

L'acidification du lisier : une voie à explorer pour réduire les pertes d'azote de l'élevage porcin

Anne-Sophie LANGLOIS (1), Nadine GUINGAND (2), Solène LAGADEC (1),
Daniel HANOCQ (1), Pierre QUIDEAU (1), Mariana MOREIRA (1)

(1) Chambre d'Agriculture de Bretagne, rue Le Lannou, 35042 Rennes, France

(2) IFIP Institut du Porc, La Motte au Vicomte, 35651 Le Rheu, France

anne-sophie.langlois@bretagne.chambagri.fr

L'acidification du lisier : une voie à explorer pour réduire les pertes d'azote de l'élevage porcin en France

L'acidification consiste à ajouter de l'acide ou d'autres additifs dans le lisier pour en abaisser le pH afin d'y maintenir l'azote sous forme ammoniacale (NH_4^+) et de réduire les émissions atmosphériques d'ammoniac (NH_3). Elle peut se faire dans le bâtiment, lors du stockage extérieur ou de l'épandage. Bien que référencée parmi les Meilleures Techniques Disponibles (MTD) dans le BREF Elevage, cette technique n'a jamais été étudiée dans les conditions françaises d'élevage. Un état des lieux des connaissances acquises à l'étranger décrit le principe de l'acidification, ses conditions de mise en œuvre et ses impacts environnementaux, agronomiques et économiques. Dans le bâtiment d'engraissement, réduire le pH du lisier à 5,5 peut réduire les émissions d'ammoniac jusqu'à 70 %. Lors du stockage, l'abattement peut atteindre 80 % avec un pH inférieur à 6. A l'épandage, il peut atteindre 70 % quand le pH est réduit à 6,4. Les émissions de méthane sont diminuées et les effets sur les émissions de protoxyde d'azote sont contradictoires. Dans le bâtiment, les frais de fonctionnement (hors coût d'investissement) sont compris entre 0,8 et 1,3 € par porc charcutier produit et par an. Au stockage, comme à l'épandage, les coûts de l'acidification se situent entre 1 et 2 € par mètre cube de lisier. Au champ, les moindres pertes azotées par volatilisation augmentent l'efficacité de l'azote apporté. Cependant, l'épandage de lisiers acidifiés sur sols déjà acides peut nécessiter des apports supplémentaires d'amendements basiques. Cet impact sur la qualité du sol est très dépendant du contexte pédoclimatique. Des recherches plus approfondies sont nécessaires pour mieux évaluer les balances avantages/inconvénients et coûts/bénéfices de l'acidification des lisiers relativement aux autres MTD dans le contexte (notamment pédoclimatique) français.

Slurry acidification: a way to explore for reducing nitrogen losses by pig farming in the French context

Acidification consists of decreasing slurry pH by adding acid or other additives to maintain nitrogen in the ammoniacal form (NH_4^+) and to reduce gaseous ammonia emissions (NH_3). Slurry can be acidified in livestock buildings, in external storage pits or when spreading on the fields. Although they are called "Best Available Techniques" in the BREFs, these techniques have never been studied under the French farming conditions. This review of international knowledge allows us to describe mechanisms of slurry acidification, how to perform it and its environmental, agronomic and economic impacts. In-house slurry acidification at pH 5.5 may reduce ammonia emission up to 70%. In the storage phase, abatement may reach 80% with a pH less than 6. For acidification during spreading, it may reach 70% for a target pH of 6. Methane emissions are reduced and the effects on nitrous oxide are contradictory. Lastly, annual operational costs in pig housing (excluding investment costs) are 0.8-1.3 € per finishing pig. In storage and field spreading phases, acidification costs are 1-2 € per m³ of slurry. When spreading on the land, the lower nitrogen volatilisation losses increase nitrogen efficiency. However, applying acidified slurry may contribute to soil acidification, and additional liming may be required on acid soils. Impacts on soil quality depends greatly on the soil and climate context. More research is needed to better compare advantages/disadvantages and costs/benefits of slurry acidification vs other Best Available Techniques in the French context.

INTRODUCTION

Le secteur agricole contribue à 94 % des émissions totales d'ammoniac en France (Citepa, 2019 – émissions 2017) dont 70 % sont liés à la gestion des effluents d'élevage. L'ajout d'acides dans les lisiers a pour objectif de réduire la perte azotée sous forme d'ammoniac (NH_3). Cette perte azotée, qu'elle se produise dans le bâtiment, lors du stockage et/ou de l'épandage, conduit à une réduction de l'azote disponible pour les cultures, à la dégradation de la qualité de l'air, à l'eutrophisation et à l'acidification des milieux du fait des potentielles retombées acides. Ce procédé d'acidification s'est principalement développé dans les pays d'Europe du Nord en lien avec une législation très axée sur la protection de la qualité de l'air. Le Danemark notamment impose l'acidification pour certaines conditions d'élevage ; ainsi, en 2016, environ 20 % des lisiers étaient acidifiés contre moins de 2 % en 2008 (Fanguero *et al.*, 2015 ; Jacobsen, 2017). En 2016, 140 dispositifs d'acidification de lisiers en bâtiment étaient en fonctionnement au Danemark, dont 75 concernaient le stockage et 110 l'épandage (Jacobsen, 2017).

Cet article a pour objectif de faire le point sur l'état des connaissances relatives à cette technique dans ses différentes conditions de mise en œuvre afin d'évaluer son applicabilité dans les conditions nationales.

1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'acidification vise à déplacer l'équilibre du couple $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ qui est la base de la formation, en milieu liquide, de l'ammoniac (NH_3) à partir des ions ammonium (NH_4^+).

Cet équilibre est influencé par deux paramètres : la température et le pH du lisier. Une réduction de la température favorise le maintien des ions ammonium en solution aqueuse alors que des températures élevées favorisent la volatilisation de l'ammoniac. La réduction du pH à des valeurs inférieures à 7 favorise le maintien des ions ammonium en solution alors que les pH supérieurs à 7 permettent la volatilisation d'ammoniac en phase gazeuse (Figure 1).

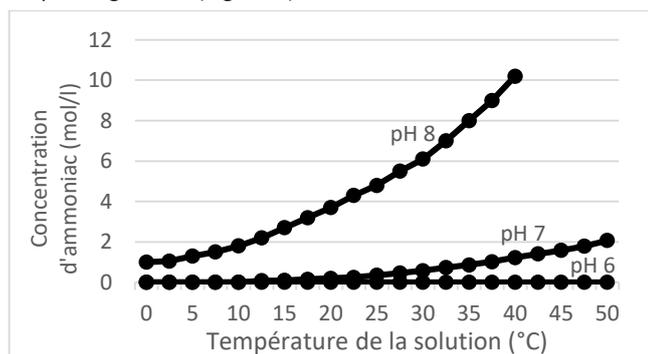


Figure 1 - Effets du pH et de la température sur la concentration en NH_3 dans une solution aqueuse d'ammoniac (source : Hartung, 1995 cité par Degré *et al.*, 2001)

L'ajout d'acide favorise donc le maintien des ions ammonium en solution.

1.1. Choix de l'acide à utiliser

L'acide sulfurique est l'acide le moins cher du marché et est, de ce fait, le plus couramment utilisé pour réduire le pH des lisiers (Fors *et al.* - 2018, Pizzul *et al.*, 2018). Il permet aussi d'apporter

des sulfures qui sont des macro éléments importants pour les plantes. Par contre, une augmentation des émissions d'hydrogène sulfuré peut être constatée au moment de l'ajout d'acide sulfurique. D'autres acides ont été testés pour éviter cette production de composés soufrés volatils mais aussi la formation de mousse lors de l'addition de l'acide (Regueiro *et al.*, 2016a). Cependant, les acides forts ont souvent été écartés car trop onéreux, trop corrosifs pour les matériaux d'élevage ou encore présentant des risques pour l'environnement, la santé des animaux ou le personnel travaillant en élevage (Larsson, 2018). Par ailleurs, l'utilisation d'acides faibles n'est pas envisageable du fait des énormes volumes nécessaires pour atteindre les pH acides recherchés.

1.2. Effet de la fréquence d'acidification

Le fort pouvoir tampon du lisier accroît la quantité d'acide nécessaire pour atteindre le pH cible. Il compense rapidement la réduction du pH engendrée par l'ajout d'acide. Une acidification la plus fréquente possible est donc nécessaire pour maintenir un pH acide et déplacer l'équilibre vers le maintien des ions ammonium (NH_4^+) et ceci particulièrement en bâtiment. Selon Kai *et al.*, (2008) et Vera (2016), la fréquence d'acidification dans le bâtiment varie entre 10 fois par jour et une fois par jour.

2. ACIDIFICATION DANS LE BATIMENT

2.1. Description des équipements et du fonctionnement

L'acide est stocké à l'extérieur des bâtiments dans un équipement spécifique. Le lisier du bâtiment est pompé vers une fosse intermédiaire où il est mélangé avec l'acide dans des quantités permettant d'atteindre l'objectif de pH fixé (5,5 dans la majorité des cas). Une partie du mélange est ensuite redirigée vers le bâtiment d'origine. Le lisier fraîchement excrété tombe donc directement dans le mélange acidifié, limitant au maximum les émissions d'ammoniac dans le bâtiment. Le reste est acheminé vers un stockage extérieur (Petersen *et al.*, 2016). Tous les processus, tels que l'agitation, le pompage, l'ajout d'acide et la mesure des valeurs de pH, sont gérés automatiquement sans aucune intervention humaine.

Les composants du système comprennent une cuve d'acide, une fosse intermédiaire avec mélangeur, un pH-mètre, des pompes, des vannes, des débitmètres et un panneau de commande qui permet une automatisation complète du processus de pompage de l'acidification et du lisier (Rodhe *et al.*, 2018). Une douche d'urgence et une douche oculaire doivent être présentes à proximité en cas d'accident.

La cuve d'acide (Figure 2) comprend une double paroi et est construite sur une fondation en béton avec un dispositif de protection contre la corrosion. L'acide sulfurique (à 95 %) est souvent stocké dans des cuves en acier inoxydable (norme EN 14301 – acide inoxydable austénitique – fer gamma). Le volume de la cuve doit permettre un stockage couvrant entre 6 et 12 mois d'utilisation. Elle doit être située à proximité de la fosse intermédiaire et être facilement accessible pour son remplissage par un camion-citerne. Cependant, le local de stockage doit être à distance de sources de chaleur, de combustibles, de métaux et de matériaux organiques (Fors *et al.*, 2018) : en effet, en contact avec ces derniers, l'acide peut déclencher un incendie, des explosions ou une auto-inflammation.

La fosse de mélange du lisier et de l'acide est construite en béton (Figure 2). Les mélangeurs sont en acier inoxydable résistant aux acides. Il est conseillé de prévoir un volume suffisant pour éviter tout débordement de mousse lors de l'addition de l'acide (Fors *et al.*, 2018). Afin d'éviter la corrosion de la fosse intermédiaire, voire des préfosses, il est conseillé d'utiliser des bétons de classe environnementale modérée (DS/EN 206 + DS 2426). Cinq à huit kg d'acide sulfurique par tonne de lisier sont nécessaires pour réduire le pH à 5,5 (Sindhøj et Rodhe, 2013 ; VERA, 2016). La consommation totale d'électricité du dispositif d'acidification atteint environ 1,5 kWh par porc produit avec l'équipement développé par JH Agro (VERA, 2016).

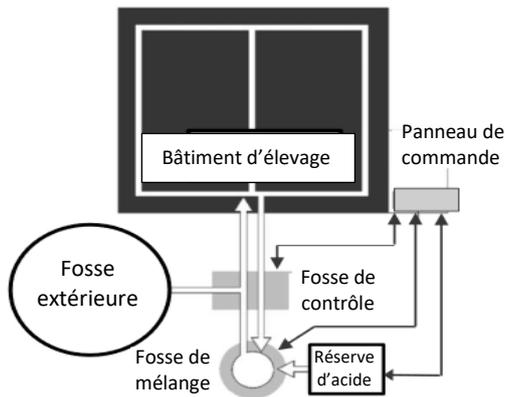


Figure 2- Schéma d'un système d'acidification au bâtiment (Rodhe *et al.*, 2018)

La société JH Agro a développé une version simplifiée du système précédent dans laquelle le lisier acidifié dans la fosse de mélange est transféré en totalité vers le stockage extérieur au lieu d'être partiellement renvoyé vers le bâtiment (Rodhe *et al.*, 2018). La réduction des émissions d'ammoniac n'affecte alors que le stockage extérieur et l'épandage.

2.2. Emissions de gaz et d'odeurs et composition des lisiers

La mise en œuvre de la technique d'acidification au niveau du bâtiment permet de réduire de 50 à 70 % l'émission d'ammoniac par rapport à un stockage des effluents sous les animaux (Pedersen, 2004 ; Fanguero *et al.*, 2015 ; Jacobsen, 2017 ; Petersen *et al.*, 2016 ; Vera, 2016). La majorité des études porte sur des fréquences d'acidification de 6 à 10 fois par jour dans des bâtiments d'engraissement. L'acidification des lisiers dans le bâtiment est reconnue comme une meilleure technique disponible (MTD) pour la réduction de l'émission d'ammoniac.

Ce procédé permet également de réduire les émissions d'hydrogène sulfuré, H₂S (Petersen *et al.*, 2016), la baisse du pH réduisant l'activité des bactéries productrices d'hydrogène sulfuré (Larsson, 2018 ; Saue et Tamm, 2018). L'oxygénation du lisier acidifié peut aussi être une voie de réduction des émissions d'hydrogène sulfuré (Jenssen, 2002 cité par Saue et Tamm, 2018).

L'acidification des lisiers à des pH inférieurs à 6 provoque aussi une inhibition de la méthanogénèse, donc de l'émission de méthane (Wang *et al.*, 2014 ; Berg *et al.*, 2006 ; Ottosen *et al.*, 2009 et Sørensen et Eriksen, 2009 cités par Saue et Tamm, 2018). Ainsi, les émissions de méthane d'un bâtiment de porcs charcutiers seraient réduites de 50 % par l'acidification des lisiers (Petersen *et al.*, 2016) ; l'activité méthanogène est maximale pour des pH compris entre 6,5 et 8,5.

S'agissant de l'émission de protoxyde d'azote (N₂O), puissant gaz à effet de serre, l'impact de l'acidification est très incertain, contradictoire selon la référence bibliographique : négatif (selon Fanguero *et al.*, 2015 ; Gomez-Munoz *et al.*, 2016), nul (selon Petersen *et al.*, 2016), ou positif (selon Sajeev *et al.*, 2017 ; cités par Saue et Tamm, 2018).

Selon Saue et Tamm (2018), la réduction des émissions d'ammoniac et de GES par l'acidification des lisiers dans le bâtiment et lors du stockage compense les émissions de GES liées à la production de l'acide sulfurique ajouté et à celle de la chaux utilisée lors de l'épandage.

L'effet de l'acidification sur les odeurs des bâtiments a fait l'objet de très peu de publications. L'étude menée par VERA (2016) met en évidence une réduction de 29 % des odeurs émises, mais sur un seul site de mesure ; alors que selon Pedersen (2004) il n'y aurait pas d'effet sur les odeurs.

L'acidification du lisier permet d'augmenter la teneur en azote ammoniacal du lisier de 7 à 13 % (Sindhøj et Rodhe, 2013), ce qui doit être pris en compte dans le plan de fertilisation.

2.3. Coûts associés

Le coût d'investissement, intégrant l'équipement d'acidification et la cuve de stockage de l'acide, varie entre 40 et 55 € par place de porc charcutier (Jonassen, 2016). Les coûts de fonctionnement, hors frais d'amortissement sont compris entre 0,8 et 1,3 €/porc charcutier produit.

3. ACIDIFICATION DANS LA FOSSE

3.1. Description du fonctionnement et des équipements

Le lisier est souvent acidifié lors de la vidange de la fosse juste avant épandage et seules les émissions au champ sont diminuées. Selon les équipementiers, l'acide est soit ajouté à partir de conteneurs, soit à partir d'un camion-citerne de transport (Sindhøj et Rodhe, 2013). Ces systèmes mobiles sont facilement transportables et peuvent acidifier une grande quantité de lisier en peu de temps. Ils sont adaptés aux besoins des entrepreneurs agricoles qui peuvent offrir ce service à de nombreux clients et ainsi réduire le coût d'investissement.

L'acide sulfurique à 95-98 % est le plus utilisé. D'après Frandsen et Schelde (2007) cités par Sindhøj et Rodhe (2013), il faut entre 4 et 8,5 litres d'acide sulfurique par m³ de lisier stocké pour atteindre un pH compris entre 5,5 et 6,0.

Selon Rodhe *et al.* (2019), le lisier acidifié est plus agressif vis-à-vis du béton qu'un lisier non acidifié. Cependant, avec un béton de « qualité durable » spécialement conçu pour les environnements à faible pH, les effets de l'attaque chimique après une exposition de deux ans peuvent être considérés comme faibles.

Une hauteur de garde dans la fosse de stockage de 0,5 à 1 m est nécessaire pour que la mousse produite par l'acidification ne déborde pas pendant le mélange (Rodhe *et al.*, 2018).

3.2. Emissions de gaz et d'odeurs et composition des lisiers

Selon Nørregaard Hansen *et al.* (2008) cités par Sindhøj et Rodhe (2013), l'acidification réduit les émissions d'ammoniac de plus de 80 % au stockage dès lors que le pH est inférieur à 6.

Très peu d'études traitent de l'effet de l'acidification lors du stockage sur les odeurs, ni sur les émissions (H₂S, CH₄, N₂O et CO₂) ou la composition du lisier. Il est observé cependant que la teneur élevée en soufre inorganique dans le lisier acidifié peut

conduire au développement d'une odeur à partir de composés volatils soufrés (Eriksen *et al.*, 2008 cité par Pizzul *et al.*, 2018).

3.3. Coûts

Au Danemark, l'acidification en fin de stockage étant effectuée par des entreprises, il n'y a aucun coût d'investissement ni d'entretien pour l'agriculteur. En plus des frais normaux d'utilisation d'un épandeur à pendillards, l'entrepreneur facture entre 0,5 et 1,5 €/t de lisier à quoi s'ajoute le coût de l'acide sulfurique, soit en moyenne 13 €/ha, pour un coût total compris entre 0,9 et 1,9 €/t de lisier (Jacobsen, 2017).

4. ACIDIFICATION A L'EPANDAGE

4.1. Description des équipements et du fonctionnement

L'acidification ayant lieu pendant l'épandage, le lisier acidifié s'infiltre dans le sol avant que le pouvoir tampon ne puisse à nouveau augmenter le pH. Le pH cible est à 6,4 ce qui permet d'utiliser beaucoup moins d'acide que les systèmes précédents.

L'acidification du lisier à l'épandage a lieu dans un mélangeur installé sur la cuve à lisier, juste avant la distribution dans les tuyaux d'épandage. Ces dispositifs sont équipés de capteurs de pH. Ils peuvent être installés sur de nombreux tracteurs et citernes à lisier, et ont été conçus au Danemark pour être utilisés avec des rampes à pendillards (Rodhe *et al.*, 2018). Ils sont bien adaptés aux besoins des entrepreneurs agricoles.

Le système SyreN (Figure 3) utilise généralement de l'acide sulfurique à 96 %. Du sulfate de fer peut être ajouté au lisier acidifié pour diminuer la teneur en hydrogène sulfuré et ainsi réduire les problèmes d'odeur.

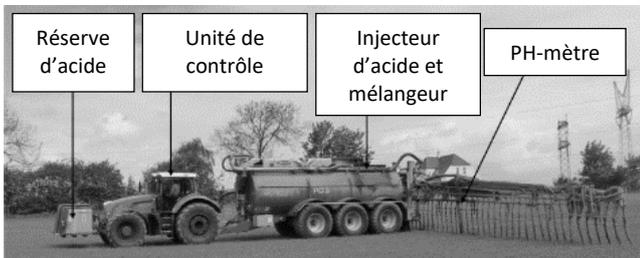


Figure 3 - Exemple du système SyreN (Rodhe *et al.*, 2018)

Le système d'acidification de la marque commerciale Kyndestoft utilise de l'acide sulfurique à 50 %, moins dangereux que celui à 96 % en cas d'accident. Cependant, cet acide sulfurique plus dilué est plus corrosif pour le métal, et la conception de tous les composants a donc été adaptée à cette contrainte (Rodhe *et al.*, 2018).

4.2. Coûts

Le matériel étant loué, les coûts d'investissement, d'entretien et d'épandage du lisier n'apparaissent pas en tant que tels. En plus des frais normaux d'utilisation d'un épandeur à pendillards, l'entrepreneur facture 0,55 € par m³, plus le coût de l'acide sulfurique : 0,35 € par litre, à raison d'en moyenne 1,5 litre par m³ (Vestergaard, 2013, cité par Sindhoj et Rodhe, 2013). Le coût total pour l'agriculteur est donc de 1,10 € par m³ de lisier.

5. EMISSIONS DE GAZ ET D'ODEURS ET LIXIVIATION DES NITRATES

L'acidification des lisiers peut réduire les émissions d'ammoniac jusqu'à 90 % (au pH cible de 6) par rapport à un épandage avec

pendillards (Wagner *et al.*, 2015). Elle constitue une bonne alternative à l'injection quand celle-ci est impossible (Birkmose, 2016 ; Fangueiro *et al.*, 2017).

L'efficacité de cette technique est d'autant plus élevée que le pH de départ du lisier est supérieur à 7 (Peltonen et Yrjölä, 2019), le pH final plus acide (Park *et al.*, 2018), la quantité d'acide apportée plus élevée et que l'épandage a lieu par temps chaud et sec et/ou venté (Williams *et al.*, 2020).

Selon les études, les émissions de N₂O peuvent être soit réduites, jusqu'à 72 % (Park *et al.*, 2018), soit augmentées ou encore non affectées significativement (Baky, 2018). Ceci peut être expliqué par un délai ou un blocage du processus de nitrification (Fangueiro *et al.*, 2017). Les facteurs agissant sur les émissions de N₂O sont multiples et pour la plupart indépendants du fait que le lisier ait été acidifié ou pas. Cependant, si l'acidification du lisier conduit à une meilleure gestion de l'azote apporté et à une moindre présence de nitrates dans le sol au cours de l'hiver, cela va dans le sens d'une moindre émission de N₂O.

Les odeurs à l'épandage sont réduites selon Nyord *et al.*, (2013). Park *et al.* (2018) indiquent que l'acidification peut retarder la nitrification de l'azote et conduire à ce qu'au début du drainage hivernal, la quantité d'ions ammonium soit supérieure à celle des nitrates. Loide *et al.* (2019) ont même mesuré une diminution de la lixiviation de l'azote après épandage de lisier acidifié. Par ailleurs, la moindre volatilisation de l'ammoniac liée à l'acidification limite les retombées aléatoires sur les parcelles souvent non prises en compte dans l'équilibre de fertilisation et le risque de voir augmenter les reliquats azotés en début de période de drainage. Lorsque cette moindre volatilisation est prise en compte dans l'équilibre de fertilisation, la dose de lisier apportée au sol peut être réduite afin de conserver un stock d'azote nitrique constant et limiter le risque de lixiviation.

6. IMPACTS AGRONOMIQUES

6.1. Valeur fertilisante du lisier, rendement et azote mobilisé par les cultures

La proportion d'azote ammoniacal disponible pour les plantes peut passer de 65-70 %, sans acidification, à 90 % pour des lisiers acidifiés dans le bâtiment (Baky, 2018).

Wagner *et al.* (2015) ont noté une légère hausse du rendement des cultures ayant reçu du lisier acidifié. A dose identique, la moindre volatilisation liée à l'acidification se traduit par une meilleure efficacité de l'azote total apporté. Si la dose globale d'azote efficace ne dépasse pas la dose optimale, le rendement est amélioré. Le protocole ne renseignant pas quant à la dose optimale préconisée, rien ne permet de conclure de manière certaine sur ce point.

La quantité d'azote absorbée par les cultures varie peu après acidification (Park *et al.*, 2018). Cela semble dû au fait que la nitrification de l'azote du lisier et son assimilation par les plantes sont retardées.

6.2. pH du sol

Le pH des sols ayant reçu des lisiers acidifiés reste en général stable (Park *et al.*, 2018). Peltonen et Yrjölä (2019) ont observé une diminution du pH après épandage de lisiers acidifiés mais pas plus que pour d'autres pratiques de fertilisation utilisées par les agriculteurs. L'effet sur le pH semble dépendre du pH initial et du niveau de carbonatation du sol (Kučinskienė, 2019). La

plupart des essais étudiés ici ont été pratiqués en sol calcaire et l'effet sur le pH du sol de l'acidification est inexistant mais il semble qu'en sol déjà acide (cas de la quasi-totalité des sols bretons, par exemple), elle augmente les besoins de chaulage.

6.3. Teneur en soufre du sol

L'épandage d'acide sulfurique fait augmenter la teneur en soufre du sol et les apports peuvent dépasser de 50% les besoins des cultures (Birkmose, 2016 ; Loide *et al.*, 2019). Le besoin des plantes en soufre se situe entre 10 et 50 kg de soufre/ha (Goujard O., COMIFER). Pour deux litres d'acide incorporés à 30 tonnes de lisier, l'apport en soufre correspond à 34 kg de soufre/ha. Il existe ainsi un risque de lixiviation de sulfates vers la nappe s'ils sont entraînés par l'eau en excès au cours de la saison de drainage. Cet apport doit être pris en compte lors du raisonnement de la fertilisation à l'échelle pluriannuelle notamment.

6.4. Biodisponibilité du phosphore apporté

L'épandage de lisier acidifié augmente la solubilité du phosphore et sa disponibilité pour les plantes (Pedersen *et al.*, 2017 ; Peltonen et Yrjölä, 2019 ; Regueiro *et al.*, 2019). La quantité totale de phosphore apportée reste inchangée.

6.5. Biodiversité du sol et activité des enzymes

Peu d'études ont évalué l'effet d'un lisier acidifié sur les organismes du sol et l'activité enzymatique. Edesi *et al.* (2020) n'ont pas observé d'effet significatif du lisier acidifié sur la composition de la communauté microbienne de la couche 0–20 cm de parcelles de blé tendre d'hiver en comparaison avec un lisier non acidifié et une fertilisation minérale. Néanmoins, deux semaines après l'épandage, l'abondance relative d'Actinobacteria était différente entre traitements. La plus grande quantité d'azote nitrique dans le fertilisant minéral a certainement favorisé ce groupe de bactéries par rapport aux lisiers apportés dont l'azote est surtout sous forme ammoniacale.

Le lisier acidifié ne semble pas affecter l'activité des enzymes déshydrogénase, β -glucosidase et phosphatase acide (Marques *et al.*, 2014 ; Edesi *et al.*, 2020). Il diminue en revanche l'activité de la phosphatase alcaline mais sans risque de stress phosphoré.

6.6. Autres impacts potentiels relevés

Birkmose et Vestergaard (2013) ont noté un meilleur enracinement des céréales sans pouvoir l'expliquer. L'acidification augmente la fusariose des épis (Kučinskienė 2019).

7. INCIDENCE DE L'ACIDIFICATION SUR L'ENSEMBLE DU PROCESSUS DE GESTION DES EFFLUENTS

Selon Kai *et al.* (2008), l'acidification dans le bâtiment par l'acide sulfurique diminue les émissions d'ammoniac de 70 % pendant l'engraissement, de 10 % lors du stockage et de 67 % lors de l'épandage, par rapport à des techniques standard. La substitution par d'autres acidifiants conditionne essentiellement la teneur en matière sèche, la teneur en azote ammoniacal et la concentration en phosphore soluble (Regueiro *et al.*, 2016a). Ainsi, l'utilisation d'alun à la place de l'acide sulfurique augmenterait, du fait de ses propriétés

coagulantes, la proportion de particules de lisier très concentrées en phosphore soluble de taille supérieure à 100 μ m (Regueiro *et al.*, 2016b). L'efficacité de la séparation du phosphore est donc sensible à l'additif utilisé, ce qui milite pour raisonner l'efficience de l'itinéraire de gestion de l'effluent dans sa globalité.

La production de biogaz en conditions mésophiles (procédés de méthanisation agricoles les plus courants) est améliorée par l'ajout de 20 à 30 % de lisier acidifié dans la ration du digesteur. Elle diminue quand ce taux dépasse 30 % (Jacobsen *et al.*, 2017). De même, l'ajout de la fraction solide issue de la séparation de phases d'un lisier acidifié dans un digesteur augmente la production de biogaz.

8. CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE EN FRANCE

Les risques (explosion, brûlures, ...) associés à l'utilisation et au stockage de l'acide pourraient freiner l'adoption de cette technique par les éleveurs. Les possibles besoins en chaulage supplémentaires après épandage de lisier acidifié méritent aussi d'être évalués sur nos sols déjà acides. Cette évaluation devra aussi tenir compte de la diminution des fuites d'azote obtenue et de l'engrais minéral éventuellement économisé. Le bilan carbone et les impacts sur la biodiversité du sol de l'acidification des effluents mériteraient aussi d'être étudiés. Ces questions de sécurité et environnementales peuvent aussi s'avérer négatives pour l'image de l'élevage auprès des consommateurs français.

L'acidification dans le bâtiment représente un investissement élevé qui semble difficile à rentabiliser sans subvention. Son rapport coûts/bénéfices environnementaux sur le continuum de gestion des effluents dans son ensemble mérite d'être étudié dans le contexte national et mis en regard de celui des autres techniques de réduction des émissions d'ammoniac dans le bâtiment.

L'acidification en fin de stockage semble moins intéressante pour les élevages IED ayant par ailleurs l'obligation de couvrir leurs fosses. Elle nécessite aussi un volume de stockage supplémentaire, non compatible le plus souvent avec les ouvrages existants. Pour des réductions d'émissions d'ammoniac quasi-identiques, il est alors plus simple d'acidifier le lisier lors de l'épandage lui-même.

Celle-ci peut être économiquement rentable si elle est gérée par des ETA et/ou des CUMA (ce qui est le cas d'un bon nombre d'élevages en France) : en effet, seules des exploitations de taille conséquente pourraient investir dans cet équipement qui reste onéreux. L'obligation réglementaire d'injecter ou d'acidifier pour épandre sur prairies est une des principales raisons du succès de cette technique au Danemark. L'absence de cette disposition en France ne favorise pas la mise en œuvre de l'acidification par les éleveurs.

CONCLUSION

D'après la bibliographie, l'acidification est une technique intéressante pour réduire les émissions d'ammoniac par le bâtiment, lors du stockage et lors de l'épandage. Elle pose cependant des questions environnementales, de sécurité et économiques. L'incidence de nos conditions pédoclimatiques et de divers paramètres structurels de nos conditions de production nationales sur l'efficacité de ces techniques serait à approfondir pour mieux en appréhender le rapport coût/utilité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Baky A., 2018. Environmental assessment of slurry acidification technologies. Report from WP5, Baltic Slurry Acidification Project, 106 p.
- Birkmose T., Vestergaard A., 2013. Acidification of slurry in barns, stores and during application: review of Danish research, trials, experience, 15^{ème} conférence internationale RAMIRAN, Versailles, France.
- Birkmose T., 2016. Business economics and results from field trials with acidified slurry. Seminar on Slurry Acidification. Vejle, Denmark.
- Citepa, 2019. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France - format Secten, 450 p.
- Goujard O., Soufre et fertilisation des cultures, COMIFER.
- Degré A., Verhève D., Debouche C., 2001. Émissions gazeuses en élevage porcin et modes de réduction : revue bibliographique. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 5, 135-143.
- Edesi L., Talve T., Akk E., Vösa T., Saue T., Loide V., Vettik R., Plakk T., Tamm K., 2020. Effects of acidified pig slurry application on soil chemical and microbiological properties under field trial conditions. *Soil & Tillage Research*.
- Fanguero D., Hjorth M., Gioelli F., 2015. Acidification of animal slurry – a review. *J. Environ. Manage.*, 149, 46-56.
- Fanguero D., Pereira J. L. S., Macedo S., Trindade H., Vasconcelos E., Coutinho J., 2017. Surface application of acidified cattle slurry compared to slurry injection: Impact on NH₃, N₂O, CO₂ and CH₄ emissions and crop uptake. *Geoderma*, 306, 160-166.
- Fors, K., Adolfsson N., Bannbers H., Rodhe L., Strand L., Sindhøj E., Foged H.L., Tamm K., Peltonen S., Neumann S., Kazotnieks J., Siukscius A., Wardal W., Majchrzak M., 2019. Working environment and safety. Report from WP2, activity 5. Baltic Slurry Acidification Project, 83 pp.
- Gomez-Munoz, B., Case, S.D.C., Jensen, L.S. 2016. Pig slurry acidification and separation techniques affect soil N and C turnover and N₂O emissions from solid, liquid and biochar fractions. *J. Environ. Manage.*, 168, 236–244.
- Jacobsen B.H., 2017. Why is acidification of slurry a success only in Denmark? Transfer or environmental technology across borders. 21st International Farm Management Congress. Edinburgh, United Kingdom.
- Jonassen K., 2016. Ammonia emission reduction during in house slurry acidification. International seminar on slurry acidification. Vejle, Denmark.
- Kai P., Pedersen P., Jensen J.E., Hansen M.N., Sommer S.G., 2008. A whole-farm assessment of the efficacy of slurry acidification in reducing ammonia emissions. *Europ. J. Agronomy* 28, 148-154.
- Kučinskienė G., Titiškytė L., Lundin G., Strand L., Tamm K., Vösa T., Edesi L., Akk E., Talve T., Vettik R., Vulla K., Kierończyk M., Mazur K., Barwicki J., Wiśniewska R., Fligiel B., Sekowski M., Szymanski A., Peltonen S., Yrjölä K., Neumann S., Reinsch T., Kluß C., Zutz M., Kirsanova L., Šiukščius A., Šarauskas G., Šiukščiuvienė R., Gerulienė M., 2019. Report from WP4, activities 1-2. Baltic Slurry Acidification Project, 206 pp.
- Larsson E., 2018. Practical strategies for acidification of animal slurry in storage. Master's Thesis in Soil Science. Swedish University of Agricultural Sciences, 53 pp.
- Loide V., Saue T., Vösa T., Tamm K., 2019. The effect of acidified slurry on crop uptake and leaching of nutrients from a loamy topsoil. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 70, 31-38.
- Marques G., Fraga I., Pinto A., Surgy S., Coutinho J., Bezerra R. M. F., Fanguero D., 2014. Application of acidified slurry to soil: impact on soil microorganisms and enzymatic activities. VI Congreso Ibérico de la Ciencia del Suelo, Santiago de Compostela, Espagne.
- Nyord, T., Liu D., Eriksen J., Adamsen A. P. S., 2013. Effect of acidification and soil injection of animal slurry on ammonia emission. 15^{ème} conférence internationale RAMIRAN, Versailles, France.
- Park S. H., Lee B. R., Jung K. H., Kim T., H., 2018. Acidification of pig slurry effects on ammonia and nitrous oxide emissions, nitrate leaching, and perennial ryegrass regrowth as estimated by 15N-urea flux, *AJAS*, 31, 457 – 466.
- Pedersen P., 2004. Svovlsyrebehandling af gylle i slagtesvinestald med drænet gulv. Meddelelse 683, Landsudvalget for Svin, 12 pp.
- Pedersen I. F., Sørensen P., Rubaek G. H., 2017. Correction to: Cattle slurry acidification and application method can improve initial phosphorus availability for maize. *Plant and Soil*, 414, 143-148.
- Peltonen S., Yrjölä K., 2019. Guidelines and recommendations of slurry acidification techniques (SAT) in field. *Baltic Slurry Acidification*, 17 pp.
- Petersen S., Hutchings N.J., Hafner S.D., Sommer S.G., Hjorth M., Jonassen K.E.N., 2016. Ammonia abatement by slurry acidification: a pilot-scale study of three finishing pig production periods. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 216, 258-268.
- Pizzul L., Rodhe L., Burzynska I., Kieronczyk M., Mazur K., Neumann S., Tamm K., Jakovickis R., Sekowski M., 2018. Titration, buffer capacity and acid consumption of animal slurries in Baltic Sea Region countries. Research results. Report from WP2, activity 3. Baltic Slurry Acidification Project, 40 pp.
- Regueiro I., Coutinho J., Fanguero D., 2016a. Alternatives to sulfuric acid for slurry acidification: impact on slurry composition and ammonia emissions during storage. *Journal of Cleaner Production*. 131, 296 - 307.
- Regueiro I., Pociask M., Coutinho J., Fanguero D., 2016b. Animal slurry acidification affects particle size distribution and improves separation efficiency. *J. Env. Qual.*, 45, 1096 – 1103.
- Regueiro I., Siebert P., Liu J., Müller-Stöver D., Stoumann Jensen L., 2019. Acidified animal manure combined with a nitrification inhibitor as a starter P fertilizer for maize. *ManuREsource*, Hasselt, Belgique.
- Rodhe L., Casimir J., Sindhøj E., 2018. Possibilities and bottlenecks for implementing slurry acidification techniques in the Baltic Sea Region. Work package 2 Baltic Slurry Acidification Report. 98 pp.
- Rodhe L., Kalinowski M., Pizzul L., Ascue J., Tersmeden M., 2019. Micro-structural analysis of concrete after exposure to acidified and non-acidified slurry. Report from WP2 Activity 2. *Baltic Slurry Acidification*, 23 pp.
- Saue T., Tamm K., 2018. Main environmental considerations of slurry acidification. Report from WP5 Activity 2. *Baltic Slurry Acidification Project*, 49 pp.
- Sindhøj E., Rodhe L., 2013. Examples of implementing manure processing technology at farm level. Report 412. *Agriculture & Industry*. JTI. Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering, Uppsala, Sweden, 79 pp.
- Tamm K., Vettik R., 2019. Economic analysis of using of slurry acidification technologies in the BSR region. Report from WP5. *Baltic Slurry Acidification Project*, 233 pp.
- VERA, 2016. JH Forsuring NH₄⁺, 9 pp.
- Wagner C, Hafner S., Nyord T., Pacholski A., 2015. Impact of field acidification and application methods on ammonia emissions, yield and nitrogen efficiency of organic liquid manures. 15^{ème} conférence internationale RAMIRAN, Hamburg, Allemagne.
- Wang, K., Hung, D., Ying, H., Luo, H., 2014. Effects of acidification during storage on emissions of methane, ammonia, and hydrogen sulfide from digested pig slurry. *Biosys Eng*, 122, 23–30.
- Williams J., Edwards D., Chadwick D., Langley J., Misselbrook T., Gilhespy S., Impacts of acidification on ammonia emissions and crop available N supply following slurry and digestate applications. IFS Spring Webinar Series, United Kingdom.