

Série Émissions provenant des animaux

Effet des techniques d'épandage du lisier sur l'azote et le rendement des prairies

Olivier Huguenin-Elie¹, Daniel Nyfeler², Christof Ammann¹, Annett Latsch³ et Walter Richner¹

¹Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

²Centre de formation professionnelle d'Arenenberg, 8268 Salenstein, Suisse

³Agroscope, 8356 Ettenhausen, Suisse

Renseignements: Olivier Huguenin-Elie, e-mail: olivier.huguenin@agroscope.admin.ch



L'essai sur l'influence de douze procédés différents d'épandage de lisier sur le rendement des prairies (site de Tänikon) a été réalisé avec une citerne à lisier équipée d'un déflecteur, d'un distributeur à tuyaux souples et d'un distributeur à socs. (Photo: Annett Latsch, Agroscope)

Introduction

L'agriculture est responsable d'environ 90 % des émissions totales d'ammoniac (NH_3) en Suisse. En outre, les émissions de NH_3 dues à l'agriculture sont nettement supérieures à «l'objectif environnemental pour l'agriculture» (OFEV et OFAG 2016) qui a été fixé. Les émissions de NH_3 dues à l'agriculture proviennent en grande partie de la production animale, l'épandage des engrais de ferme étant la principale voie de perte de NH_3 (46 % des émissions de NH_3 issues de l'élevage) (Kupper et al.

2015). D'autre part, le recyclage des nutriments contenus dans les engrais de ferme est essentiel pour une agriculture durable. C'est pourquoi, les mesures qui visent à réduire les émissions de NH_3 sont encouragées, notamment l'épandage d'engrais organiques liquides au moyen de procédés à faibles émissions. Parmi les mesures possibles sur le plan technique et de la réalisation dans ce domaine, on compte l'épandage en bandes avec des distributeurs à tuyaux souples et – moins souvent

en Suisse – des distributeurs à socs et des procédés avec injection de lisier dans le sol.

Une base de données nationales et étrangères relativement large montre qu'il est possible de réduire les émissions de NH_3 en adaptant la technique d'épandage du lisier. Mais il y a moins d'études portant sur l'efficacité pour la production végétale de l'azote (N) supplémentaire qui pénètre dans le sol grâce à l'épandage à émission réduite. C'est pourquoi les avantages et les inconvénients agronomiques potentiels liés à l'utilisation de techniques d'épandage en bandes font encore actuellement l'objet de controverses.

Cette publication synthétise les connaissances relatives à l'ampleur de la réduction des émissions de NH_3 grâce aux techniques d'épandage de lisier à faibles émissions, à l'effet de cette baisse des émissions d'azote sur la production végétale et à la perte de cet azote par d'autres voies. Pour ce faire, les résultats des essais d'épandage suisses et la littérature scientifique ont été analysés. Ce travail est principalement axé sur la production fourragère, car en Suisse, la majeure partie du lisier est épandu sur les herbages.

Épandage en bandes: réduction des émissions de NH_3

Facteur influençant l'émission de NH_3

La «volatilisation» du NH_3 contenu dans le lisier, c'est-à-dire le passage de la phase aqueuse à la phase gazeuse volatile, se produit de préférence lorsque le lisier a une grande surface de contact avec l'air extérieur, surface depuis laquelle le NH_3 émis est rapidement transporté plus loin par les mouvements d'air. C'est particulièrement le cas avec un épandage sur toute la surface, où le lisier liquide est réparti en densité relativement faible sur toute la surface de la parcelle et, le cas échéant, sur la surface des plantes. Les techniques d'épandage visant à réduire les émissions consistent donc généralement à réduire la surface et/ou le temps d'exposition (UNECE 2014).

La mesure la plus simple et la plus efficace pour réduire les émissions de NH_3 est l'enfouissement immédiat du lisier épandu par labour ou autre travail du sol. Toutefois, cela n'est possible qu'en grandes cultures sur des sols encore nus. Dans la production fourragère suisse, d'autres techniques sont donc utilisées qui réduisent la zone d'exposition à des bandes plus ou moins étroites. Du fait des programmes d'encouragement ciblés de la Confédération (projets d'utilisation durable des ressources ou contributions à l'efficacité des ressources), le distributeur à tuyaux souples est notamment très répandu. Les distributeurs à socs et les injecteurs à disques

Résumé

L'épandage de lisier effectué à l'aide d'un distributeur à tuyaux souples ou d'un distributeur à tuyaux semi-rigides avec socs, comparé à l'utilisation d'un déflecteur, permet d'augmenter de 2 à 3 kg par hectare la quantité d'azote qui pénètre dans le sol à chaque épandage pour une quantité d'épandage habituelle. Ceci, parce que la quantité d'ammoniac qui s'échappe baisse de 30 à 50 %. C'est ce que montrent une série de mesures effectuées en Suisse à différentes périodes de l'année ainsi qu'une synthèse bibliographique. Dans le cadre d'un essai sur le terrain de deux ans et demi, aucune différence de rendement n'a été constatée sur le premier site entre le distributeur à tuyaux souples et le déflecteur. La dilution du lisier, en revanche, a conduit à une augmentation du rendement. Sur le deuxième site de cet essai, le rendement total avec le distributeur à tuyaux souples avait tendance à être plus élevé qu'avec le déflecteur ($p = 0,063$). L'analyse combinée des essais d'épandage réalisés en Suisse et à l'étranger montre que, par rapport au déflecteur, le rendement des herbages est en moyenne amélioré de 2,5 % avec le distributeur à tuyaux souples et de 5,8 % avec le distributeur à socs. Les connaissances scientifiques sont encore insuffisantes en ce qui concerne les voies de perte de l'azote qui pénètre en plus dans le sol grâce aux technologies de réduction des émissions d'ammoniac. En l'état actuel des connaissances, les pertes par lessivage et dénitrification n'augmentent pas au point qu'il faille craindre une baisse de l'effet de l'azote sur le rendement. Aucune étude n'a encore été faite sur la façon dont la technique d'épandage influence la dynamique de l'azote organique dans le sol.

sont nettement moins courants. Ces derniers distribuent le lisier directement sur le sol ou même dans le sol, ce qui réduit encore davantage la surface d'exposition effective. Dans la pratique, cependant, la technique des injecteurs à disques atteint rapidement ses limites, notamment dans des sols lourds ou pierreux, ainsi que sur des pentes plus raides ou dans d'autres conditions topographiques difficiles.

Tableau 1 | Réduction des émissions d'ammoniac grâce à l'utilisation de différentes techniques d'épandage visant à réduire les émissions (par rapport à la méthode de référence du déflecteur) en production fourragère et en grandes cultures: résultats d'une synthèse bibliographique internationale (Webb *et al.* 2010) ainsi que d'une série d'essai réalisée en Suisse (Häni *et al.* 2016).

Technique d'épandage	International (Webb <i>et al.</i> 2010)			Suisse (Häni <i>et al.</i> 2016)		
	n ^a	Réduction (moyenne)	Réduction (intervalle de variation) ^c	n ^a	Réduction (moyenne)	Réduction (intervalle de variation) ^d
Production fourragère (herbages)						
Distributeur à tuyaux souples	45	35 %	0–74 %	7	51 %	22–68 %
Distributeur à socs	37	64 %	57–70 %	5	53 %	36–71 %
Injecteur à disques	56	80 %	60–99 %	1	76 %	–
Grandes cultures						
Distributeur à tuyaux souples	16	37 %	0–75 %			
Injecteur à disques	9	70 %	23–94 %			
Enfouissement immédiat	35	68–94 % ^b	60–99 %			

^a Nombre d'essais.

^b Intervalle de variation des moyennes pour différentes techniques d'épandage et d'enfouissement.

^c Intervalle de variation des moyennes des différentes publications.

^d Intervalle de variation des différents essais.

En plus de la technique d'épandage, les conditions environnementales (type de sol et humidité, température, vent) ainsi que la composition du lisier (en particulier la teneur en matières solides) influencent également la vitesse d'infiltration dans le sol ou directement le taux de volatilisation et donc la perte absolue de NH₃ (Søgaard *et al.* 2002; Hafner *et al.* 2018). Les pertes de NH₃ peuvent être considérablement réduites en diluant le lisier et en optimisant le moment de l'épandage (temps frais, humide, sans vent, sol ni saturé en eau ni complètement desséché) (Frick et Menzi 1997). En raison de l'évolution rapide des émissions, les premières heures après l'épandage du lisier sont décisives. Pour cette raison, l'effet des techniques d'épandage visant à réduire les émissions est généralement étudié dans le cadre d'études de terrain par comparaison directe avec la méthode de référence des déflecteurs, c'est-à-dire avec le même lisier et les mêmes conditions de sol, de végétation et de météo (Misselbrook *et al.* 2002; Häni *et al.* 2016).

Connaissances relatives à l'ampleur de la réduction

Sur la base d'une synthèse bibliographique d'études expérimentales européennes, Webb *et al.* (2010) ont déterminé des moyennes pour la réduction des émissions de NH₃ avec différentes techniques d'épandage par rapport au déflecteur. Les résultats sont présentés dans le tableau 1. Ils montrent une réduction nette des émissions avec, dans l'ordre d'efficacité, le distributeur à tuyaux souples,

le distributeur à socs et l'injecteur à disques. L'incorporation immédiate du lisier dans les terres cultivées a permis de réduire davantage les émissions. Les moyennes obtenues par Webb *et al.* (2010) correspondent approximativement aux valeurs indicatives de la CEE-ONU (UNECE 2014) pour la réduction des émissions de NH₃: 30–35 % pour le distributeur à tuyaux souples, 30–60 % pour le distributeur à socs et 70 % pour l'injecteur à disques. Des valeurs de réduction similaires sont utilisées pour le modèle suisse d'émissions NH₃ Agrammon, dont certaines sont basées sur les prescriptions de la CEE-ONU: distributeur à tuyaux souples 30 %, distributeurs à socs 50 % et injecteurs à disques 70 % (Kupper et Menzi 2013). De 2011 à 2014, dans le cadre d'un projet commun, Agroscope et la HAFL ont étudié l'effet des techniques d'épandage visant à réduire les émissions lors de six campagnes de mesures réalisées à différentes saisons (Häni *et al.* 2016) afin de vérifier ces pourcentages de réduction pour la production fourragère en Suisse. Les résultats globaux de cette étude sont présentés dans le tableau 1. Ils montrent également une réduction significative des émissions avec le distributeur à tuyaux souples, le distributeur à socs et l'injection (par ordre croissant). En ce qui concerne la technique du distributeur à tuyaux souples, la réduction moyenne des émissions relevées par Häni *et al.* (2016) est environ 50 % plus élevée que pour Webb *et al.* (2010), mais les intervalles de variation se recoupent complètement. Les deux études montrent des valeurs

moyennes très similaires pour le distributeur à socs et la technique d'injection. La variabilité des résultats d'essais, indiquée dans le tableau 1, montrent que, quelle que soit la technique d'épandage, l'effet de réduction peut dans certains cas s'écarter considérablement de la valeur moyenne. Ces écarts sont probablement dus essentiellement à des différences dans la teneur en matière sèche (MS) du lisier (UNECE 2014; Häni *et al.* 2016), l'humidité du sol, les conditions météorologiques et la hauteur des cultures au moment de l'épandage. Ces propriétés, qui influencent l'efficacité des techniques de réduction des émissions, varient notamment au cours de l'année. Häni *et al.* (2016) ont réparti les essais sur l'ensemble de la période d'exploitation (de mars à novembre), de sorte que les valeurs moyennes obtenues peuvent être interprétées comme des valeurs moyennes annuelles pour la réduction des émissions grâce à l'emploi du distributeur à tuyaux souples et du distributeur à socs.

Influence des techniques d'épandage sur le rendement

Augmentation de la fumure azotée

Dans l'étude de Häni *et al.* (2016), les pertes moyennes de NH_3 avec le déflecteur utilisé comme technique de référence représentaient 20 % de l'azote soluble épandu. Cela correspond, pour une quantité d'épandage habituelle, à une perte absolue d'environ 5–6 kg N/ha par épandage de lisier. Si l'utilisation du distributeur à

tuyaux souples ou du distributeur à socs permet de réduire ces émissions de 30 à 50 %, cela représente 2 à 3 kg N/ha qui pénètrent en plus dans le sol. Dans les prairies intensives (cinq à six coupes, fertilisation de 1,1 à 1,3 kg de N par décitonne [dt] de MS récoltée), on peut s'attendre à un effet fertilisant de 20 à 30 kg de MS par kg de N disponible (N_{disp}) supplémentaire pour les cultures de graminées pures et de 5 à 15 kg pour les herbages contenant des légumineuses (Whitehead 2000). Moyennant une économie de 2 à 3 kg N/ha par épandage de lisier, le rendement annuel supplémentaire devrait ainsi être de 0,1 à 0,9 dt de MS/ha par coupe. Avec cinq coupes, le rendement annuel supplémentaire devrait donc être de 0,5–4,5 dt de MS/ha, ce qui correspond à un effet relatif de seulement 0,4–4,1 % pour un rendement annuel de 110–130 dt de MS/ha.

Essais de terrain de 2012 à 2014 en Thurgovie

Le projet de recherche le plus complet concernant l'effet des techniques d'épandage visant à réduire les émissions sur le rendement des herbages suisses a été réalisé entre l'été 2012 et la fin 2014 en Thurgovie, sur les sites de Tänikon et d'Arenenberg (Latsch *et al.* 2015). Les facteurs suivants ont été étudiés: 1. technique d'épandage (déflecteur / distributeur à tuyaux souples / de plus, distributeur à socs sur le site de Tänikon); 2. Calendrier d'épandage: (précoce = immédiatement après la récolte précédente / tardif = décalé de 7 à 10 jours);

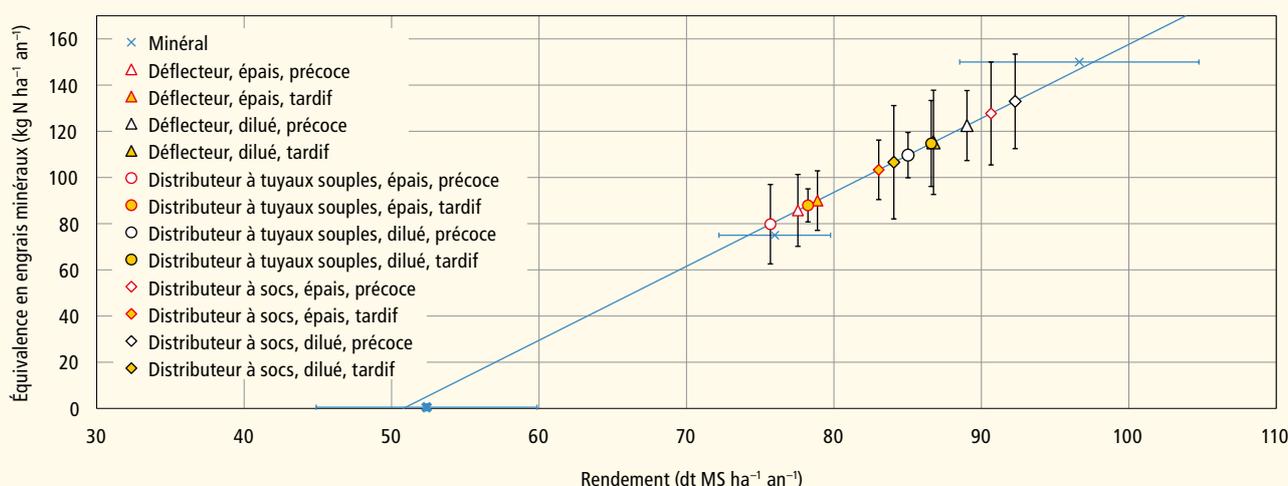


Figure 1 | Équivalence en engrais minéraux des épandages de lisier pour les trois techniques d'épandage utilisées (déflecteur, distributeur à tuyaux souples et distributeur à socs) pour les peuplements de graminées purs sur le site de Tänikon. Les rendements annuels indiqués sont les moyennes de 2013–2014 pour chaque procédé (moyenne des trois répétitions plus/moins l'écart-type). La courbe de régression a été établie sur la base des quatre niveaux de fertilisation des procédés à fertilisation uniquement minérale; le niveau de fertilisation le plus élevé (300 kg N/ha/an) est pris en compte pour la régression, mais n'apparaît pas dans le graphique. L'intersection de cette courbe avec le rendement moyen de chaque technique d'épandage donne son équivalence en engrais minéraux.

3. Dilution du lisier (épais = teneur moyenne en MS 4,1 % / dilué = teneur moyenne en MS 2,4 %; seulement sur le site de Tännikon); 4. Peuplement végétal (peuplement mixte graminées-trèfles / peuplement de graminées pur). Tous les procédés ont été répétés trois fois. Des peuplements de graminées purs ont été inclus dans l'essai pour exclure les effets de compensation dus aux légumineuses (fixation symbiotique de l'azote) en cas de variation de la disponibilité de l'azote dans le sol. Des parcelles recevant une fertilisation exclusivement minérale ont également été mises en place afin de pouvoir estimer l'effet de l'azote des procédés d'épandage du lisier (fig. 1). Par kg supplémentaire de fertilisation azotée minérale, les rendements des peuplements de graminées purs ont augmenté de 30 kg de MS à Tännikon et de 37 kg de MS sur le site d'Arenenberg. Cela signifie que la fourniture en azote provenant du sol était limitante pour le développement du rendement et que les sites offraient donc les conditions préalables nécessaires pour pouvoir mettre en évidence des différences dans l'effet de l'azote des différents procédés d'épandage du lisier. Un résultat clef du projet a été que l'effet des techniques d'épandage sur le rendement ne présentait des différences significatives que pour un seul des deux sites et pour une seule année (tabl. 2): à Tännikon, avec du lisier épais, le distributeur à socs a permis une augmentation significative du rendement en 2014 par rapport au

distributeur à tuyaux souples. Le déflecteur se situait entre les deux et ne différait pas significativement des deux autres procédés. Avec du lisier dilué, aucune différence significative n'a été constatée entre les techniques d'épandage. Le rendement total sur toute la période d'essai était presque identique pour le déflecteur et le distributeur à tuyaux souples. De manière correspondante, l'équivalence en engrais minéral des épandages de lisier était similaire avec les trois techniques d'épandage, avec une tendance à être plus élevée avec le distributeur à socs (fig. 1). D'ailleurs, la dilution du lisier – hormis l'augmentation attendue du rendement due à la présence de trèfles dans les peuplements mixtes par rapport aux graminées purs (Nyfeler *et al.* 2009) – a permis l'augmentation de rendement la plus constante et la plus importante (+ 10,1 %) en cas d'épandage avec un déflecteur ou un distributeur à tuyaux souples (tabl. 2; fig. 1). Sur le site d'Arenenberg, la différence de rendement total de 2012 à 2014 n'était que très légèrement en dessous du seuil de significativité statistique ($p = 0,063$), avec une tendance vers un rendement plus élevé avec le distributeur à tuyaux souples par rapport au déflecteur (+6,8 %; tabl. 2).

Pour le calendrier d'épandage, les résultats indiquent que l'effet sur le rendement est nul ou très faible: des différences significatives n'ont été observées que sur un seul site et au cours d'une seule année. Lors de l'utilisa-

Tableau 2 | Résultats de l'analyse statistique de l'essai effectué dans le canton de Thurgovie pour le rendement en fourrage des deux sites, pour les différentes années d'essai ainsi que pour la somme sur toute la période d'essai. Les moyennes des principaux effets sont indiquées pour la somme des rendements 2012–2014. En 2012, l'essai a débuté après la troisième coupe.

	2012	2013	2014		Somme 2012–2014			ETM
					Rendement total (dt MS/ha)			
Tännikon								
Technique d'épandage	ns	ns	*	.	Défl: 205	DTS: 203	DS: 213	3,2
Calendrier d'épandage	*	ns	ns	ns	Précoce: 209	Tardif: 205		2,6
Dilution du lisier	**	ns	**	**	Epais: 201	Dilué: 213		2,6
Peuplement végétal	***	***	***	***	Graminées: 189	Mélange: 227		2,6
Technique d'épandage × dilution ¹	ns	ns	**	*				
Arenenberg								
Technique d'épandage	ns	ns	ns	.	Défl: 237	DTS: 254		5,7
Calendrier d'épandage	ns	ns	ns	ns	Précoce: 244	Tardif: 246		5,7
Peuplement végétal	***	***	.	***	Graminées: 225	Mélange: 268		5,7

$p \leq 0,001$ (***), $p \leq 0,01$ (**), $p \leq 0,05$ (*), $p \leq 0,1$ (.), ns = non significatif.

Défl.: déflecteur; DTS: distributeur à tuyaux souples; DS: distributeur à socs; Graminées: peuplements de graminées pures; Mélange: peuplements mixtes graminées-trèfles; MS: matière sèche; ETM: erreur-type de la moyenne.

¹ Toutes les autres interactions n'étaient jamais significatives.

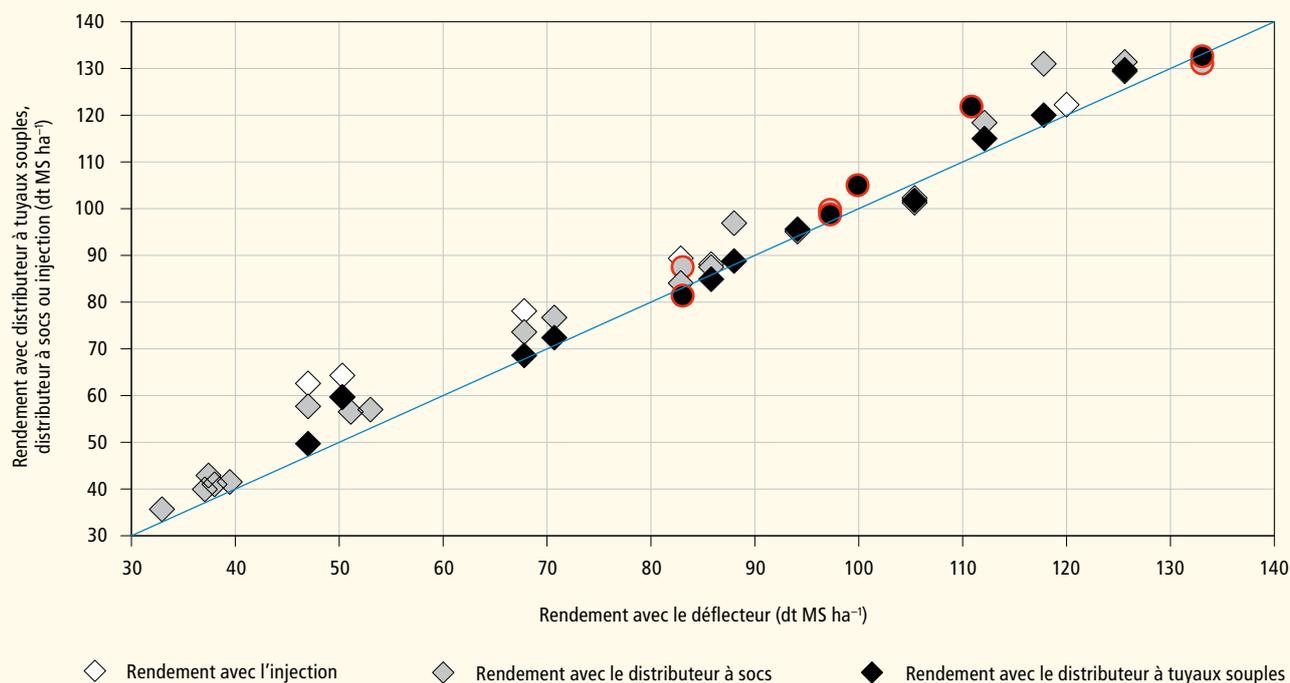


Figure 2 | Rendements des herbages suivant l'épandage de lisier avec distributeur à tuyaux souples, distributeur à socs ou injection par rapport à l'épandage de lisier avec déflecteur (dt MS/ha). Données provenant d'essais suisses (Aeby *et al.* 2017; Latsch *et al.* 2015; points bordés de rouge) et européens (Berendonk 2011; Hoekstra *et al.* 2010; Kayser *et al.* 2015; Kiefer *et al.* 2004; Kunz 2011; Lalor *et al.* 2011; Lorenz et Steffens 1996; Neff 2011). Concept de la présentation tiré d'Aeby *et al.* (2017).

tion du distributeur à tuyaux souples et du distributeur à socs, il est souvent recommandé de n'épandre le lisier que lorsque la végétation a atteint une certaine hauteur, afin d'éviter une souillure éventuelle du fourrage. En effet, en poussant, les plantes pourraient soulever les bandes de lisier déposées sur leurs chaumes après dessèchement du lisier. Les résultats de l'essai concernant les effets de la technique d'épandage sur la qualité de l'ensilage sont décrits dans Wyss *et al.* (2017).

La fumure appliquée a pu être convertie en biomasse dans un ordre de grandeur similaire pour tous les procédés utilisés. Il n'y a donc pas eu d'augmentation de la teneur en azote des plantes, et l'effet de la technique du lisier sur le rendement en matière azotée était similaire à l'effet sur le rendement en biomasse.

Synthèse bibliographique

Un projet de recherche visant à comparer les méthodes d'épandage avec déflecteur, distributeur à tuyaux souples et distributeur à socs a également été conduit à Grangeneuve (FR; Aeby *et al.* 2017). Bien que les procédés d'épandage visant à réduire les émissions aient conduit à une nette réduction des émissions de NH₃ par rapport au déflecteur (selon des mesures d'émissions ré-

alisées simultanément sur des parcelles voisines; cf. Häni *et al.* 2016), aucun effet significatif sur le rendement n'a été observé dans cet essai mené sur des peuplements mixtes graminées-trèfles.

Au cours des 25 dernières années, plusieurs études sur l'effet des diverses techniques d'épandage du lisier sur le rendement des herbages ont été réalisées en Europe. Pour l'analyse de synthèse présentée en figure 2, les données provenant des essais suisses (Aeby *et al.* 2017; Latsch *et al.* 2015) et européens (Berendonk 2011; Hoekstra *et al.* 2010; Kayser *et al.* 2015; Kiefer *et al.* 2004; Kunz 2011; Lalor *et al.* 2011; Lorenz et Steffens 1996; Neff 2011) menés selon des principes scientifiques ont été mobilisés. Dans certains essais, le lisier n'a pas été épandu pendant toute la saison avec des techniques différentes. Dans ces cas, l'évaluation n'a pas pris en compte le rendement annuel, mais seulement les rendements des coupes qui avaient été traitées auparavant avec différentes techniques d'épandage du lisier. Pour la mise en valeur des données, les résultats ont été utilisés séparément pour chaque site et chaque type de peuplement végétal.

Tous sites et peuplements confondus, l'épandage de lisier à l'aide d'un distributeur à tuyaux souples a en moyenne permis d'obtenir un rendement supplémen-

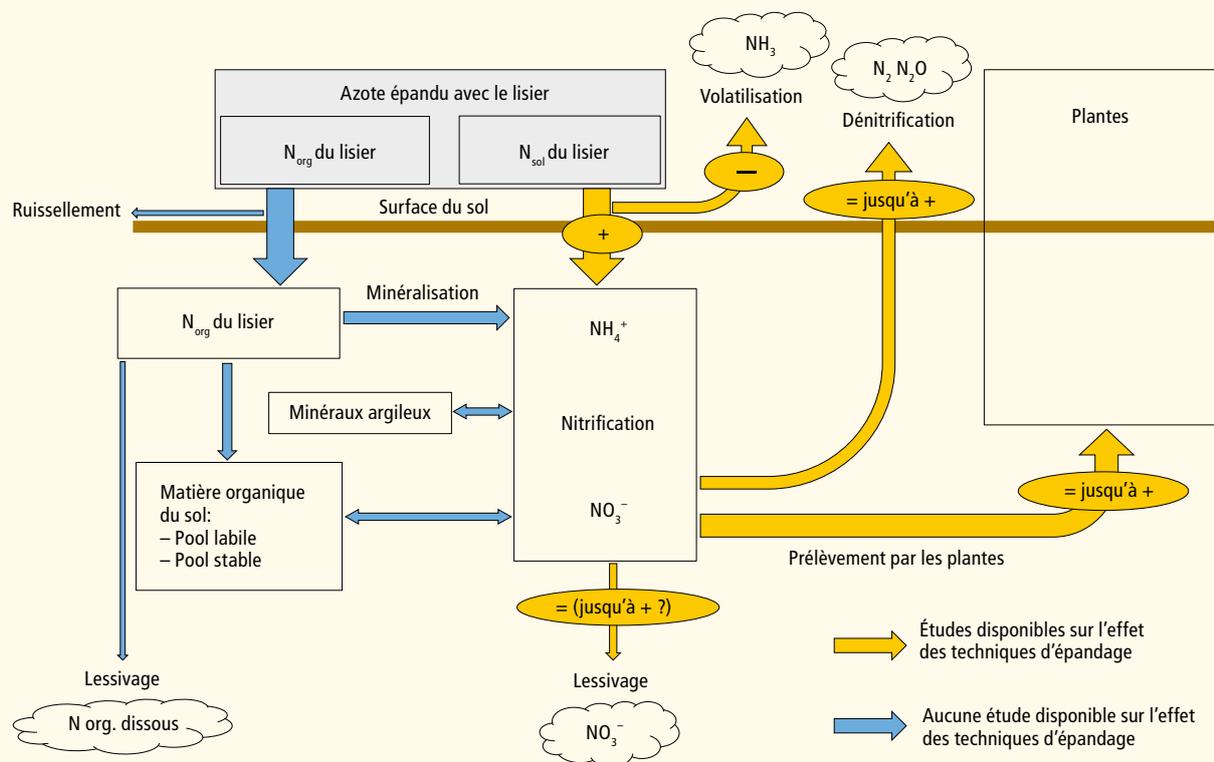


Figure 3 | Influence des techniques d'épandage en bandes sur les transformations et les voies de perte de l'azote contenu dans le lisier dans le système sol-plante. Les signes +, - et = indiquent un effet positif, négatif ou l'absence d'effet des techniques d'épandage en bandes.

taire de 2,5 % par rapport au déflecteur. Le distributeur à socs a permis en moyenne une augmentation du rendement de 5,8 %, l'injection de 7,5 % (fig. 2). Le rendement supplémentaire moyen calculé à partir de la synthèse bibliographique se situe donc dans la fourchette de valeurs calculée sur la base de la réduction attendue des émissions de NH_3 et de l'effet de l'azote disponible sur le rendement.

Que devient l'azote du lisier une fois dans le sol?

Dans le sol, l'azote du lisier subit diverses transformations et aboutit dans les organismes du sol, les composants organiques ou minéraux du sol, les plantes, l'air ou l'eau (fig. 3). En l'espace de quelques heures à quelques jours, la grande majorité de l'azote du lisier pénétrant dans le sol sous forme de NH_4^+ est soit absorbée par les micro-organismes, transformée en nitrate (NO_3^-), ou associée aux minéraux argileux (Braun *et al.* 2018). Les particules organiques du lisier, en revanche, ne se minéralisent parfois que très lentement ou sont même stockées dans le sol sur le long terme (fig. 3).

Pertes d'azote par nitrification et dénitrification

Les techniques d'épandage de lisier en bandes pourraient favoriser la nitrification et la dénitrification subséquente par rapport à l'épandage du lisier sur toute la surface, parce qu'elles:

- apportent une plus grande quantité d'azote du lisier dans le sol (voir ci-dessus),
- forment des bandes à forte concentration en azote (N) et en carbone (C) dans le sol,
- peuvent conduire, peu de temps après l'épandage, à une juxtaposition à petite échelle de zones aérobies et anaérobies dans le sol (Zhu *et al.* 2015).

Stimuler la nitrification et la dénitrification qui s'ensuit entraînerait une augmentation des pertes d'azote sous forme de protoxyde d'azote (N_2O) et d'azote moléculaire N_2 . Bourdin *et al.* (2014) ont observé une tendance à l'augmentation des pertes de N_2O après l'épandage de lisier sur des herbages avec des distributeurs à socs par rapport aux déflecteurs. Cependant, la différence entre les deux techniques d'épandage n'était statistiquement pas significative. L'étude de Wulf *et al.* (2002) n'a constaté aucune différence entre l'épandage de lisier

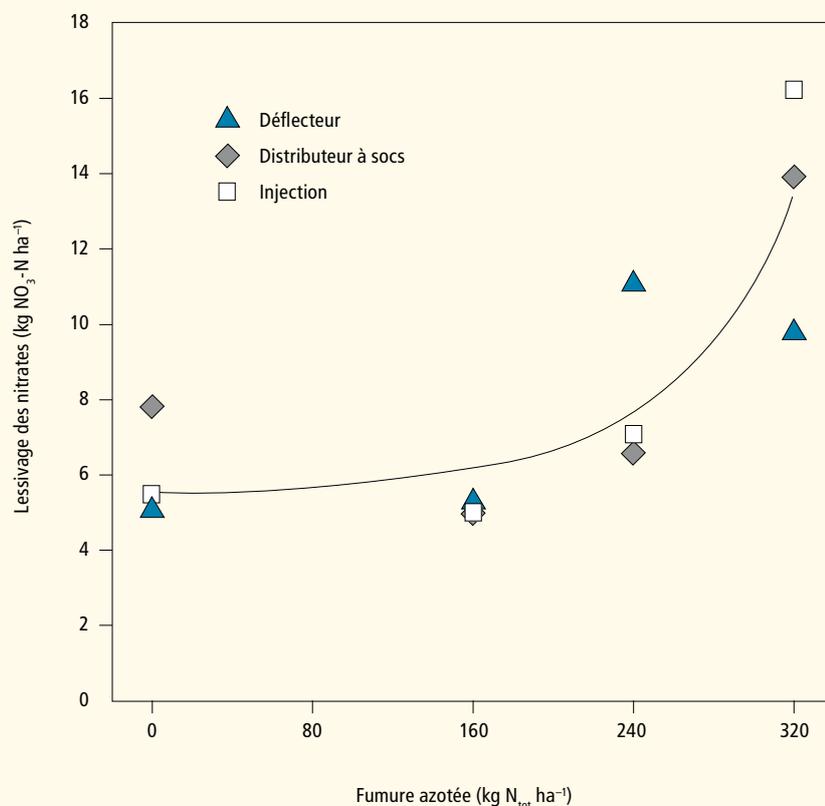


Figure 4 | Influence de la quantité d'azote épandue avec du lisier de bovins et de la technique d'épandage sur le lessivage des nitrates sous une prairie sur un sable silteux en Basse-Saxe. Moyenne sur quatre années d'essai. Données de Kayser *et al.* (2015).

avec un distributeur à tuyaux souples, un distributeur à socs et un déflecteur en ce qui concerne les émissions de N₂O. Après un épandage de lisier, les pertes de N₂O selon Senbayram *et al.* (2014) correspondent à 0,5 à 2 % de la fraction soluble de l'azote du lisier épandu (N_{sol} du lisier). Les différences potentielles entre les techniques d'épandage en termes de pertes de N₂O pourraient donc être importantes pour l'impact de la fertilisation sur l'effet de serre, mais pas pour son impact sur les rendements. Les pertes totales par dénitrification (N₂O et N₂) de l'azote contenu dans le lisier semblent généralement modestes. Après un apport de 45 kg d'azote total (N_{tot})/ha sur une prairie permanente, Ellis *et al.* (1998) ont mesuré une perte par dénitrification de 3–4 % de l'azote total apporté sur 19 jours. Cependant, la base de données relative aux pertes de N₂ est encore très limitée et les valeurs de mesures disponibles varient considérablement. Selon Maag et Vinther (1999), les pertes de N₂ peuvent représenter près de 20 % de l'azote total du lisier lorsque le sol est détrempé (72 % du volume des pores étaient remplis d'eau dans l'essai). Toutefois, l'épandage de lisier sur des sols saturés d'eau n'est pas

autorisé en Suisse. Ces références bibliographiques nous permettent de conclure que, dans des conditions normales d'épandage, les différences qui pourraient être dues à la technique d'épandage en matière de pertes par dénitrification n'ont pas d'influence significative sur l'effet du lisier sur le rendement.

Pertes d'azote par lixiviation de NO₃⁻

Dans un essai d'incubation avec un sol de prairie, environ la moitié de l'azote injecté sous forme de NH₄⁺ a été retrouvé dans le sol sous forme de NO₃⁻ après seulement 48 heures (nitrification; Braun *et al.* 2018). Les plantes absorbent de préférence l'azote sous forme de NO₃⁻. Toutefois, le NO₃⁻ est susceptible d'être lessivé. Prasuhn *et al.* (2013) ont mesuré dans un essai en lysimètres que, dans une prairie de fauche intensive avec quatre apports de lisier de 30 kg d'azote disponible (N_{disp})/ha, les pertes de NO₃⁻ correspondaient à seulement 1 % du N_{disp} apporté (moyenne établie sur trois ans). Kayser *et al.* (2015) ont étudié l'effet des techniques d'épandage du lisier sur la lixiviation du NO₃⁻ pour des quantités croissantes de lisier de bovins. Pour cela, ils ont utilisé une prairie sur un

sable silteux dans le nord de l'Allemagne. Les techniques d'épandage avec déflecteur, distributeur à socs et injection ne différaient pas de manière significative en ce qui concerne le lessivage des nitrates (fig. 4). Bien que la littérature scientifique sur l'effet des techniques d'épandage visant à réduire les émissions de NH_3 sur le lessivage du NO_3^- soit très limitée, les données disponibles suggèrent que l'épandage de lisier en bandes à la surface du sol n'augmente pas le lessivage du NO_3^- lorsque le niveau de fertilisation est adapté. Nous n'avons pas pu trouver d'étude sur l'effet de la technique d'épandage du lisier sur la lixiviation de l'azote organique dissous (fig. 3).

Immobilisation temporaire de l'azote du lisier

L'azote du lisier est en partie associé aux minéraux argileux par adsorption des molécules de NH_4^+ sur les sites d'échange de cations. Dans un essai avec du lisier porcin, Chantigny *et al.* (2004) ont montré que dans un sol argileux, 34 % de l'azote apporté avec le lisier était associé à des minéraux argileux après une journée, contre 11 % seulement dans du limon sableux. Après 96 jours, ce pourcentage était encore de 20 % dans le sol argileux et de seulement 2 % dans le limon sableux. Ces résultats montrent également que la liaison réversible du NH_4^+ aux minéraux argileux a un effet tampon sur la concentration en N de la solution du sol.

Environ un quart du N_{sol} du lisier est immobilisé par la biomasse microbienne du sol dans les premières semaines qui suivent l'épandage et peut être à nouveau mobilisé progressivement au fil du temps (Jensen *et al.* 2000). Six semaines après l'épandage de lisier bovin sur une prairie à l'aide d'un déflecteur, 45 % du NH_4 issu du lisier et retrouvé dans le sol ont été retrouvés dans la biomasse microbienne (Hoekstra *et al.* 2011). L'absorption et la libération graduelle de N_{sol} du lisier par les microorganismes du sol influencent donc l'effet fertilisant des apports de lisier à moyen terme.

Minéralisation de l'azote organique du lisier

L'azote contenu dans les particules organiques du lisier (N_{org} du lisier) est minéralisé par des processus de décomposition qui prennent parfois des années. Cette minéralisation influence l'effet fertilisant des apports de lisier à moyen et long terme. En conséquence, la disponibilité à moyen terme du N_{tot} du lisier bovin en Suisse est estimée à 50-70% (Richner *et al.* 2017). Un groupe de travail international a estimé la disponibilité à court terme du N_{tot} du lisier bovin à 30-50 % et sa disponibilité à long terme à 50-80% (Bittman *et al.* 2014). Cependant, l'influence de la technologie d'épandage sur la dynamique de N_{org} du lisier n'a pas encore été étudiée (fig. 3).

L'étude de Shah *et al.* (2013) montre que la minéralisation nette après un apport de lisier dépend beaucoup du type de sol et/ou du rapport C-N dans le sol. Sur une période de croissance de 180 jours, la minéralisation nette représentait 3 % du N_{org} du lisier dans un sol sableux, mais -27 % dans un silt argileux, ce qui représente une immobilisation nette.

En plus des apports d'engrais, la minéralisation de l'azote organique déjà présent dans le sol constitue une autre source d'azote pour les plantes. Les données de l'essai longue durée de Müller *et al.* (2011) montrent ce qui se passe après 38 ans avec différents niveaux de fumure: le peuplement de graminées (semé comme peuplement de graminées pur) qui n'a jamais été fertilisé pendant toute cette période pouvait encore puiser dans le sol environ un tiers de la quantité d'azote prélevée par le peuplement témoin fertilisé quant à lui intensivement avec du lisier (apport de 200-250 kg N_{tot} /ha/an). Cela donne une idée de la grande quantité d'azote présente dans le sol et potentiellement disponible pour les plantes. Dans l'essai décrit par Fornara *et al.* (2016) avec un sol présentant une teneur en humus de 4 %, la quantité totale de N dans la couche de sol de 0 à 15 cm correspondait à environ 5500 kg N/ha. Une minéralisation supplémentaire de seulement 0,3 % de l'azote présent dans le sol par an correspondrait donc à un apport supplémentaire de N de 15 kg N/ha/an dans ce sol. Même de si petites différences dans la minéralisation de l'azote organique du sol permettraient donc de compenser les différences dues à la technique d'épandage en matière de pertes de NH_3 . Les différences potentielles de rendement résultant de la technique d'épandage pourraient s'en trouver masquées à moyen terme.

Conclusions

Une étude suisse récente a permis de mesurer des pertes moyennes de NH_3 de 20 % du N_{sol} épandu avec la technique traditionnelle du déflecteur. Cela correspond à une perte de NH_3 de 5-6 kg N/ha si l'on se base sur une quantité habituelle d'épandage d'environ 30 kg N_{disp} /ha. Grâce à la réduction des émissions de NH_3 de 30 à 50 % en cas d'utilisation d'un distributeur à tuyaux souples ou d'un distributeur à socs, 2 à 3 kg N/ha pénètrent en plus dans le sol à chaque épandage de lisier. Ces valeurs concordent bien avec celles de la littérature internationale.

Dans le cadre d'un essai approfondi sur les sites de Tänikon et d'Arenenberg (TG), on n'a constaté presque aucune différence significative en termes de biomasse et de rendement en N des herbages entre le distributeur

à tuyaux souples, le distributeur à socs et le déflecteur. Seule exception en 2014 à Tänikon: le distributeur à socs a permis une augmentation significative du rendement avec du lisier épais par rapport au distributeur à tuyaux souples. Les rendements obtenus avec déflecteur ou avec distributeur à tuyaux souples étaient presque identiques sur ce site, bien que la dilution du lisier ait eu un effet positif évident sur le rendement des prairies. En revanche, sur le site d'Arenenberg, une tendance à des rendements plus élevés a été observée avec le distributeur à tuyaux souples par rapport au déflecteur (+6,8%). Toutefois, la différence se situait à la limite du seuil de significativité statistique ($p=0,063$), bien que les procédés aient également été appliqués sur des peuplements de graminées purs, qui indiquent clairement les différences dans la disponibilité de l'azote. L'analyse combinée des résultats d'essais suisses et européens a montré des rendements supplémentaires moyens de 2,5% (distributeur à tuyaux souples), 5,8% (distributeur à socs) et 7,5% (injection) pour les herbages. La quantité supplémentaire d'azote pénétrant dans le sol grâce à un mode d'épandage réduisant les émissions est faible par rapport à celle dont disposent les plantes dans les prairies intensives. Ainsi, dans plus de la moitié des observations – comme dans l'essai sur le site de Tänikon – aucune différence de rendement n'a été mesurée entre le distributeur à tuyaux souples et le déflecteur. Ces résultats montrent que l'on peut s'attendre à un petit avantage en termes de rendement de seulement quelques pourcents avec le distributeur à tuyaux souples

par rapport au déflecteur. Cependant, cet avantage est inconstant et difficile à prouver statistiquement dans les essais sur le terrain analysés individuellement. Les essais suisses et la plupart des essais étrangers sur ce thème ont été de relativement courte durée. Dans l'essai de plus longue durée (huit ans) de Neff (2011), la différence de rendement entre le distributeur à tuyaux souples et le déflecteur correspondait au rendement supplémentaire calculé dans l'analyse combinée de l'ensemble des essais (+3,3%, statistiquement non significatif). D'autres expériences de plus longue durée seraient nécessaires pour tirer une conclusion sur la différence de rendement à long terme entre les techniques d'épandage du lisier. En ce qui concerne l'effet de la technique d'épandage sur les voies de pertes potentielles de l'azote du lisier, hormis les émissions sous forme de NH_3 , le niveau de connaissances dans la littérature est encore insuffisant. Selon l'état actuel des connaissances, les pertes par lessivage et dénitrification n'augmentent pas avec les techniques d'épandage visant à réduire les émissions au point de pouvoir expliquer l'absence d'amélioration du rendement avec ces techniques par rapport à un épandage avec le déflecteur. Cependant, il existe encore d'importantes lacunes dans les connaissances concernant l'effet des techniques d'épandage sur l'immobilisation temporaire dans le sol de l'azote du lisier, ainsi que sur la dynamique de la fraction organique de l'azote du lisier. Selon l'espèce animale, cette fraction de l'azote du lisier correspond à environ la moitié de l'azote total épandu avec le lisier. ■

Bibliographie

- Aeby P., Andrey C., Mattei G., Kupper T. & Reidy B., 2017. Techniques d'épandage du lisier. *UFA-Revue* **10**, 22–24.
- Berendonk C., 2011. Einfluss der Gülleapplikationstechnik auf die Stickstoffwirkung von Rindergülle an vier Standorten in Nordrhein-Westfalen. Gülle 11: Gülle- und Gärrestdüngung auf Grünland, Internationale Tagung im Kloster Reute (D), 86–90.
- Bittman S., Dedina M., Howard C.M., Oenema O., Sutton M.A. (éd.), 2014. Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen, Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh, UK.
- Bourdin F., Sakrabani R., Kibblewhite M. G. & Lanigan G. J., 2014. Effect of slurry dry matter content, application technique and timing on emissions of ammonia and greenhouse gas from cattle slurry applied to grassland soils in Ireland. *Agric. Ecosyst. Environ.* **188**, 122–133.
- Braun J., Mooshammer M., Wanek W., Prommer J., Walker T. W. N., Rütting T. & Richter A., 2018. Full ¹⁵N tracer accounting to revisit major assumptions of ¹⁵N isotope pool dilution approaches for gross nitrogen mineralization. *Soil Biol. Biochem.* **117**, 16–26.
- Chantigny M. H., Angers D. A., Morvan T. & Pomar C., 2004. Dynamics of pig slurry nitrogen in soil and plant as determined with ¹⁵N. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **68**, 637–643.
- Ellis S., Yamulki S., Dixon E., Harrison R. & Jarvis S. C., 1998. Denitrification and N₂O emissions from a UK pasture soil following the early spring application of cattle slurry and mineral fertiliser. *Plant Soil* **202**, 15–25.
- Fornara D. A., Wasson E.-A., Christie P. & Watson C. J., 2016. Long-term nutrient fertilization and the carbon balance of permanent grassland: any evidence for sustainable intensification? *Biogeosciences* **13**, 4975–4984.
- Frick R. & Menzi H., 1997. Epandage d'engrais de ferme: Comment réduire les pertes d'ammoniac? *Rapport FAT 496*, Station fédérale de recherches en économie et technologie agricoles.
- Hafner S. et al., 2018. The ALFAM2 database on ammonia emission from field-applied manure: Description and illustrative analysis. *Agric. For. Meteorol.* **258**, 66–79.
- Häni C., Sintermann J., Kupper T., Jocher M. & Neftel A., 2016. Ammonia emission after slurry application to grassland in Switzerland. *Atmos. Environ.* **125**, 92–99.
- Hoekstra N. J., Lalor S. T. J., Richards K. G., O'Hea N., Dungait J. A. J., Schulte R. P. O. & Schmidt O., 2011. The fate of slurry-N fractions in herbage and soil during two growing seasons following application. *Plant Soil* **342**, 83–96.
- Hoekstra N. J., Lalor S. T. J., Richards K. G., O'Hea N., Lanigan G. J., Dyckmans J., Schulte R. P. O. & Schmidt O., 2010. Slurry ¹⁵NH₄-N recovery in herbage and soil: effects of application method and timing. *Plant Soil* **330**, 357–368.
- Jensen L. S., Perderson I. S., Hansen T. B. & Nielsen N. E., 2000. Turnover and fate of ¹⁵N-labelled cattle slurry ammonium-N applied in the autumn to winter wheat. *Europ. J. Agron.* **12**, 23–35.
- Kayser M., Breitsameter L., Benke M. & Isselstein J., 2015. Nitrate leaching is not controlled by the slurry application technique in productive grassland on organic-sandy soil. *Agron. Sustain. Dev.* **35**, 213–223.
- Kiefer J., Zeller A., Kunz H. G. & Elsäßer M., 2004. Auswirkungen der Gülleausbringtechnik auf den Grünlandertrag. 48. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft für Grünland und Futterbau, Ettelbrück (L), 31–34.
- Kunz H. G., 2011. Vergleich von Injektor und Prallkopfverteiler bei der Ausbringung von Rindergülle auf Ertrag und botanische Zusammensetzung von Grünland. Gülle 11: Gülle- und Gärrestdüngung auf Grünland, Internationale Tagung im Kloster Reute (D), 106–110.
- Kupper T., Bonjour C. & Menzi H., 2015. Evolution of farm and manure management and their influence on ammonia emissions from agriculture in Switzerland between 1990 and 2010. *Atmos. Environ.* **103**, 215–221.
- Kupper T. & Menzi H., 2013. Technische Parameter Modell Agrammon. Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL. Accès: www.agrammon.ch/assets/Downloads/Technische-Parameter-20130814.pdf.
- Lalor S. T. J., Schröder J. J., Lantinga E. A., Oenema O., Kirwan L. & Schulte R. P. O., 2011. Nitrogen fertilizer replacement value of cattle slurry in grassland as affected by method and timing of application. *J. Environ. Qual.* **40**, 362–373.
- Latsch A., Nyfeler D., Huguenin-Elie O., Wyss U. & Anken T., 2015. Gülle-Applikationstechnik in Grasland: Einfluss auf Ertrag, Stickstoffwirksamkeit, Pflanzenbestand und Futterhygiene. Abschlussbericht z. Hd. Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bern.
- Lorenz F. & Steffens G., 1996. Entwicklung und Überprüfung von Techniken zur Gülleausbringung auf Grünland mit geringer Ammoniak- und Geruchsfreisetzung, geringer Nitratauswaschung und guter Ertragswirkung. Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUF) der Landwirtschaftskammer Weser-Ems, Oldenburg. 94 p.
- Maag M. & Vinther F. P., 1999. Effect of temperature and water on gaseous emissions from soils treated with animal slurry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **63**, 858–865.
- Misselbrook T. H., Smith K. A., Johnson R. A. & Pain B. F., 2002. Slurry application techniques to reduce ammonia emissions: results of some UK field-scale experiments. *Biosyst. Eng.* **81**, 313–321.
- Müller C., Laughlin R. J., Christie P. & Watson C. J., 2011. Effects of repeated fertilizer and cattle slurry applications over 38 years on N dynamics in a temperate grassland soil. *Soil Biol. Biochem.* **43**, 1362–1371.
- Neff R., 2011. Narbenbelastung durch bodennahe Gülleausbringung. Gülle 11: Gülle- und Gärrestdüngung auf Grünland, Internationale Tagung im Kloster Reute (D), 172–173.
- Nyfeler D., Huguenin-Elie O., Suter M., Frossard E., Connolly J. & Lüscher A., 2009. Strong mixture effects among four species in fertilized agricultural grassland led to persistent and consistent transgressive overyielding. *J. Appl. Ecol.* **46**, 683–691.
- OFEV & OFAG, 2016. Objectifs environnementaux pour l'agriculture. Rapport d'état 2016. Office fédéral de l'environnement, Berne. *Connaissance de l'environnement* **1633**, 114 p.
- Prasuhn V., Spiess E. & Humphrys C., 2013. Nitratauswaschung unter intensiv und extensiv genutztem Grünland. In: 15. Gumpensteiner Lysimetertagung «Lysimeterforschung als Bestandteil der Entscheidungsfindung». 16.–17. April, Ed. LFZ, Raumberg-Gumpenstein (A), 161–164.
- Richner W., Flisch R., Mayer J., Schlegel P., Zähler M. & Menzi H., 2017. 4/ Propriétés et utilisation des engrais. *Recherche Agronomique Suisse* **8** (6), 4/1–4/24.
- Senbayram M., Chen R., Wienforth B., Herrmann A., Kage H., Mühling K. H. & Dittert K., 2014. Emission of N₂O from biogas crop production systems in Northern Germany. *BioEnergy Research* **7**, 1223–1236.
- Shah G. M., Rashid M. I., Shah G. A., Groot J. C. J. & Lantinga E. A., 2013. Mineralization and herbage recovery of animal manure nitrogen after application to various soil types. *Plant Soil* **365**, 69–79.
- Søgaard H. T., Sommer S. G., Hutchings N. J., Huijsmans J. F. M., Bussink D. W. & Nicholson F., 2002. Ammonia volatilization from field-applied animal slurry – the ALFAM model. *Atmos. Environ.* **36** (20), 3309–3319.
- UNECE, 2014. Guidance Document for Preventing and Abating Ammonia Emissions from Agricultural Sources: Paper ECE/EB.AIR/120. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). Switzerland, Geneva.
- Webb J., Pain B. F., Bittman S. & Morgan J., 2010. The impacts of manure application methods on emissions of ammonia, nitrous oxide and on crop response – a review. *Agric. Ecosyst. Environ.* **137** (1–2), 39–46.
- Whitehead D. C., 2000. Nutrient elements in grassland: Soil-plant-animal relationships. CAB International.
- Wulf S., Maeting M. & Clemens J., 2002. Application technique and slurry co-fermentation effects on ammonia, nitrous oxide, and methane emissions after spreading: II. Greenhouse gas emissions. *J. Environ. Qual.* **31**, 1795–1801.
- Wyss U., Latsch A. & Nyfeler D., 2017. Influence de la technique d'épandage du lisier sur la qualité des ensilages. *Recherche Agronomique Suisse* **8** (4), 134–141.
- Zhu K., Bruun S., Larsen M., Glud R. N. & Jensen L. S., 2015. Heterogeneity of O₂ dynamics in soil amended with animal manure and implications for greenhouse gas emissions. *Soil Biol. Biochem.* **84**, 96–106.

Riassunto**Influenza della tecnica di applicazione dei liquami sulla resa e sui flussi di azoto nelle superfici inerbite**

Durante ogni distribuzione di liquami in cui si utilizzano tubi flessibili a strascico o tubi semirigidi con solcatore giungono nel suolo 2–3 kg di azoto in più per ettaro rispetto alla barra, poiché fuoriesce dal 30 al 50 per cento in meno di ammoniaca. Ciò è quanto risulta dalle serie di misurazioni effettuate in Svizzera in stagioni diverse e dalla letteratura in materia. In un test sul campo di due anni e mezzo non è stata rilevata nel primo sito nessuna differenza a livello della resa tra la distribuzione tramite tubi flessibili a strascico e la barra. La diluizione dei liquami ha determinato invece un incremento della resa. Nel secondo sito di questo test si è osservata una resa totale tendenzialmente più elevata con i tubi flessibili a strascico rispetto alla barra ($p=0,063$). Un'analisi complessiva dei test, nazionali ed esteri, sulla distribuzione evidenzia rese medie maggiori delle superfici inerbite, rispettivamente del 2,5 per cento con tubi flessibili a strascico e del 5,8 per cento con tubi semirigidi con solcatore, rispetto alla barra. Per quanto riguarda le categorie di perdite dell'azoto che giunge nel suolo grazie alla tecnica di riduzione delle emissioni, lo stato attuale delle conoscenze non è sufficiente. Le perdite dovute a dilavamento e le perdite di denitrificazione non aumentano in modo così determinante stando allo stato attuale delle conoscenze da lasciare ipotizzare una riduzione della valorizzazione dell'azoto. Il modo in cui la tecnica di distribuzione influisce sulla dinamica dell'azoto organico nel suolo, è un oggetto di ricerca ancora completamente inesplorato.

Summary**Influence of slurry application technique on yield and nitrogen flows in grassland**

Measurement series carried out in Switzerland during different seasons as well as an overview of the literature show that with the use of a trailing hose spreader or trailing shoe spreader, 2–3 kg more nitrogen per hectare ends up in the soil per instance of slurry-spreading than with a broadcast spreader, owing to the escape of 30–50 % less ammonia. In a two-and-a-half-year field trial, no difference was noted in yield on the first site between slurry application by trailing hose and broadcast application. By contrast, dilution of the slurry led to an increase in yield. On the second site where this trial was conducted, total yield tended to be higher with trailing hose application than with broadcast application ($p=0.063$). A summary analysis of Swiss and European trials of slurry application techniques shows average additional yields for grassland stands of 2.5 % with trailing hose applications and 5.8 % with trailing shoe applications compared to broadcast applications. The current state of knowledge concerning the losses of the nitrogen which additionally enters the soil thanks to the emission-mitigation application technologies remains very patchy. To the best of our current knowledge, leaching and denitrification losses do not increase to such a great extent that a reduction in the yield effect of the applied nitrogen is to be expected. The way in which slurry-spreading technologies influence the dynamics of organic nitrogen in the soil remains wholly unexplored at present.

Key words: ammonia losses, grassland yield, nitrogen, slurry, trailing-hose spreader.