use efficiency of biogas digestate**

The digestion of farmyard manure and other organic materials has become increasingly important in recent years. The digestion process produces biogas (methane), and increases the proportion of easily available nitrogen compounds in the digestate produced. To date, there has been little research on the fertiliser value of digested farmyard manure that is of relevance to Swiss conditions, especially with regard to long-term nitrogen availability. We used a numerical model to estimate the nitrogen-use efficiency (NUE) of digestates common in Switzerland. Depending on the duration of the model and the quality of the digestate, NUEs of 64 % to 83 % are achieved within 80 years. The mineralisation of organic nitrogen in subsequent years of application contributes substantially to the high NUE resulting from repeated application.

**Key words:** digestate, nitrogen use efficiency, biogas, modelling.

#### Bibliographie

- Alburquerque J. A., de la Fuente C. & Bernal M. P., 2012. Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **160**, 15–22.
- Fouda S., von Tucher S., Lichti F. & Schmidhalter U., 2013. Nitrogen availability of various biogas residues applied to ryegrass. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **176** (4), 572–584.
- Gunnarsson A., Bengtsson F. & Caspersen S., 2010. Use efficiency of nitrogen from biodigested plant material by ryegrass. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **173** (1), 113–119.
- Gutser R., Ebertseder T., Weber A., Schraml M. & Schmidhalter U., 2005. Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **168** (4), 439–446.
- Häni C., Sintermann J., Kupper T., Jocher M. & Neftel A., 2016. Ammonia emission after slurry application to grassland in Switzerland. *Atmospheric Environment* **125**, 92–99.
- Klausner S. D., Kanneganti V. R. & Bouldin D. R., 1994. An approach for estimating a decay series for organic nitrogen in animal manure. *Agronomy Journal* **86** (5), 897–903.
- Mandaliev P. & Schleiss K., 2016. Kompostier- und Vergärungsanlagen. Erhebung in der Schweiz und Liechtenstein. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.
- Möller K. & Müller T., 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences* **12** (3), 242–257.
- Nkoa R., 2014. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agronomy for Sustainable Development* **34** (2), 473–492.
- Richner W., Flisch R., Mayer J., Schlegel P., Zähler M. & Menzi H., 2017. Propriétés et utilisation des engrais. Dans: Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2017) (Ed. S. Sinaj et W. Richner). *Recherche Agronomique Suisse. Publication spéciale* **8** (6), 4/1–4/23.
- Rigby H. & Smith S., 2013. Nitrogen availability and indirect measurements of greenhouse gas emissions from aerobic and anaerobic biowaste digestates applied to agricultural soils. *Waste Management* **33** (12), 2641–2652.
- Schröder J., Uenk D. & Hilhorst G., 2007. Long-term nitrogen fertilizer replacement value of cattle manures applied to cut grassland. *Plant and Soil* **299** (1-2), 83–99.
- Webb J., Sørensen P., Velthof G., Amon B., Pinto M., Rodhe L., Salomon E., Hutchings N., Burczyk P. & Reid J., 2013. An assessment of the variation of manure nitrogen efficiency throughout Europe and an appraisal of means to increase manure-N efficiency. *Advances in Agronomy* **119**, 371–442.