

Maîtrise de la gestion des fumiers de bovin avant méthanisation : un enjeu clé pour optimiser la production de biogaz

Ruben Teixeira Franco¹, Pierre Buffière¹, Rémy Bayard^{1,*}

(1) Université de Lyon, INSA Lyon, Laboratoire DEEP, EA7429, F-69621 Villeurbanne cedex, France

* Auteur correspondant : remy.bayard@insa-lyon.fr

RÉSUMÉ

Ce travail porte sur l'optimisation des pratiques de gestion des fumiers de bovin avant méthanisation dans l'objectif d'améliorer la conservation du potentiel bio-méthanogène. Différentes conditions de stockage ont été étudiées expérimentalement pendant 120 jours à l'échelle du laboratoire, en particulier le stockage aérobique ainsi que l'ensilage et le co-ensilage. Ces expériences ont permis de mettre en évidence la très mauvaise conservation du fumier de bovin frais dans les deux conditions de stockage. D'une part, le potentiel bio-méthanogène a été réduit d'environ 74 % pendant le stockage aérobique. D'autre part, les propriétés chimiques du fumier frais ont restreint la stabilisation apportée par l'ensilage, entraînant des pertes de 46 % de potentiel bio-méthanogène. Cependant, les essais de co-ensilage ont montré que le potentiel méthanogène des fumiers de bovin peut être mieux conservé par des conditions de stockage adaptées. Le co-ensilage avec de la paille de blé a ainsi permis de limiter la baisse du potentiel méthanogène entre 5 et 67 % et l'ajout de glucose ou d'amidon comme co-substrat d'ensilage a rendu les pertes négligeables en 120 jours de stockage. Le co-ensilage de fumier de bovin avec un co-substrat riche en sucres facilement biodégradables et à teneur en matière sèche élevée semble être la méthode la plus pertinente pour la préservation du potentiel énergétique de cette ressource avant méthanisation.

MOTS-CLÉS : déchet agricole, fumier de bovin, stockage, ensilage, méthanisation, potentiel bio-méthanogène

ABSTRACT

This work focuses on the optimization of cattle manure management practices before anaerobic digestion. Different storage conditions were studied for 120 days at the laboratory scale, notably open-air storage and ensiling (and co-ensiling), with the aim of improving the conservation of the biochemical methane potential. These experiments have highlighted the very poor preservation of fresh cattle manure. On the one hand, about 74% of the biochemical methane potential was lost during aerobic storage. On the other hand, chemical properties of fresh cattle manure restricted silage stabilization, resulting in 46% loss of biochemical methane potential. Co-ensiling trials showed that preservation of cattle manure can be achieved if proper storage practices are used. For co-silages with wheat straw the energy losses varied between 5-67%. With the addition of glucose or starch the energy losses were negligible after 120 days. Co-ensilage of cattle manure with a co-substrate rich in accessible sugars and high dry matter content seems to be the most appropriate method for preserving the energy potential of this resource before anaerobic digestion.

KEYWORDS: agricultural wastes, cattle manure, storage, ensiling, anaerobic digestion, biochemical methane potential

Maîtrise de la gestion des fumiers de bovin avant méthanisation : un enjeu clé pour optimiser la production de biogaz

Ruben Teixeira Franco, Pierre Buffière, Rémy Bayard

Introduction

La méthanisation est globalement reconnue comme une filière prometteuse de production d'énergie pour un développement durable. Dans ce procédé, la bioconversion des matières organiques complexes est réalisée par des micro-organismes anaérobies jusqu'à la production d'un biogaz majoritairement composé de CH_4 et CO_2 . Le biogaz peut être ensuite valorisé par injection dans le réseau de gaz, converti en électricité ou utilisé comme carburant. Actuellement, plus de 17 000 installations de production de biogaz sont opérationnelles en Europe (European Biogas Association, 2016). Pour ce qui concerne la France, plus de 500 méthaniseurs étaient en exploitation au début de l'année 2018, dont 300 installations de digestion à la ferme (ADEME, 2016 ; ATEE, 2018).

Étant donné que, théoriquement, de l'énergie peut être produite à partir de tous les types de résidus organiques biodégradables, il existe actuellement une grande diversification de gisements pour la méthanisation. Dans le contexte français, la digestion anaérobie est principalement considérée comme un procédé de valorisation des déchets et la proportion des cultures énergétiques dans l'approvisionnement des installations est limitée à 15 % du tonnage total brut des intrants selon la législation actuelle (Ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer en charge des relations internationales sur le climat, 2016).

Parmi les ressources disponibles, le fumier de bovin est une des plus importantes à mobiliser pour l'approvisionnement de la méthanisation agricole sur le territoire français. La production annuelle de ce résidu sur l'hexagone est d'environ 87 Mt_{MH} , ce qui représente un potentiel énergétique estimé à 28,3 TWh (Degueurce et al., 2016). Selon l'ADEME, les gisements de fumier de bovins potentiellement utilisables pour la production de biogaz en France pourraient atteindre environ 183 Mt par an d'ici 2030, ce qui pourrait représenter un potentiel énergétique annuel de 40,5 TWh (ADEME, 2013).

Malgré sa potentielle valorisation comme source d'énergie, le fumier de bovin est encore généralement considéré comme un déchet à valeur faible voire parfois négative. Les exploitants des installations de méthanisation prennent alors peu de précautions lors de sa manipulation et de sa gestion avant méthanisation. Comme d'autres déchets agricoles, le fumier de bovin n'est pas disponible en quantités constantes tout

au long de l'année. Pendant les mois d'hiver, le bétail est à l'étable et leurs déjections sont régulièrement récupérées avec la paille de la litière sous forme de fumier. Le reste de l'année, les conditions météorologiques permettent généralement de laisser le bétail paître normalement dans les prairies et les déjections ne sont alors pas récupérées. Par conséquent, afin d'assurer un approvisionnement constant en matières premières pour les digesteurs, le fumier de bovin doit être stocké de quelques jours jusqu'à plusieurs mois avant méthanisation. Le stockage aérobie (en tas ou en fosse) est la pratique la plus courante pour ce type de matière première. Pourtant, le contact avec l'air entraîne des émissions d'odeurs et d'ammoniac (Berg and Pzsziczki, 2006), ainsi qu'une forte biodégradation de la matière organique et la baisse du potentiel énergétique.

L'ensilage est généralement considéré comme le choix logique pour stocker la biomasse humide avant méthanisation. Ce processus est basé sur des processus biochimiques connus (Egg et al., 1993 ; McDonald et al., 1991 ; Teixeira Franco et al., 2016 ; Weinberg and Ashbell, 2003). Juste après le remplissage et la fermeture du silo, la flore microbienne consomme par respiration l'oxygène piégé dans le système afin de dégrader une petite partie de la matière organique facilement biodégradable du fumier. Une fois l'oxygène épuisé, l'ensilage passe à une phase de fermentation anaérobie, où en présence de sucres rapidement accessibles, les bactéries lactiques produisent du lactate et d'autres acides gras volatils (AGV) pendant plusieurs semaines, baissant la valeur de pH à environ 4. Le maintien de conditions anaérobies et d'un pH relativement faible entraînent des activités enzymatique et microbienne minimales jusqu'au déstockage. Lorsque l'ensilage est réussi, la conservation de la matière organique est optimisée et les pertes d'énergie sont négligeables (Herrmann et al., 2011).

Le succès du procédé d'ensilage est donc étroitement lié à plusieurs propriétés biochimiques de la matière première, telles que sa teneur en matière sèche (MS), sa teneur en sucres facilement accessibles (surtout des monomères solubles dans l'eau), son pouvoir tampon et sa microflore endogène (McDonald et al., 1991 ; Teixeira Franco et al., 2016). Certains gisements disponibles pour la méthanisation, tels que les fumiers de bovin, ne sont ainsi pas adaptés à l'ensilage à cause notamment de la présence de sucres solubles.

En conséquence, il existe encore aujourd'hui plusieurs interrogations sur les bonnes pratiques de stockage de ce gisement extrêmement important pour l'avenir de la méthanisation agricole. À notre connaissance, peu d'auteurs ont travaillé sur la comparaison de plusieurs méthodes de stockage de fumiers de bovin et son optimisation en vue de leur méthanisation.

Dans ce travail, l'optimisation de la gestion des fumiers de bovin avant méthanisation a été étudiée à travers des essais de stockage à l'échelle du laboratoire. Tout d'abord, une comparaison entre le stockage aérobique et l'ensilage a été effectuée. Ensuite, les conditions opératoires de stockage en ensilage ont été déterminées par une étude sur l'impact de l'ajout de co-substrats. Ces essais ont principalement été évalués par leur efficacité dans la conservation de la matière organique et le potentiel bio-méthanogène des substrats. Ainsi, ce travail vise à proposer des mesures pratiques pour une meilleure maîtrise de la gestion des fumiers de bovin, ce qui pourra avoir un fort impact sur l'énergie récupérée dans les installations de production de biogaz.

I. Matériels et méthodes

I.1 Substrats et conditions des essais

Les fumiers de bovin ont été collectés sur une exploitation agricole de la région Auvergne-Rhône-Alpes (Gaec Béreyziat, Les Teppes, 01340 Béréziat, France) et stockés à 4°C avant utilisation ultérieure. Dans cette ferme, le bétail est logé sous couvert dans des stalles libres, nourri d'un mélange d'ensilage de maïs et d'herbe, de luzerne et de pommes de terre. Le fumier est retiré plusieurs fois par jour à l'aide d'un racleur mécanique. Trois campagnes de prélèvements ont été réalisées pour l'ensemble des essais menés dans le cadre de cette étude.

Tableau I. Conditions des essais de stockage

Etude	Nom	Gisement	Type de stockage	Co-substrat (%) ^a			MS (%) ^b	MV (%) ^b
				Paille	Glucose	Amidon		
Modalité de stockage	F1-A	Fumier 1	Aérobique	-	-	-	12,8±0,1	10,2±0,1
	F1-E	Fumier 1	Ensilage	-	-	-		
Ajout de co-substrats	F1+P	Fumier 1	Ensilage	9,1	-	-	18,8±0,4	15,9±0,3
	F2+P	Fumier 2	Ensilage	11,9	-	-	19,2±0,1	16,6±0,1
	F3+P	Fumier 3	Ensilage	7,0	-	-	16,3±0,4	14,2±0,4
	F2+P+G	Fumier 2	Ensilage	11,9	12,4	-	24,9±1,4	22,6±2,8
	F3+P+G	Fumier 3	Ensilage	7,0	10,0	-	15,3±0,3	14,0±0,3
	F3+P+A	Fumier 3	Ensilage	7,0	-	5,3	20,4±0,1	18,4±0,1

Note : MS = Matière Sèche ; MV = Matière Volatile ;

^a % massique de fumier de bovin frais ; ^b % massique de gisement + co-substrats

Les conditions des expériences ainsi que les caractéristiques des substrats sont résumées dans le tableau I. L'étude de la modalité de stockage (aérobique : à l'air libre ou confiné : ensilage) a été seulement conduite avec le fumier 1. En revanche, l'ensemble des fumiers collectés (de 1 à 3) ont subi l'étude de l'impact de co-substrats sur l'efficacité du co-ensilage. Les co-substrats utilisés ont été la paille de blé, le glucose et l'amidon. D'une part, l'ajout de paille de blé a été testé pour évaluer l'impact de la teneur en matière sèche. D'autre part, le glucose et l'amidon ont été utilisés comme molécules modèles de stimulants de fermentation. Le glucose simule l'utilisation d'un co-substrat riche en sucres solubles et l'amidon simule l'utilisation d'un co-substrat riche en amidon en application réelle.

I.2 Approche expérimentale

Les essais de préservation de la biomasse sont réalisés à l'échelle de laboratoire dans des mini-silos en plastique étanches d'un volume utile de 3,5 l équipés d'une sortie de gaz. Les silos sont remplis jusqu'à 2,55 l avec des matières premières à une densité apparente de 0,7 kg/l. Du gravier est utilisé pour remplir le volume restant, en utilisant une membrane géotextile pour le séparer de la biomasse. Pour les essais d'ensilage, les silos sont fermés avec un couvercle en plastique et leur étanchéité à l'air renforcée avec un joint silicone. Pour le stockage aérobique, les silos sont laissés ouverts à l'air. Ensuite, les silos sont pesés et stockés pendant 120 jours dans une pièce thermostatée à 25±2°C.

I.3 Procédure de prélèvement et analyses

Lorsque la durée de stockage est atteinte, les silos sont ouverts et pesés pour déterminer les pertes de matière humide (MH) et de matière volatile (MV). L'ensemble de l'échantillon

présent dans le silo est collecté, puis mélangé manuellement pour homogénéisation et deux échantillons sont prélevés. L'un est utilisé pour des analyses de MS/MV et potentiel bio-méthanogène (PBM) sur la matière brute. L'autre est mis en contact avec de l'eau afin de mesurer le pH. Ce test de lixiviation est effectué avec un rapport eau/MS de 10 : 1 pendant 2 h sous une agitation constante par retournement (10 rotations/min). Une procédure d'échantillonnage et d'analyse identique est effectuée pour les matières avant stockage.

La détermination de la teneur en MS pondérale est effectuée par pesée différentielle, avant et après séchage dans une étuve à 105°C pendant 24 heures. Ensuite, la teneur en MV est déterminée par calcination dans un four thermostaté à 550°C pendant 2 heures, par pesée différentielle. Le pH est mesuré par un appareil Consort C3020 avec une électrode SPI0B.

Les essais PBM sont réalisés dans une pièce thermostatée à 35°C, en utilisant des flacons en verre de 2 l. Les flacons sont remplis avec 5 g de MV d'échantillon, inoculum afin de maintenir un rapport de $MV_{\text{substrat}}/MV_{\text{inoculum}}$ de 0,5 et un certain volume de solution minérale pour atteindre 60 % du volume total du flacon. L'inoculum utilisé est une boue digérée provenant de la station d'épuration des eaux usées de La Feysine, Lyon, France. La solution minérale, qui contient des éléments essentiels au développement microbien tels que certains métaux afin d'éviter des carences en éléments spécifiques et confère également à la solution un pouvoir tampon pour réduire les éventuels écarts de pH, a été préparée conformément aux recommandations de la norme internationale ISO 11734:1995 (1995).

Une fois remplis, les réacteurs sont purgés avec un mélange N_2/CO_2 (80/20 %V) pendant environ 5 minutes, puis hermétiquement fermés et ensuite incubés à 35°C. Des témoins négatifs ayant uniquement de l'inoculum et de la solution minérale sont aussi préparés pour chaque série d'essais, de façon à corriger le PBM à partir de la production résiduelle de méthane de l'inoculum. Tous les tests sont réalisés en triplicata.

La production de biogaz est déterminée par des mesures de pression avec un manomètre de précision Digitron. Le biogaz est libéré lorsque la pression dépasse 1200 hPa. La composition du gaz est analysée par micro-chromatographie gazeuse couplée avec un détecteur par conductivité thermique (GC-TCD), Agilent 3000. Des colonnes Molsieve 5A (14 m de longueur, taille des pores : 5 Å) et Poraplot A (10 m de longueur, 0,320 mm de diamètre interne) sont utilisées comme phases stationnaires pour la GC-TCD, avec de l'argon et de l'hélium comme gaz vecteurs, respectivement. La production et la composition du biogaz sont déterminées au minimum 7 fois au cours de l'incubation. Le PBM est considérée comme atteint lorsque la production quotidienne de méthane représentait moins de 1 % du volume total de méthane produit. Dans son ensemble, notre protocole de mesure suit les recommandations du groupe de travail international sur l'harmonisation des protocoles de potentiel bio-méthanogène (Holliger et al., 2016).

Ces essais ont fait partie d'un programme expérimental plus vaste réalisé dans le cadre d'une thèse de doctorat (Teixeira Franco, 2017), où une description de cette méthodologie est présentée plus en détail.

2. Résultats et discussion

2.1 Modalité de stockage : aérobie vs. ensilage

Les résultats pour les essais de modalité de stockage sont présentés dans la figure 1.

Premièrement, il est possible d'observer une augmentation du pH des substrats pendant le stockage, figure 1(A). Ce phénomène est particulièrement évident pour le stockage aérobie (F1-A), pendant lequel le pH de la biomasse a augmenté de 7,9 jusqu'à 9,8 après 120 jours. Par conséquent une activité aérobie s'est produite, liée à la présence de populations microbiennes aérobies, conduisant à la biodégradation partielle de la matière organique. Pour les essais en conditions d'ensilage, le pH de la matière (F1-E) a varié entre 7,9 et 8,4. Cette dernière valeur est très éloignée des consignes pour des ensilages typiques (pH autour de 4,0), ce qui indique que l'accumulation d'acides n'a pas eu lieu. L'absence de sucres solubles ainsi qu'une concentration importante en composants tampons basiques peut expliquer le manque d'acidité de la matière ensilée. Ce résultat indique que le fumier de bovin frais n'est pas un gisement dont les caractéristiques physico-chimiques ne sont pas adaptées pour le stockage en mode confiné.

Les résultats obtenus pour la conservation de la matière organique et du PBM au cours du stockage corroborent ces dernières observations, figure 1(B). D'une part, le taux de conservation de la MV après 120 jours a été d'environ 47 % pour le stockage aérobie et 60 % pour l'ensilage, confirmant l'hypothèse d'une activité accrue de la microflore aérobie. L'écart entre les modes de stockage a été encore plus évident concernant la préservation énergétique. En effet, la matière stockée 120 jours en présence d'air a seulement conservé 26 % de son PBM original, tandis que pour l'ensilage le taux de conservation a été de 54 %. Par suite, ce résultat suggère que l'activité biologique aérobie induit des pertes plus élevées que celles observées lors d'un stockage en conditions d'ensilage. La perte énergétique au cours de l'ensilage reste bien trop élevée pour considérer cette condition de stockage du fumier comme satisfaisante. Ceci est lié à l'absence d'acidification pendant la période de stockage. En absence d'une acidification significative, les micro-organismes anaérobies (e.g. méthanogènes) sont actifs. De plus, le gisement testé avait une faible teneur en MS (tableau 1) ayant pour impact l'augmentation de la l'activité microbienne. Par conséquent, l'ensilage n'était pas stabilisé de façon anaérobie et des pertes élevées de MV et d'énergie ont été provoquées par la production de biogaz pendant le stockage.

2.2 Essais de co-ensilage : impact de l'ajout de co-substrats

Lors des essais précédents, deux des principaux problèmes liés à la conservation de fumier de bovin étaient la faible teneur en MS du gisement et l'absence de substrats facilement accessibles comme les sucres solubles pour la fermentation lactique. Ainsi, le co-ensilage de fumier de bovin avec plusieurs co-substrats a été étudié afin d'optimiser la conservation énergétique de la matière première pendant le stockage de longue durée. D'une part, l'ajout de paille de blé a été utilisé pour réduire la disponibilité en eau des fumiers. D'autre part,

le glucose et l'amidon ont été testés comme sources indirectes d'acidification. Ces deux derniers composés sont des produits à haute valeur ajoutée et ont été testés comme molécules modèles d'un co-substrat réel. Par exemple, l'utilisation du glucose peut être remplacée sur le terrain par un substrat à forte teneur en sucres solubles, comme la pulpe de betterave ou autres résidus de l'industrie sucrière.

L'impact de l'ajout de co-substrats sur la valeur du pH des fumiers de bovin avant et après 120 jours d'ensilage est présenté sur la figure 2.

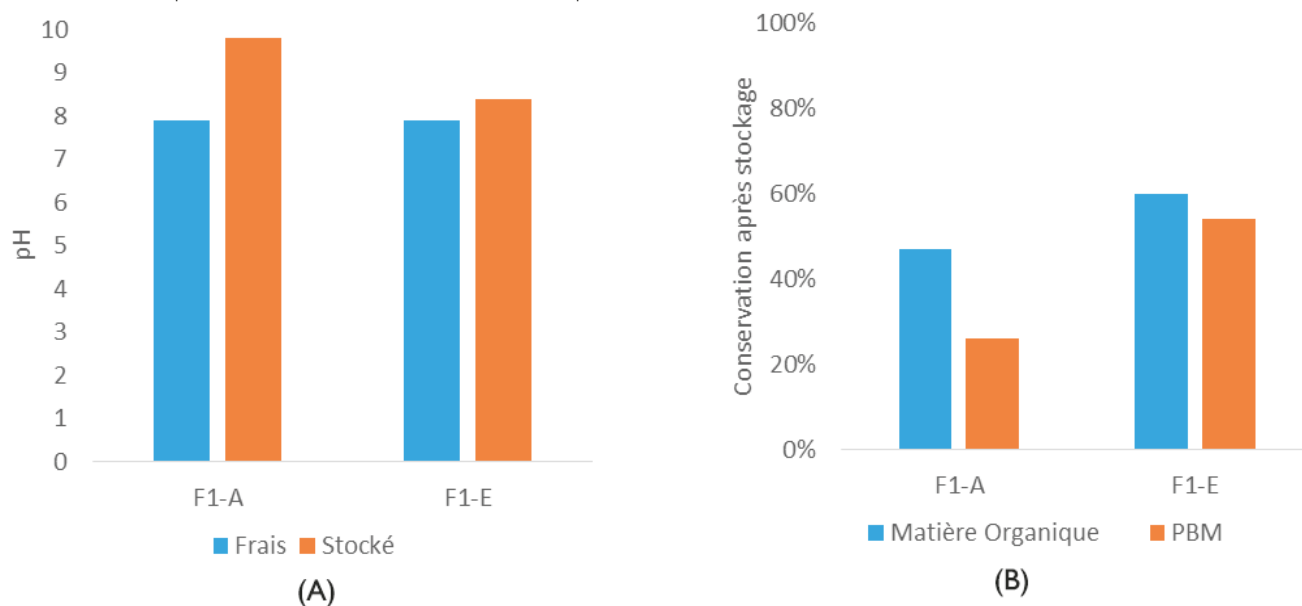


Figure 1. (A) pH avant et après stockage de fumier de bovin frais. (B) Conservation de la matière organique et potentiel bio-méthanogène après 120 jours de stockage de fumier frais.

Le bilan PBM tient compte des pertes de MV pendant stockage. F1-A = Fumier 1 en stockage aérobie ; F1-E = Fumier 1 ensilé

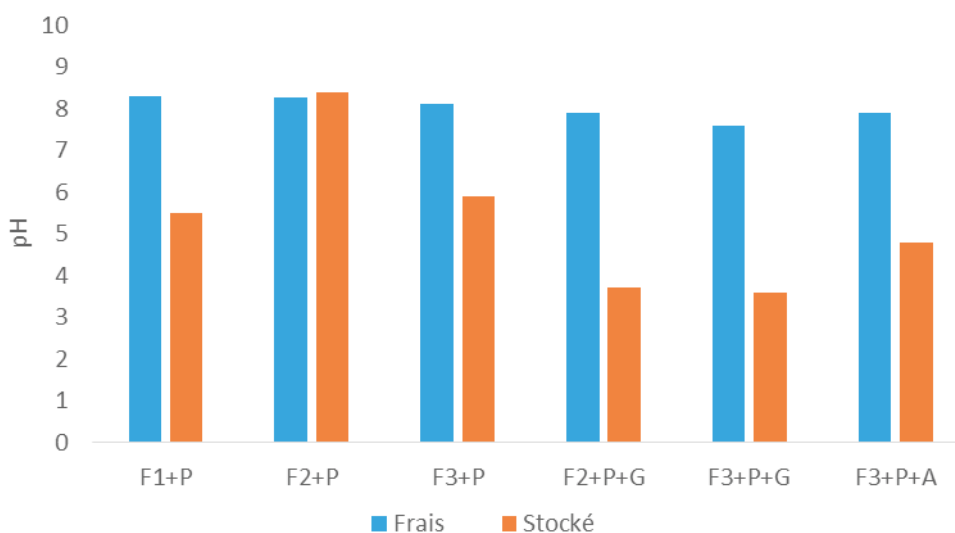


Figure 2. pH avant et après 120 jours co-ensilage.

F1+P = Fumier 1 avec paille de blé ; F2+P = Fumier 2 avec paille de blé ; F3+P = Fumier 3 avec paille de blé ; F2+P+G = Fumier 2 avec paille de blé et glucose ; F3+P+G = Fumier 3 avec paille de blé et glucose ; F3+P+A = Fumier 3 avec paille de blé et amidon

L'ajout de paille de blé a eu des impacts différents sur la fermentation selon le gisement étudié. Pour le fumier 1 (F1+P), le pH est passé de 8,3 avant stockage à 5,5 après 120 jours de co-ensilage. Une tendance similaire a été obtenue pour le fumier 3 et paille de blé (F3+P), avec un pH de 5,9 après stockage. Cela indique une fermentation et une accumulation d'acides organiques dans le co-ensilage. Étant donné que la paille de blé est principalement composée de fibres, son ajout ne contribue pas à l'augmentation de la teneur en sucres simples dans les matières premières. Par conséquent, l'acidification de l'ensilage doit être le résultat de l'impact de la paille de blé sur l'augmentation de la MS et ainsi sur la limitation de l'activité méthanogène pendant le stockage anaérobie. Par ailleurs, les valeurs du pH des matières stockées sont supérieures à celles obtenues par d'autres auteurs pour des ensilages efficaces (Desta et al., 2016 ; Herrmann et al., 2015, 2011 ; McEniry et al., 2014 ; Pakarinen et al., 2011). En conséquence, une fermentation secondaire a dû avoir lieu pour les co-ensilages de fumier de bovin, en raison d'une activité clostridiale indésirable. Cette fermentation clostridiale saccharolytique correspond essentiellement à la consommation de sucres solubles et d'acide lactique comme source d'énergie par des voies similaires, produisant non seulement de l'acide butyrique mais aussi du dioxyde de carbone et de l'hydrogène (McDonald et al., 1991), conduisant à des pertes de MV et d'énergie. De plus, l'activité clostridiale est associée à des pertes d'acidité. Ceci s'explique par le fait que l'acide butyrique est un acide plus faible que l'acide lactique et qu'une seule mole de butyrate est produite à partir de deux moles de lactate (McDonald et al., 1991).

En revanche, le pH du fumier 2 co-ensilé avec paille de blé (F2+P) est resté stable pendant le stockage (8,3-8,4). Cela montre que la paille de blé ne peut pas être considérée comme un atout certain pour la conservation de biomasse ensilée. Ces résultats contradictoires peuvent être expliqués par des différences dans les populations bactériennes (Manyi-Loh et al., 2016), lesquelles varient pour le fumier selon, par exemple, l'alimentation du bétail ou la saison de l'année (Marañón et al., 2006). À titre d'exemple, le fumier 1 a été collecté en mars 2016, le fumier 2 en juin 2016 et le fumier 3 en octobre 2016. Ainsi, il est possible que l'activité de la population méthanogène dans le fumier 2 était prédominante ou simplement supérieure à celle des fumiers 1 et 3. Dans ce cas, même si des AGV étaient encore produits, ils étaient rapidement transformés en biogaz, empêchant l'acidification et la préservation de l'énergie.

Le co-ensilage de fumier de bovin avec de la paille de blé et du glucose a conduit à une acidification importante. En effet, le pH était 7,6-7,9 pour les gisements F2+P+G et F3+P+G, diminuant à 3,6-3,7 après 120 jours de co-stockage. Le fait que le pH soit aussi faible indique que l'acide lactique a été produit en grande quantité (ce que nous avons mesuré) au début de l'ensilage et que l'activité microbienne a été arrêtée, empêchant ainsi la fermentation clostridienne. De plus, cela montre que les fumiers de bovin frais ont une forte

concentration de bactéries lactiques. Par conséquent, l'absence de sucres solubles dans les matières premières est le principal obstacle à la conservation des fumiers de bovin par ensilage.

L'ajout d'amidon (F3+P+A) a également amélioré l'acidification du fumier de bovin avec de la paille de blé. En effet, pour cet essai le pH après co-ensilage a été de 4,8. Cela suggère que l'amidon a été utilisé comme substrat pour la production d'AGV. Cependant, le niveau de fermentation pour F3+P+A a été inférieur à celui des essais avec du glucose, sans doute parce que l'hydrolyse de l'amidon a limité la vitesse de production des acides organiques.

Les résultats illustrés sur la figure 3 montrent la forte corrélation entre l'acidification de la biomasse et la préservation de la matière organique et du PBM pendant le stockage anaérobie.

L'ajout de paille de blé a amélioré la performance d'ensilage des fumiers 1 et 3. Pour ces deux essais, non seulement la conservation de matière organique a été supérieure à 92 %, mais aussi plus de 95 % du potentiel bio-méthanogène a été sauvegardé après 120 jours de co-ensilage. Ces résultats sont remarquables pour une matière première qui n'est pas adaptée aux conditions d'ensilage. De plus, cela indique qu'un pH d'environ 5,5-5,9 peut être suffisant pour empêcher une activité méthanogène significative pendant le stockage à long terme de fumiers de bovin (à environ 20 % de MS). En revanche, des pertes importantes se sont produites pour le fumier 2 avec seulement l'ajout de paille de blé. Pour cette condition, 42 % et 67 % de sa matière organique et de son PBM ont été perdus après 120 jours, respectivement. Ceci met en évidence l'importante activité des micro-organismes acétogènes et méthanogènes en ensilage pour des conditions de pH neutre.

La qualité de l'ensilage des fumiers de bovins a été améliorée grâce à l'utilisation de sources indirectes d'acidification. Ces résultats illustrent l'efficacité de la fermentation lactique dans la conservation anaérobie de la matière et de son potentiel énergétique pour des longues durées. Notamment, le co-ensilage avec du glucose et de la paille de blé a présenté d'excellents résultats. Pour le fumier 2 (F2+P+G), 95 % de la MV d'origine a été conservée et aucune perte de PBM n'a été observée à la fin des 120 jours de co-stockage. Concernant le F3+P+G, 12 % de la matière organique a été perdue après co-ensilage. Malgré cela, le PBM est resté stable pendant les 120 jours. Cette différence peut être expliquée par les différents mécanismes existants pour la fermentation lactique. Contrairement aux bactéries homo-fermentaires, les hétéro-fermentaires dégradent des sucres simples pour la production non seulement d'acide lactique, mais aussi de CO₂ et H₂O. Ainsi, il est probable que le fumier 3 ait eu des populations hétéro-fermentaires en concentration supérieure par rapport au fumier 2.

À l'image de l'utilisation de glucose, l'essai avec ajout d'amidon montre des taux de biodégradation de la matière organique

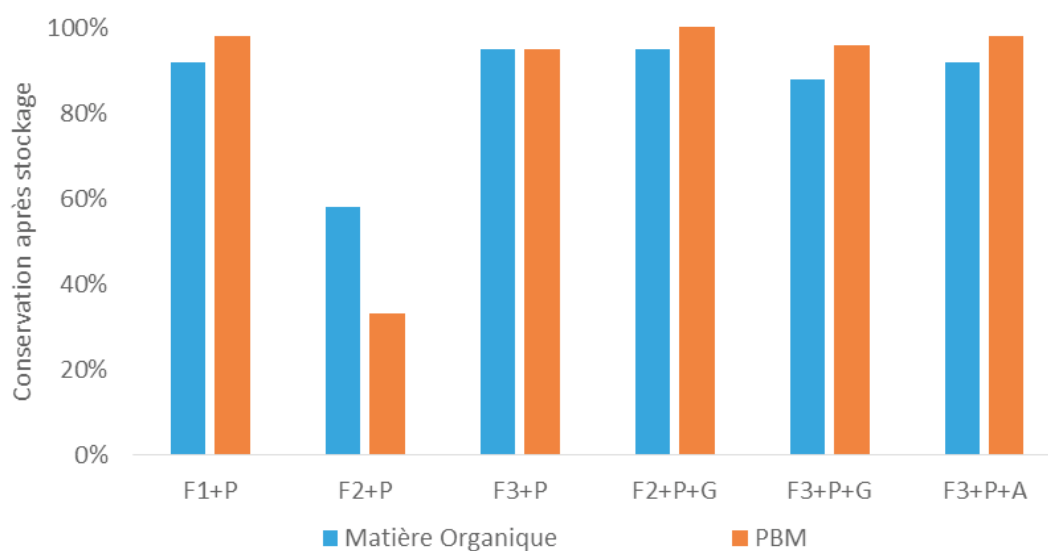


Figure 3. Conservation de la matière organique et potentiel bio-méthano-gène après 120 jours de co-ensilage.

F1+P = Fumier 1 avec paille de blé ; F2+P = Fumier 2 avec paille de blé ; F3+P = Fumier 3 avec paille de blé ; F2+P+G = Fumier 2 avec paille de blé et glucose ; F3+P+G = Fumier 3 avec paille de blé et glucose ; F3+P+A = Fumier 3 avec paille de blé et amidon. Le bilan PBM tient compte les pertes de MV pendant stockage.

très faibles (environ 9 %). Par suite, à la fin du stockage la totalité du potentiel bio-méthano-gène a été conservée pour la condition F3+P+A (variation non significative). Cela montre que des sucres plus complexes peuvent être utilisés en combinaison avec le fumier pour l'acidification de la biomasse, entraînant des pertes minimales d'énergie après 120 jours de co-stockage.

Conclusions

Les conditions de stockage généralement mises en œuvre par les agriculteurs pour le stockage temporaire des déchets agricoles comme le fumier de bovin se fait généralement au contact de l'air. Cependant, les résultats de cette étude montrent que le *stockage aérobie n'est pas une option optimale* en vue de la valorisation de ces ressources par méthanisation. Cela signifie que le stockage en tas, en fosse ou tout autre type de modalité qui favorise le contact de la biomasse avec de l'air sont à proscrire.

L'*ensilage* est bien plus adapté pour conserver la biomasse humide à long terme, car il *peut éviter* la réduction du potentiel biométhano-gène et l'*émission de polluants* dans l'atmosphère si des conditions favorables sont adoptées. Cependant, les propriétés physico-chimiques des fumiers de bovin frais inadaptées à l'ensilage limitent leur stockage sur de longues durées.

L'utilisation d'autres co-substrats riches en sucres favoriserait la mise en place de conditions favorables à l'ensilage du fumier de bovin. Bien que l'ajout de paille de blé ne puisse pas être proposé comme étant une solution parfaite pour

la conservation du fumier pendant le stockage, *son utilisation diminue la teneur en humidité* et permet une meilleure *tenue mécanique* des silos horizontaux, réduisant ainsi les risques de production d'un *effluent liquide* pendant l'ensilage des fumiers/lisiers de très faible teneur en MS. Le résultat le plus marquant de notre étude est que l'ajout de *sucres accessibles* pour stimuler la fermentation a été une *méthode efficace* pour conserver l'intégralité du potentiel énergétique des fumiers de bovin après de longues périodes de co-stockage.

Tout bien considéré, le *co-ensilage de fumier de bovin avec un co-substrat riche en sucres accessibles* (glucose, amidon, etc.) et à teneur en matière sèche élevée semble être la méthode la plus pertinente pour la *préservation du potentiel bio-méthano-gène* de cette ressource avant méthanisation.

Références bibliographiques

- ADEME (2016). Les avis de l'ADEME : Méthanisation.
- ADEME (2013). French Biomethane Roadmap and Proposed Action Plan for the Period up to 2030.
- ATEE Club biogaz (2018). Observatoire du biogaz en France. <http://atee.fr/biogaz/observatoire-du-biogaz-en-france>
- Berg W., Pazsiczki I. (2006). Mitigation of methane emissions during manure storage. Int. Congr. Ser., 1293, p. 213-216. <https://doi.org/10.1016/j.ics.2006.02.050>
- Degueurce A., Capdeville J., Perrot C., Bioteau T., Martinez J., Peu P. (2016). Fumiers de bovins, une ressource à fort potentiel pour la filière de

- méthanisation en France ? *Sci. Eau. Territ.*, 24, p. 1-9. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01308310/document>
- Desta S.T., Yuan X., Li J., Shao T. (2016). Ensiling characteristics, structural and nonstructural carbohydrate composition and enzymatic digestibility of Napier grass ensiled with additives. *Bioresour. Technol.*, 221, p. 447-454. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.068>
- Egg R.P., Coble C.G., Engler C.R., Lewis D.H. (1993). Feedstock storage, handling and processing. *Biomass and Bioenergy* 5(1), p. 71-94. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(93\)90009-5](https://doi.org/10.1016/0961-9534(93)90009-5)
- European Biogas Association (2016). 6th Edition of the Statistical Report of the European Biogas Association.
- Herrmann C., Heiermann M., Idler C. (2011). Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops. *Bioresour. Technol.*, 102(8), p. 5153-5161. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.012>
- Herrmann C., Idler C., Heiermann M. (2015). Improving aerobic stability and biogas production of maize silage using silage additives. *Bioresour. Technol.*, 197, p. 393-403. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.114>
- Holliger C., Alves M., Andrade D., Angelidaki I. et al. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Sci. Technol.*, 74(11), p. 2515-2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- ISO 11734:1995 (1995). Water quality - Evaluation of the "ultimate" anaerobic biodegradability of organic compounds in digested sludge - Method by measurement of the biogas production.
- Manyi-Loh C.E., Mamphweli S.N., Meyer E.L., Makaka G., Simon M., Okoh A.I. (2016). An overview of the control of bacterial pathogens in cattle manure. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 13(9), 843. <https://doi.org/10.3390/ijerph13090843>
- Marañón E., Castrillón L., Fernández J.J., Fernández Y., Peláez A.I., Sánchez J. (2006). Anaerobic mesophilic treatment of cattle manure in an upflow anaerobic sludge blanket reactor with prior pasteurization. *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 56(2), p. 137-143. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464448>
- McDonald P., Henderson A.R., Heron S.J.E. (1991). *The Biochemistry of Silage* (Second Edition). Marlow, Bucks, UK, Chalcombe Publications, 340 p.
- McEniry J., Allen E., Murphy J.D., O'Kiely P. (2014). Grass for biogas production: The impact of silage fermentation characteristics on methane yield in two contrasting biomethane potential test systems. *Renew. Energy*, 63, p. 524-530. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.052>
- Ministère de l'Environnement de l'Energie et de la Mer en Charge des Relations Internationales sur le Climat (2016). Décret n° 2016-929 du 7 juillet 2016 pris pour l'application de l'article L. 541-39 du code de l'environnement. France. <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2016/7/7/2016-929/jo/texte>
- Pakarinen A., Majjala P., Jaakkola S., Stoddard F.L., Kymäläinen M., Viikari L. (2011). Evaluation of preservation methods for improving biogas production and enzymatic conversion yields of annual crops. *Biotechnol. Biofuels*, 4(20), 13 p. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-4-20>
- Teixeira Franco R. (2017). Optimisation des pratiques de gestion des déchets agricoles en lien avec leur valorisation par méthanisation. Thèse, INSA Lyon, Université de Lyon. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01692751/>
- Teixeira Franco R., Buffière P., Bayard R. (2016). Ensiling for biogas production: Critical parameters. A review. *Biomass and Bioenergy*, 94, p. 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.08.014>
- Weinberg Z.G., Ashbell G. (2003). Engineering aspects of ensiling. *Biochem. Eng. J.*, 13(2-3), p. 181-188.