

ACIDIFICATION DE LISIER ET DE DIGESTAT A L'EPANDAGE POUR REDUCTION DES PERTES D'AZOTE PAR VOLATILISATION

Influence des caractéristiques des lisiers et des digestats sur les modalités d'acidification

Action 1.2 – projet ELDA - Epandage de Lisier de porc et de Digestat Acidifiés (2023-2025)

Anne-Sophie Langlois, Marie-Line Daumer*, Mariana Moreira, Solène Lagadec, Stéphanie Sommier, Lucie Poupard -
Chambre d'agriculture de Bretagne, *INRAE unité OPAAL. Janvier 2026

L'acidification des lisiers et digestats à l'épandage, via l'ajout d'acide sulfurique concentré à 96%, permet de réduire les pertes d'azote par volatilisation. L'objectif du projet ELDA est de déterminer la faisabilité de cette technique dans le contexte breton. Cette action cherche à déterminer les quantités d'acide nécessaire pour acidifier les effluents ainsi que les caractéristiques des effluents influençant ces quantités, et d'évaluer les éventuelles variations de pH entre l'acidification et l'épandage en vue d'acidifier avant l'épandage. Les résultats mettent en évidence que les digestats nécessitent plus d'acide que les lisiers et que ces quantités sont influencées par NTK, NH_4^+ , TAC et TAC-FOS des effluents. De plus, une remontée du pH est constatée entre l'acidification et l'épandage ce qui impose d'épandre dans l'heure qui suit l'acidification pour les lisiers et dans les 5 heures pour les digestats.

1. Introduction

Le projet ELDA évalue la faisabilité de l'acidification des lisiers de porcs et des digestats de méthanisation, dans le contexte breton. L'objectif de cette technique est de réduire les émissions d'ammoniac tout en préservant l'azote de ces effluents d'élevage.

Cette technique est très largement utilisée au Danemark, où elle prend différentes formes. Elle peut être réalisée par l'ajout d'acide sulfurique (H_2SO_4) dans le lisier stocké sous les bâtiments, lesquels doivent être prévus ou adaptés pour cela. Elle peut être également mise en œuvre par l'ajout d'acide lors de l'épandage, l'acide étant alors transporté dans une cuve positionnée à l'avant du tracteur. Cette dernière soulève toutefois des enjeux importants en matière de sécurité notamment lors des déplacements sur la route. En effet, les risques que comporte le transport et la manipulation d'acide sulfurique concentré sur les routes sont au cœur des préoccupations évoquées lors des ateliers réalisés auprès des acteurs du monde agricole breton (action 2).

Les premiers essais réalisés au champ en contexte breton ont permis de soulever certaines problématiques (action 1.1) :

- La difficulté de prévoir la quantité d'acide nécessaire pour atteindre le pH cible (6,4 à l'épandage), très variable en fonction des lisiers et des digestats,
- La difficulté d'acidifier en une fois des quantités importantes de digestat à cause de la formation de mousse provoquée par l'acidification.

Face à ces difficultés et après échanges avec des acteurs du secteur, la possibilité d'acidifier en fin de stockage (et non plus sous les bâtiments ni au moment de l'épandage) a été évoquée comme une alternative. Ainsi, sur le terrain, l'acidification se ferait lors de la vidange de la fosse, dans une fosse tampon, avant transfert ou directement dans la tonne à lisier.

L'intérêt et la faisabilité de cette alternative étant difficiles à étudier en situation réelle sans étude préalable, une étude à l'échelle laboratoire a été réalisée. L'objectif de celle-ci est de :

- Déterminer les quantités d'acide nécessaires pour acidifier les effluents,
- Déterminer les caractéristiques des effluents qui influencent les quantités d'acide à ajouter,
- Evaluer les éventuelles variations de pH entre l'acidification lors de la vidange de la fosse et l'épandage.

2. Matériel et Méthode

2.1. Prélèvement des échantillons

Six échantillons de 10 L ont été prélevés dans des fosses extérieures de stockage de différentes exploitations bretonnes entre avril et mai 2024.

Ainsi, quatre échantillons sont des lisiers de porcs provenant de quatre élevages différents :

- Deux échantillons **A** et **B** de lisiers de porcs d'un élevage naisseur-engraisseur,

- Un échantillon **C** reconstitué avec 66% de lisier de truies et à 33% de lisier de porcs charcutiers,
- Un échantillon **D** contenant uniquement du lisier d'engraissement.

Les deux autres échantillons (**F1** et **F2**) sont constitués de digestat de méthanisation multi-intrant contenant 50% de lisier de porc et 25% de graisses d'industrie agro-alimentaire. Ils ont été prélevés la même journée dans la même fosse de stockage respectivement en début et en fin de vidange.

Les échantillons ont été apportés à l'unité OPAAL de l'INRAE dans les 24 à 48 heures après leurs prélèvements et conservés à 4°C jusqu'au début des suivis.

2.2. Suivis des expérimentations

Chaque effluent a été caractérisé avant et après le suivi en fonction des critères suivants : pH, MS (matière sèche), MV (matière volatile), NTK (azote total), NH_4^+ (azote ammoniacal), P (phosphore total), P dissous, TAC (titre alcalimétrique complet), et FOS (ou AGV : acides gras volatils). Le rapport NH_4^+/NTK a ainsi pu être calculé ; il permet de caractériser la part d'azote ammoniacal par rapport à l'azote total. La formule TAC-FOS a également été calculée. Elle permet d'anticiper s'il faudra augmenter ou diminuer les apports d'acide : plus le TAC-FOS est élevé, plus il sera nécessaire d'acidifier. En effet, le TAC caractérise le pouvoir tampon de l'effluent ; c'est la capacité de l'effluent à maintenir son pH durant l'acidification. S'il diminue, le pouvoir tampon baisse également. Le FOS participe à l'acidification de l'effluent par la production d'acides conjugués aux AGV. La différence entre le TAC et le FOS correspond alors à la part de pouvoir tampon restant, c'est-à-dire la capacité tampon encore disponible une fois neutralisée l'acidité déjà présente, liée aux AGV. A cause d'appareils hors-service, le COT (Carbone Organique Total) et le CT (Carbone Total) n'ont pas pu être dosés.

Les échantillons ont ensuite été acidifiés jusqu'à atteindre des pH cibles définis sur la base de la littérature (A. Langlois et al., 2021). Celle-ci préconise, dans le cas d'une acidification à l'épandage, un pH cible de 6,4. Toutefois, comme mentionné en introduction, dans le cadre de cette étude, l'acidification interviendrait lors du stockage, entre la vidange de la fosse et l'épandage. Or, une remontée du pH est attendue entre ces deux étapes. Afin de garantir un pH inférieur ou égal à 6,4 au moment de l'épandage, les pH cibles retenus ont donc été fixés à 5 et 6.

Les échantillons ont été acidifiés avec de l'acide sulfurique concentré à 96 % puis introduits dans des cellules en verre d'un litre. Des témoins sans acide ont également été réalisés pour chacun des échantillons. L'évolution du pH a été mesurée pendant 10 heures à température ambiante (entre 15 et 20°C) avec une mesure toutes les heures pour chaque échantillon témoin et acidifié.

2.3. Analyses statistiques

Les quantités d'acide nécessaire pour atteindre les pH cibles ont été modélisées par une courbe à l'aide d'une droite de régression linéaire ($R^2 > 0,9$) d'après les droites d'équations obtenues. Après élimination des valeurs aberrantes, la partie linéaire des droites représentant le rapport entre la quantité d'acide sulfurique ajoutée et le pH a été lissée. Ce lissage vise à compenser les variations de mesure liées à la difficulté d'homogénéiser le milieu de par la formation de la mousse.

Suite à cela, les caractéristiques des effluents ayant des effets significatifs ($p\text{-value} < 0,05$) sur la quantité d'acide nécessaire pour atteindre les pH cibles ont été statistiquement déterminés (méthode du plan d'expérience) et analysés à l'aide du logiciel Statgraphics 18.

3. Résultats et discussion

3.1. Caractérisation des effluents

Les lisiers B et C présentent des caractéristiques très proches, mais apparaissent atypiques de par leur faible taux de MS (tableau 1). Cela peut s'expliquer par le fait qu'ils proviennent d'une fosse peu voire pas agitée. Ce défaut d'agitation aurait entraîné une décantation, conduisant à une diminution de la MO et, par conséquent, à une baisse du P total en fond de fosse. Cela explique pourquoi le rapport NH_4^+/NTK est plus élevé pour ces échantillons que pour les autres. Pour rappel, la valeur de référence pour le rapport NH_4^+/NTK est autour des 70% (Levasseur et al., 2019).

Les digestats prélevés en début (F1) et en fin de vidange (F2) présentent des compositions très similaires. Par ailleurs, ils ont des concentrations en NTK, NH_4^+ et en MS plus élevées que les lisiers. TAC-FOS est également plus élevé ; cela signifie que les digestats (F1 et F2) auront besoin de plus d'acide pour atteindre les pH cibles.

Les échantillons A et F1, F2 présentent des rapports de NH_4^+/NTK très similaires mais différents pour leur TAC.

Tableau 1 : Caractéristiques des effluents prélevés avant acidification.

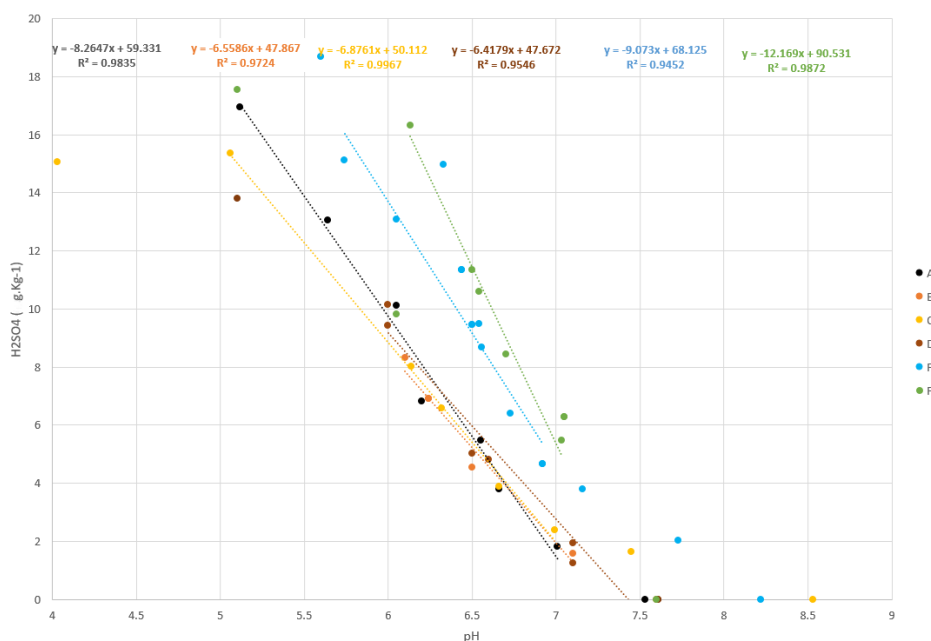
Id ⁰	pH	MS ¹ , g/kg	MV ² , g/kg	NTK ³ , g/kg	NH ₄ ⁺ ⁴ , g/kg	P ⁵ total, mg/kg	P dissous, mg/kg	TAC ⁶ , mg/kg	FOS ⁷ , mg/kg (eq^8 acide acétique)	NH ₄ ⁺ /NTK	TAC-FOS
A	7,5	36±1	23±1	3,3±0,1	2,2±0,1	800±30	8±1	11109	2364	0,67	8745
B	7,8	10±1	4±1	2,3±0,1	2,0±0,1	132±1	22±1	9101	1357	0,87	7744
C	8,5	12±2	4±1	2,4±0,1	2,1±0,1	198±12	30±1	9468	1366	0,87	8102
D	7,6	70±1	51±1	4,4±0,1	2,2±0,1	2245±30	53±1	12057	3326	0,50	8731
F1	8,2	64±9	43±2	6,1±0,1	4,0±0,1	1262±22	98±1	17364	3454	0,66	13910
F2	8,0	60±2	43±2	6,1±0,1	4,0±0,1	1002±20	91±1	17503	3376	0,66	14127

⁰Id = identifiant effluent ; ¹MS = matière sèche ; ²MV = matière volatile ; ³NTK = azote total ; ⁴NH₄⁺ = azote ammoniacal ; ⁵P = phosphore total ; ⁶TAC = titre alcalimétrique complet ; ⁷FOS = acides gras volatils ; ⁸eq = équivalents.

3.2. Quantité d'acide nécessaire pour atteindre les pH cibles

Lors de l'acidification, la formation de mousse peut atteindre des volumes de 5 à 10 fois le volume initial du lisier ou du digestat. Cette mousse, souvent très dense, peut persister pendant plusieurs heures. Cette formation rend très compliquée, même en agitant, l'obtention d'une mesure fiable du pH ainsi que l'arrêt précis de l'ajout d'acide au pH souhaité.

Pour compenser ce manque de précision, l'estimation de la quantité d'acide nécessaire a été calculée en lissant la partie linéaire des courbes obtenues à l'aide de la régression linéaire (figure 1). Cela permet de lisser l'erreur afin de recalculer la valeur de la quantité d'acide ajoutée pour atteindre le pH cible même si celui-ci n'était pas tout à fait atteint ou légèrement dépassé pendant l'expérimentation. Les courbes représentant la quantité d'acide ajoutée et les valeurs de pH atteintes, l'équation des droites de régression ainsi que le coefficient d'ajustement R² sont présentées dans la figure 1.

Figure 1 : Quantité d'acide (g de H₂SO₄ à 96%) par Kg de lisier ou de digestat pour atteindre les valeurs de pH.

Les quantités d'acide ont été déterminées à partir des droites d'équation présentées sur la figure 1. Pour les lisiers, les quantités d'acide nécessaire pour atteindre les pH cibles sont proches (moins de 10% d'écart d'un échantillon à l'autre). En revanche, pour les digestats, ces quantités sont plus élevées (plus de 20% d'écart) (tableau 2). Les points pour le pH 5 ne se situant pas dans la zone de linéaire n'ont pas été recalculés. Les quantités d'acide afin d'atteindre le pH 6,4 ont pu, quant-à-elles, être calculées. Ces résultats sont en accords avec le

constat émis à partir de TAC-FOS ; c'est-à-dire que les digestats nécessitent d'un apport d'acide plus important que les lisiers.

Ces résultats sont différents de la littérature sans explication ; une observation similaire est rapportée par Andersson & Delin (2026). En effet, la quantité d'acide à ajouter aux lisiers est 2 à 3 fois supérieure à celle indiquée dans la littérature pour des pH initiaux et finaux équivalents. L'explication de cette différence est rendue compliquée par le

fait que les caractéristiques des lisiers et digestats mentionnées dans la littérature ne sont expliquées que succinctement (Im et al., 2020) (A.-S. Langlois et al., 2025).

Tableau 2 : Quantité d'acide H₂SO₄ à 96% en g.Kg⁻¹ pour atteindre les valeurs cibles de pH.

pH/Id ⁰	A	B	C	D	F1	F2
6	10	9	9	9	14	18
6,4	6	6	6	7	10	13

⁰Id = identifiant effluent

3.3. Caractéristiques des effluents influençant la quantité d'acide à ajouter

L'analyse du plan d'expérience montre l'effet significatif (p-value < 0,05) de NTK, NH₄⁺, TAC et de TAC-FOS sur la quantité d'acide nécessaire à ajouter afin d'atteindre les pH 6 et 6,4 (tableau 3). Cela étant, la significativité de TAC-FOS peut être nuancée : puisque TAC est significatif, TAC-FOS l'est également.

Tableau 3 : Valeur des p-values des effets des caractéristiques des effluents sur la quantité d'acide à ajouter pour atteindre les valeurs cibles de pH (p-value < 0,05).

	pH 6,4	pH 6
pH	-	-
MS	-	-
MV	-	-
NTK	0,0151	0,0276
NH ₄ ⁺	0,0405	0,0395
P _{Total}	-	-
TAC	0,0174	0,0221
FOS	-	-
TAC-FOS	0,0186	0,0182

3.4. Variation du pH après acidification

Dans tous les échantillons, y compris les témoins sans ajout d'acide, une remontée du pH plus ou moins importante en fonction des effluents et du pH cible est constatée (Figure 2). Cependant, il est à noter que le témoin C ne présente pas de remontée du pH, ce qui peut s'expliquer par le fait que le pH initial de cet échantillon est déjà élevé. Par ailleurs, les échantillons acidifiés à un pH cible de 6 ne

dépassent pas un pH de 7 après 10 heures d'acidification, restant ainsi relativement proches du pH 6,4.

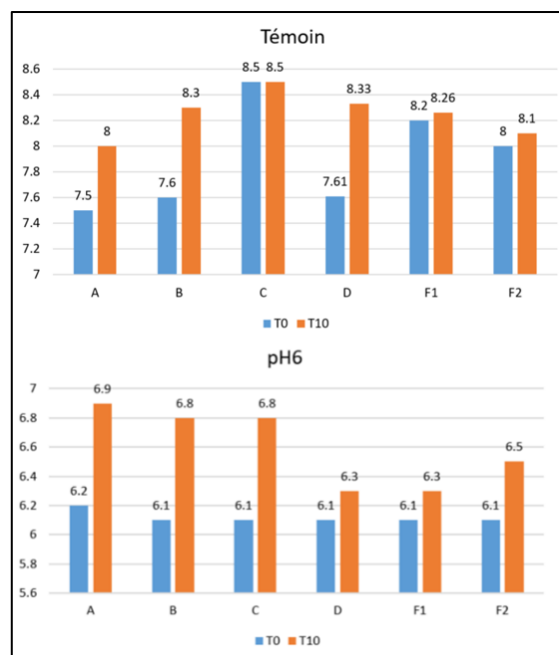


Figure 2 : Variation du pH des témoins et des échantillons acidifiés à pH 6, 10 heures après l'acidification.

L'évolution des pH heures par heures pour chaque échantillon à pH 6 est présentée dans la figure 3. Ainsi, le pH de l'échantillon A a dépassé 6,4 entre le début de l'acidification et la première heure. Pour l'échantillon B, ce dépassement a été observé entre la 5^e et la 6^e heure, et pour l'échantillon C entre la 3^e et la 4^e heure. L'échantillon D, quant à lui, n'a pas dépassé le pH 6,4 au cours des 10 heures suivant l'acidification. Enfin, le dépassement a eu lieu entre la 5^e et la 6^e heure pour F1, et entre la 8^e et la 9^e heure pour F2.

Ces résultats suggèrent que, pour les lisiers, l'épandage devrait idéalement être réalisé dans l'heure suivant l'acidification. Pour les digestats, il semblerait que l'épandage puisse être réalisé dans les cinq heures suivant l'acidification pour atteindre une réduction maximale des pertes par volatilisation.

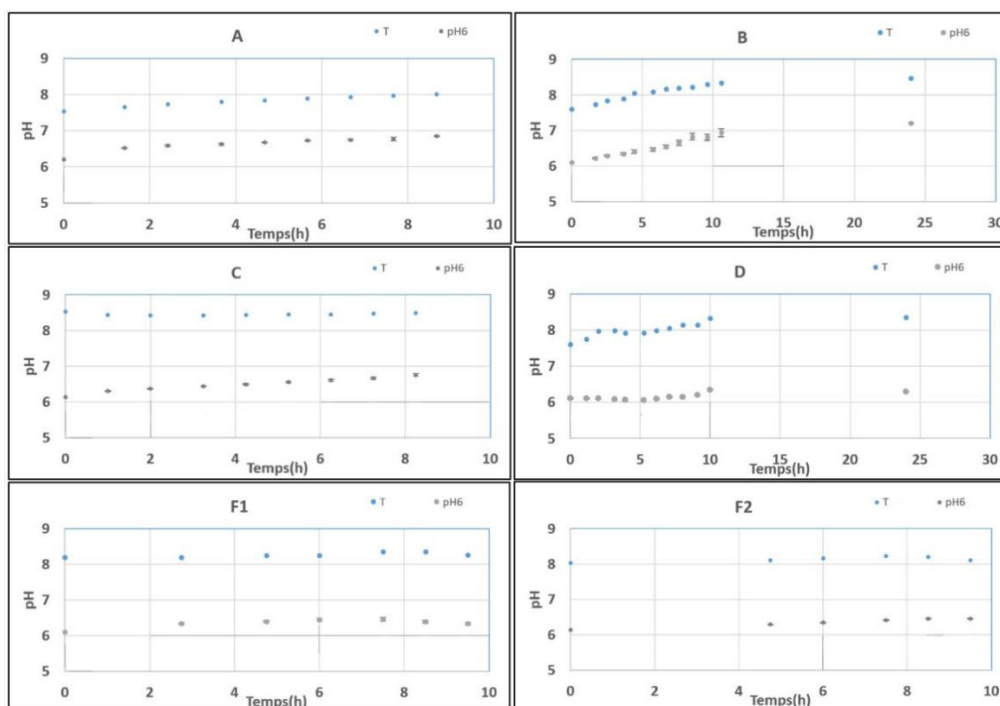


Figure 3 : Evolution des pH pour chaque échantillon d'effluent acidifié à pH 6 (pH6) ou sans ajout d'acide sulfurique (T).

3.5. Influence de l'acidification sur la composition des lisiers et digestats

Comme prévu, au regard des résultats de l'action 1.1 de l'étude, aucune volatilisation d'azote ammoniacal pendant le stockage des effluents

acidifiées a été observée (tableau 4). En effet, les quantités d'azote total et ammoniacal restent stables tout au long de l'acidification. Par ailleurs, les résultats de l'échantillon C_{pH6} ne sont pas cohérents. En effet, NH_4^+ ne peut pas être supérieur à NTK. Cela peut être dû à un problème lors des mesures.

Tableau 4 : Caractérisations des lisiers et digestats après acidification à pH 6.

	pH	MS	MV	NTK	NH_4^+	P dissous
A _{Témoin}	7.5	36±1	23±1	3.3±0.1	2.2±0.1	8
A _{pH6}	6.8	40±1	24±1	-	-	184
B _{Témoin}	7.8	10±1	4±1	2.3±0.1	2.0±0.1	22
B _{pH6}	7.2	17±1	9±1	2.2±0.1	2.0±0.1	56±1
C _{Témoin}	8.5	12±2	4±1	2.4±0.1	2.1±0.1	30
C _{pH6}	6.7	18±1	9±1	2.4±0.1	3.6±1	90±1
D _{Témoin}	7.6	75±1	54±1	4.4±0.1	2.2±0.1	53
D _{pH6}	6.3	78±1	27	4.4±0.1	2.0±0.1	348±1
F1 _{Témoin}	8.2	64±9	43±2	6.1±0.1	4.0±0.1	98
F1 _{pH6}	6.1	78±1	59±1	5.7±0.3	3.9±0.1	295±1
F2 _{Témoin}	8.0	60±2	43±2	6.1±0.1	4.0±0.1	91
F2 _{pH6}	6.4	75±2	56±2	6.1±0.1	4.1±0.1	236±1

L'augmentation de la MS observée durant l'acidification résulte des apports en MS de l'acide (figure 4).

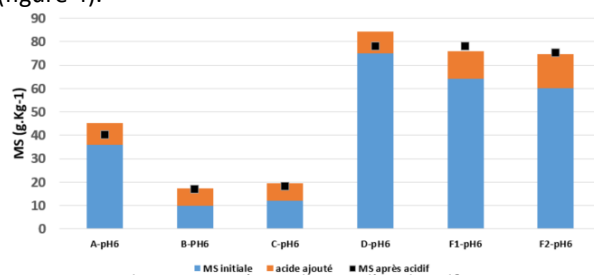


Figure 4 : Part de MS apportée par l'ajout d'acide sulfurique.

L'acidification permet d'augmenter de façon significative la concentration en P dissous (Figure 5).

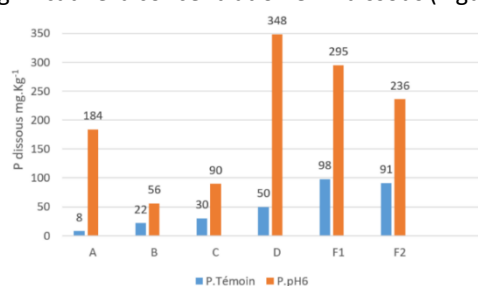


Figure 5 : Concentration finale en P dissous en mg.Kg⁻¹ après acidification à pH 6.

Il est possible de déterminer l'azote organique de ces échantillons en faisant la différence entre NTK et NH_4^+ ($\text{NTK}-\text{NH}_4^+$). Les mesures de NTK et de NH_4^+ avant et après acidification sont présentées dans le tableau 4. La significativité de l'azote organique n'ayant pas été mesurée, les quantités d'azote organique n'ont pas été calculées. Par ailleurs, les composés organiques azotés ne se dissolvent qu'à des pH très faibles. L'azote organique a donc très peu d'influence sur l'acidification dans ce contexte. En revanche, l'influence du TAC et du pH initial sur la baisse du pH d'effluents sont en accord avec la littérature (Finzi et al., 2024).

4. Conclusion

Les quantités d'acide nécessaire pour acidifier les effluents testés dans cet étude sont autour de 9 g.Kg⁻¹ ou 5 L/tonne pour les lisiers et entre 14 et 18 g.Kg⁻¹ ou 8 à 10 L/tonne pour le digestat. Ces quantités sont influencées par l'NTK, l' NH_4^+ , le TAC et le TAC-FOS des différents effluents. Les digestats

nécessitent des apports en acide plus importants que les lisiers, en raison de leur alcalinité plus élevée et donc de leur pouvoir tampon supérieur.

La remontée du pH observée entre l'acidification des effluents et l'épandage préconise d'épandre les lisiers dans l'heure suivant l'acidification et dans les 5 heures pour les digestats. Par ailleurs, compte tenu du caractère atypique des échantillons B et C, il apparaît que l'homogénéisation de la cuve est indispensable afin d'obtenir des résultats cohérents.

L'acidification des lisiers et digestats en fin de stockage présente un intérêt certain en termes de diminution de la volatilisation de l'ammoniac. Cette technique pose tout de même certaines questions de faisabilité notamment sur les quantités importantes d'acide à apporter.

Références bibliographiques :

- Andersson, K., & Delin, S. (2026). Increased nitrogen fertiliser value of cattle slurry by different slurry pre-treatments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 132(2), 18. <https://doi.org/10.1007/s10705-026-10469-1>
- Finzi, A., Heidarzadeh Vazifehkhoran, A., Dinuccio, E., Ambrosini, R., & Provolo, G. (2024). Acidification of livestock slurry and digestate to reduce NH_3 emissions : Predicting needed H_2SO_4 dosage and pH trends over time based on their chemical-physical composition. *Biosystems Engineering*, 240, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.02.012>
- Im, S., Mostafa, A., Shin, S.-R., & Kim, D.-H. (2020). Combination of H_2SO_4 -acidification and temperature-decrease for eco-friendly storage of pig slurry. *Journal of Hazardous Materials*, 399, 123063. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123063>
- Langlois, A., Guingand, N., Lagadec, S., Hanocq, D., Quideau, P., & Moreira, M. (2021, février). L'acidification du lisier : Une voie à explorer pour réduire les pertes d'azote de l'élevage porcin. 53es Journées de la recherche porcine, 1er-4 février 2021, Paris, p. 329-334. <https://hal.science/hal-04397107>
- Langlois, A.-S., Daumer, M.-L., Guingand, N., Sommier, S., & Lagadec, S. (2025, février). Influence des caractéristiques des effluents d'élevage sur les modalités d'acidification en vue de réduire la volatilisation d'ammoniac à l'épandage. IFIP. <https://hal.science/hal-05039007>
- Levasseur, P., Soulier, A., Lagrange, H., Trochard, R., Foray, S., Charpiot, A., Ponchant, P., & Blazy, V. (2019). Valorisation agronomique des effluents d'élevages de porcs, bovins, ovins, caprins, volailles et lapins. RMT « Elevages et Environnement ». https://www.rmtelavagesenvironnement.org/backoffice/uploads/Valorisation%20agronomique_rmt_enviro_web.pdf

CONTACTS

Chambre d'Agriculture de Bretagne
Mariana Moreira, Solène Lagadec, Anne-Sophie Langlois, Lucie Poupard

Le projet ELDA a bénéficié du financement du Conseil Régional Breton et a été labellisé par le RMT BOUCLAGE

