

Extension du développement de la biométhanisation en voie sèche en container maritime avec recirculation des percolats

Ing. S. GRODENT
Ir C. CHARLIER
GRAMME – Liège

La biométhanisation constitue une filière d'avenir. Pour de petites exploitations générant du fumier, une solution de biométhanisation en voie sèche réalisée à partir de container maritime a été imaginée. Pour ce type de digestion, la gestion des percolats issus de la digestion se révèle déterminante pour optimiser la production. Ce travail vise à mieux cerner l'importance de cette gestion, d'une part théoriquement sur une unité à grande échelle et d'autre part pratiquement grâce à des tests réalisés sur une unité de laboratoire.

Mots-clefs : méthanisation sèche, container, recirculation des percolats, digestion, unité pilote.

The biogas is a promising sector. For small farms which generating manure, a dry anaerobic digestion solution made from shipping container was designed. For this type of digestion, the management of leachates from digestion appears crucial to optimize production. This work aims to better understand the importance of this management, on the one hand theoretically on a large scale unit and on the other practically through tests carried out on a laboratory unit shipping containers.

Key words: dry anaerobic digestion, container, percolate recirculation, digestion, pilot unit.

1. Introduction

Ce travail est issu de la volonté de l'entreprise *BSP Construction* de poursuivre le développement d'une unité de biométhanisation en voie sèche discontinue à partir de containers maritimes. Cette entreprise œuvrant dans le domaine de la construction métallique souhaite diversifier son activité en apportant une solution mettant en œuvre la biométhanisation en voie sèche pour les exploitations agricoles de plus petite taille.

Un premier travail réalisé en 2015 avait permis de lancer le projet en fournissant une représentation de l'unité, ainsi que les outils permettant de dimensionner l'installation sur base des ressources disponibles et de calculer la rentabilité d'un projet.

Suite à ce travail, *BSP Construction* désirait mettre en pratique le schéma de production grâce à une unité pilote. Pour réaliser des tests dans les temps, une unité de laboratoire présente à l'institut HELMo Gramme a donc été adaptée afin d'étudier la digestion en voie sèche discontinue.

Tout d'abord, il a fallu comprendre les mécanismes de la voie sèche discontinue à travers l'étude de la dynamique réactionnelle et de la gestion des percolats au sein du fumier en digestion.

Finalement, un test de production de biogaz a été lancé dans l'unité de laboratoire adaptée. Une production de méthane a été obtenue à partir de fumier, sans inoculation, ni recirculation des jus. Ainsi, il a été prouvé qu'une digestion simple, sans recirculation, était envisageable pour les plus petites unités.

1.1. La biométhanisation

La méthanisation est une fermentation anaérobie c'est-à-dire en absence d'oxygène, en conditions contrôlées, au cours de laquelle les micro-organismes dégradent la matière organique. Cette dégradation génère deux produits à savoir un gaz combustible, le biogaz, composé principalement de méthane, qui peut être utilisé comme combustible pour produire de l'électricité et de la chaleur, et un produit humide riche en matières organiques partiellement stabilisées, appelé digestat. Le retour au sol du digestat s'effectue en l'état ou après une phase de compostage. Toutes les matières organiques sont susceptibles d'être méthanisées (excepté des composés très stables comme la lignine ou le bois) et de produire du biogaz, avec un potentiel méthanogène (capacité à produire du méthane par fermentation anaérobie) toutefois très variable en fonction du déchet traité. La méthanisation est un procédé d'une technicité plus poussée et plus complexe que le compostage.

Lorsqu'elle est appliquée sur une molécule organique, le glucose par exemple, la réaction de dégradation anaérobie est la suivante :



Cette réaction de craquage de la molécule de glucose est réalisée par les micro-organismes participant au processus de biométhanisation. Il est à noter que globalement la réaction est endothermique et nécessite donc un apport d'énergie sous forme de chaleur.

1.2. La biométhanisation en voie sèche discontinue

Les procédés les plus connus et les plus répandus sont les procédés humides infiniment mélangés, procédés dans lesquels la biomasse humide est mélangée par brassage aux micro-organismes. Ces procédés sont particulièrement utilisés pour de grosses installations pouvant disposer d'un apport continu en substrat. Les exploitations agricoles dont l'effluent principal est le fumier se dirigeront plutôt vers la biométhanisation en voie sèche discontinue (taux de matière sèche > 20%).

Fonctionnement d'une installation en voie sèche discontinue

Une unité de biométhanisation en voie sèche discontinue est constituée de plusieurs digesteurs fonctionnant en parallèle. En effet, le fonctionnement discontinu induit une irrégularité dans la production de biogaz. Pour garantir une production de biogaz la plus stable et la plus régulière possible, les digesteurs sont remplis tour à tour de matière fraîche, puis sont refermés hermétiquement. Ils produisent ainsi du biogaz avec un certain déphasage les uns par rapport aux autres, ce qui a pour effet de lisser la production. Une fois que la production d'un des digesteurs est jugée insuffisante, celui-ci est ouvert pour le vider de son digestat, et le remplir ensuite avec de la matière fraîche.

Pour améliorer le rendement, les jus issus de la digestion des matières organiques ou percolats sont récupérés dans une cuve de stockage avant d'être aspergés sur la matière en décomposition comme on peut le voir sur la figure 1. Selon les cas, une recirculation interne propre à chaque digesteur peut également être envisagée.

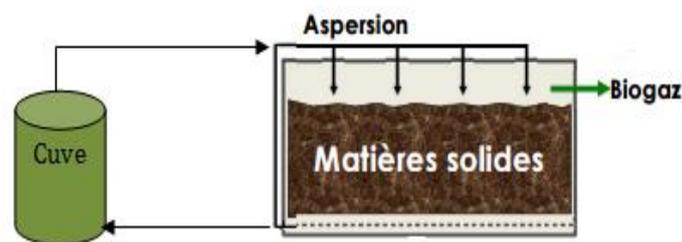


Figure 1: Recirculation des percolats issus de la digestion anaérobie.

2. Les paramètres influençant la digestion en voie sèche discontinue

2.1. Ajout d'inoculum

Afin d'éviter une acidification durant la digestion, le substrat frais, à savoir la matière première, doit être mélangé à un inoculum (matière précédemment digérée). En effet, l'inoculum contient des bactéries qui vont directement pouvoir être opérationnelles et ainsi accélérer le démarrage de la digestion anaérobie. Les bactéries méthanogènes présentes, trouvent au sein de cet inoculum un refuge pour se développer sans être inhibées par les produits des premières phases du processus (hydrolyse et acidogénèse). De plus, l'inoculum a un pouvoir tampon assez élevé qui va aider à maintenir le pH dans des zones acceptables pour les bactéries. La quantité d'inoculum à ajouter dépend quant à elle des caractéristiques du substrat qui l'accompagne. Pour le fumier bovin, une quantité de 20% d'inoculum est idéale [5].

2.2. Fréquence de recirculation

La fréquence de recirculation des jus produits par la digestion a une influence sur la production de méthane. La fréquence a particulièrement de l'importance lorsque la matière est facilement hydrolysable. Une expérience réalisée par Sigrid Kush [6] a montré qu'avec une recirculation discontinue à raison de 2 recirculations journalières, on obtenait une production supplémentaire de 50% par rapport à une recirculation appliquée en continu.

2.3. Immersion du substrat

En immergeant le substrat, la teneur en eau de la matière est directement ajustée, les bactéries peuvent dès lors se développer plus vite. Une étude française [1] a révélé l'impact que pouvait avoir cette immersion du substrat sur le rendement de production de méthane. Ils ont constaté une augmentation non négligeable de la production de méthane (13%) lorsque le substrat passe de 33 à 50% d'immersion.

3. Application sur une unité réalisée en container maritime

Au vu de la théorie sur la recirculation, il est possible de voir que la gestion des percolats est un paramètre-clé pour la digestion. Un cycle complet dure en théorie 35 jours [7]. En théorie avec six digesteurs, un des digesteurs sera donc vidé puis rempli tous les six jours environ. Le schéma du fonctionnement de la recirculation est donné sur la figure 2.

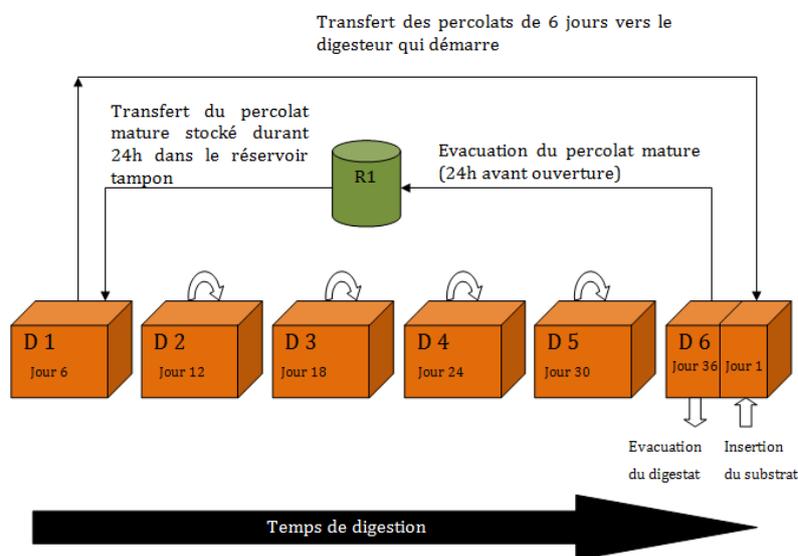


Figure 2: Fonctionnement de la recirculation au sein de l'unité de BSP Construction.

Les paragraphes qui suivent décrivent les étapes nécessaires pour faire tourner l'installation correctement.

Il convient de retirer les percolats 24 heures avant de vider un digesteur en fin de cycle (D6) pour diminuer la siccité du digestat et en faciliter ainsi l'épandage [3]. Les percolats matures contiennent de nombreuses bactéries méthanogènes et constituent un parfait inoculum. Ces jus extraits du digesteur en fin de cycle (D6) seront stockés dans un réservoir tampon (R1) durant 24h.

Lorsqu'un digesteur atteint 36 jours de digestion (D6), la benne est retirée par l'exploitant qui va vider le digestat dans la zone de stockage prévue à cet effet. L'exploitant procède ensuite au remplissage de celle-ci avant de la remettre dans le container. Une fois que les portes du container sont fermées, la digestion peut démarrer.

Pour stimuler l'hydrolyse de la matière, les jus présents dans le digesteur précédemment lancé (D1), sont transférés dans le digesteur qui vient d'être rempli de substrat frais (D6).

Le digesteur D1 est maintenant prêt à recevoir un inoculum plus mature. Après six jours de digestion, la phase d'hydrolyse a créé beaucoup d'acides gras volatils. Les bactéries méthanogènes provenant du réservoir tampon vont pouvoir les assimiler. On devrait en principe constater une augmentation du débit de méthane à partir de ce stade.

Pour les digesteurs ayant plus de douze jours de digestion, une recirculation est organisée en interne. Grâce à un jeu de vannes, les percolats des différents digesteurs passent tour à tour par la pompe du container technique.

Pour optimiser la production, la fréquence de recirculation doit être adaptée en fonction du temps de digestion. L'expérience de Mr Brosset¹, contacté dans le cadre de recherche sur la recirculation en voie sèche discontinue a été d'une grande utilité pour trouver la bonne fréquence de recirculation et les quantités optimales de percolats à recirculer. Dans son installation, la quantité de jus quotidiennement recirculée est de 150 litres/tonne de matière brute. Une recirculation discontinue a également été préférée à la recirculation continue.

En associant les connaissances pratiques de Monsieur Brosset à la théorie portant sur la gestion des percolats, il est possible d'établir le schéma de recirculation à suivre en termes de quantité et de fréquence. Les recommandations sont développées en prenant en compte le temps de digestion.

Du premier jour au sixième, la quantité de percolats exactement générée est inconnue, mais les jus présents sont recirculés deux fois par jour pour favoriser les opérations d'hydrolyse de la matière. Durant les six jours suivants, l'inoculum liquide mature vient s'ajouter aux jus. Une fréquence de recirculation faible (une fois par jour) permet l'établissement des centres méthanogènes.

A partir du douzième jour, les poches méthanogènes sont en principe stabilisées. Pour les alimenter suffisamment en acides gras volatils, on peut donc revenir à une recirculation plus intense à savoir deux fois par jour jusqu'au vingt-quatrième jour.

Au bout d'un certain temps, la matière digérée s'imperméabilise, le flux principal de percolats atteint moins facilement les zones d'échange [2]. Une recirculation trop

¹ Exploitant d'une installation de biométhanisation en voie sèche en Vendée.

intense est par conséquent inutile. On revient donc à une seule recirculation quotidienne à partir du vingt-quatrième jour et ce jusqu'à la fin de la digestion.

4. Unité de laboratoire

Après avoir étudié et mieux maîtrisé les différents paramètres de la digestion en voie sèche, il paraissait utile de réaliser des tests de production sur une unité de laboratoire.

4.1. Adaptation d'une unité existante

Dans le cadre d'un projet de chimie industrielle d'année de finalité génie énergétique durable, une unité de biométhanisation de laboratoire a été réalisée.

L'installation devait de base fonctionner en semi-continu, la matière première liquéfiée pouvant ainsi pénétrer dans le digesteur à tout moment via une ouverture de vanne. Pour étudier la biométhanisation en voie sèche discontinue, toute la matière a été insérée dès le début de la digestion et la vanne d'alimentation est restée fermée tout au long de l'expérience.

Adaptation du bidon

Le digesteur utilisé est un bidon en PEHD d'une capacité de soixante litres équipé d'une vanne d'alimentation placée sur le couvercle, d'une vanne d'évacuation du digestat placée sous celui-ci ainsi que du tuyau d'évacuation du biogaz produit.

Pour pouvoir récolter les jus produits durant la digestion, une pente a été créée dans le fond du bidon et celui-ci a été étanchéifié. Une grille placée dans le fond a permis de séparer la phase solide de la phase liquide.

Pour pouvoir répandre correctement les jus sur le dessus de substrat, un aspergeur a été placé sous le couvercle. A la base, cet aspergeur est simplement un petit récipient en plastique trouvé dans le commerce. De petits trous ont été percés dans son fond. Ces trous sont répartis de façon non symétrique pour palier le fait que le trou d'arrivée des jus n'est pas positionné au centre.



Figure 3: Aspergeur

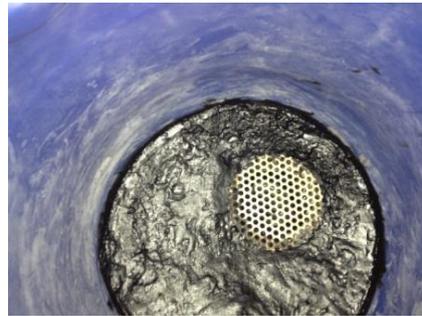


Figure 4: Fond du bidon

Vérification de l'étanchéité à l'air

Les bactéries méthanogènes sont des anaérobies strictes, ainsi la présence d'oxygène est non souhaitable parce que cela tue tout simplement ce type de bactéries. Des tests d'étanchéité ont donc eu lieu. Pour repérer les fuites, le bidon a été placé en immersion dans une baignoire, la pression étant amenée par un compresseur.

Mise en température

Pour effectuer la digestion anaérobie dans de bonnes conditions, il nous fallait un système permettant de maintenir la réaction à la température de 37°C (régime mésophile). Nous nous sommes dirigés vers un caisson mis à température à l'aide d'une résistance électrique. Le digesteur est donc chauffé par de l'air qui circule dans le caisson autour de lui. Cette circulation d'air chaud amène une certaine homogénéité de la température dans le digesteur et est réalisée grâce à un ventilateur. Le caisson a bien entendu été isolé. La figure ci-dessous montre le système de chauffage et ventilation installé dans le caisson.

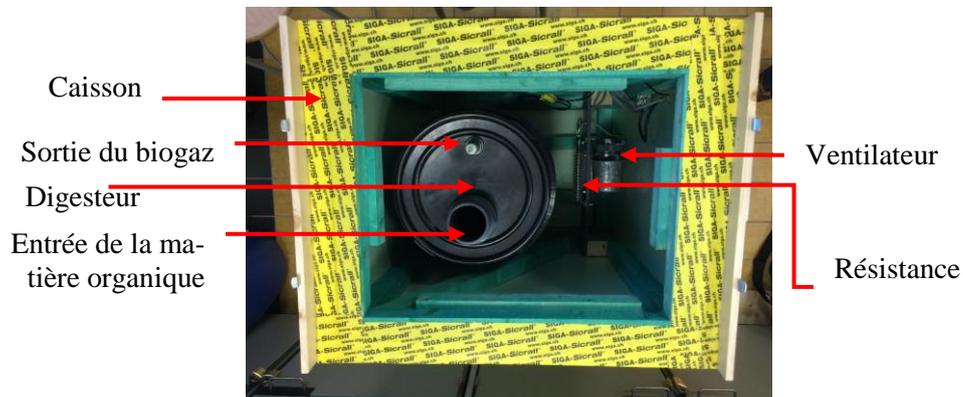


Figure 5: Système de chauffage mis en place

Le système de régulation est quant à lui dérivé d'un système de régulation de chaudière.

Evacuation du biogaz

Pour pouvoir mesurer le débit produit en temps réel un débitmètre a été installé. Pour éviter de faire entrer de l'oxygène par le tuyau de sortie du gaz, l'embout de ce dernier a été placé sous 1cm d'eau.



Figure 6: Système d'évacuation du biogaz

4.2. Mise en route de l'installation

Une fois que la mise en place des différentes adaptations a été faite, les tests ont pu débuter. Mais avant de démarrer la production du biogaz, il a fallu caractériser le fumier bovin utilisé pour les tests, en terme de matière sèche, de matière organique, d'éléments chimiques présents et de masse volumique pour pouvoir comparer nos résultats avec d'autres études (voir point 4.4.).

Pour suivre l'évolution de la production, les mesures de débit et de température ont été prises en continu alors que le contenu du biogaz a, quant à lui, été évalué ponctuellement.

Caractérisation du fumier bovin

Pour évaluer le taux de matière sèche du fumier, trois échantillons représentatifs de la matière placée dans le bidon ont été chauffés à l'étuve à une température de 105°C durant plusieurs heures. La température supérieure à 100°C oblige l'eau libre présente dans la matière à s'évaporer. Au fil des heures la masse diminue pour finalement se stabiliser.

Plusieurs échantillons ont été prélevés afin d'établir une moyenne compte tenu de l'hétérogénéité du fumier bovin. Ces tests ont révélé que la teneur moyenne en matière sèche du fumier était de 24% pour ce type de fumier. On se trouve bien dans des conditions de digestion en voie sèche (MS > 20%).

La matière sèche obtenue à l'étape précédente est composée de substances minérales (calcium, magnésium,...), mais aussi de substances organiques (glucides, lipides, protides, acides nucléiques). Ces molécules complexes sont constituées majoritairement des éléments C, H, O et N. Un chauffage puissant dans un four à 550°C permet de dégrader la matière organique en matière minérale qui s'échappe ensuite du creuset sous forme gazeuse. Dans le creuset, il reste alors les sels minéraux sous forme de cendres blanches.

En ayant mesuré les masses de l'échantillon avant et après calcination et en connaissant la teneur en matière sèche de l'échantillon, on peut déterminer le taux de matière organique. Dans notre cas, on passe d'une masse initiale de 94 g à une masse de 3,8 g. La teneur en poids de matière sèche de l'échantillon valant 22,8%, on a pu déterminer une teneur en matière organique de 82,3%.

Cette teneur en matière organique est assez élevée sachant qu'en moyenne pour ce type de substrat on retrouve près de 78,6% dans la matière sèche (voir tableau 3). Ce résultat est plutôt de bon augure quant à la production de méthane puisque la part de matière sèche potentiellement dégradable est plus élevée qu'à la normale.

La masse volumique apparente du fumier a été calculée lors du chargement de la matière dans le bidon. La valeur approximative de 328 kg/m^3 a été obtenue en faisant le rapport entre la masse de fumier présente dans une caisse en plastique et le volume de celle-ci.

Après cette dernière manipulation, 10,003 kg de fumier ont été chargés dans le bidon. Une fois le système fermé et étanche, de l'azote a été envoyé dans le bidon pour occuper les espaces vides et ainsi chasser l'oxygène (mortel pour les bactéries anaérobies). Après cette vidange réalisée à l'azote, tout était en place, la production pouvait débiter.

Réalisation des mesures

Pour obtenir des informations exhaustives sur la production de biogaz, il fallait disposer d'un système pouvant enregistrer des mesures de débit et de température en continu, un datalogger à quatre voies analogiques Hobo² a donc été loué.

Pour mesurer le débit de biogaz produit, un débitmètre Brooks a été utilisé. Le débitmètre ayant été calibré à l'azote, une série de coefficients de corrections ont été utilisés pour corriger le débit mesuré lorsqu'un autre gaz passe dans ce même débitmètre (dans notre cas le biogaz contient outre l'azote, de l'oxygène, du gaz carbonique et du méthane). Ces coefficients ont été appliqués pour pouvoir générer les courbes de résultats.

La biométhanisation est un procédé sensible à la température et ce à cause des bactéries qui régissent les réactions tout au long du cycle de digestion. Idéalement, la température devrait être maintenue continuellement entre 37°C et 40°C , ceci afin de travailler en régime mésophile. Pour ce faire, une régulation de température a été mise en place sur le caisson.

Pour des raisons de sécurité, cette régulation ne peut pas fonctionner en continu. En effet, on n'est jamais à l'abri d'un faux contact ou d'une surchauffe de la résistance. Si cela se produit, il faut que quelqu'un puisse intervenir. En soirée et la nuit, la régulation et le chauffage sont éteints. Malgré la présence d'isolant autour du digesteur, une diminution de la température et donc de l'activité bactérienne est inévitable. Suivre l'évolution de cette diminution au cours de la nuit et pouvoir corrélérer celle-ci à la diminution de débit s'est avéré obligatoire pour mener à bien l'expérience.

Une sonde PT 100 a donc été placée le long du bidon pour ramener une information de température qui se veut être la plus proche possible des conditions dans lesquelles se trouve le fumier en digestion.

² Le modèle est le suivant : HOB0 UX120 4-Channel Analog Logger by Onset.

Grâce à ce montage, on peut obtenir des courbes de températures sur le logiciel Hobware.

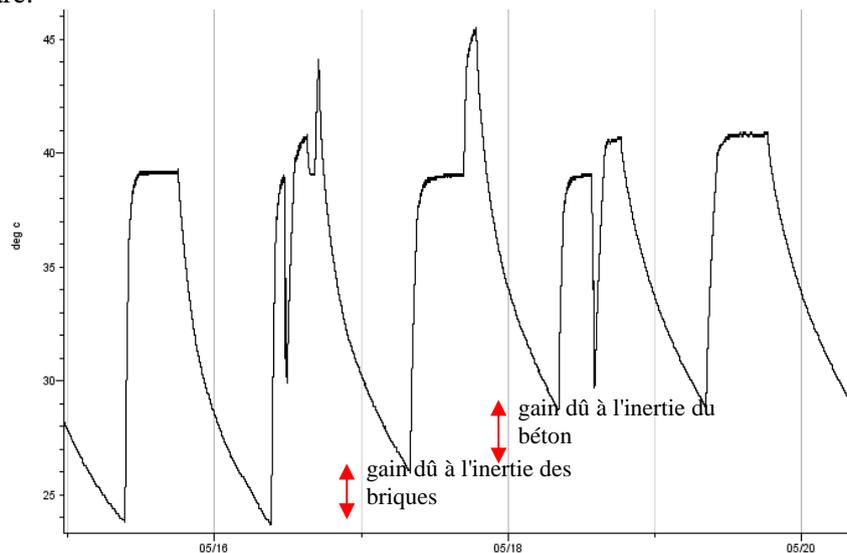


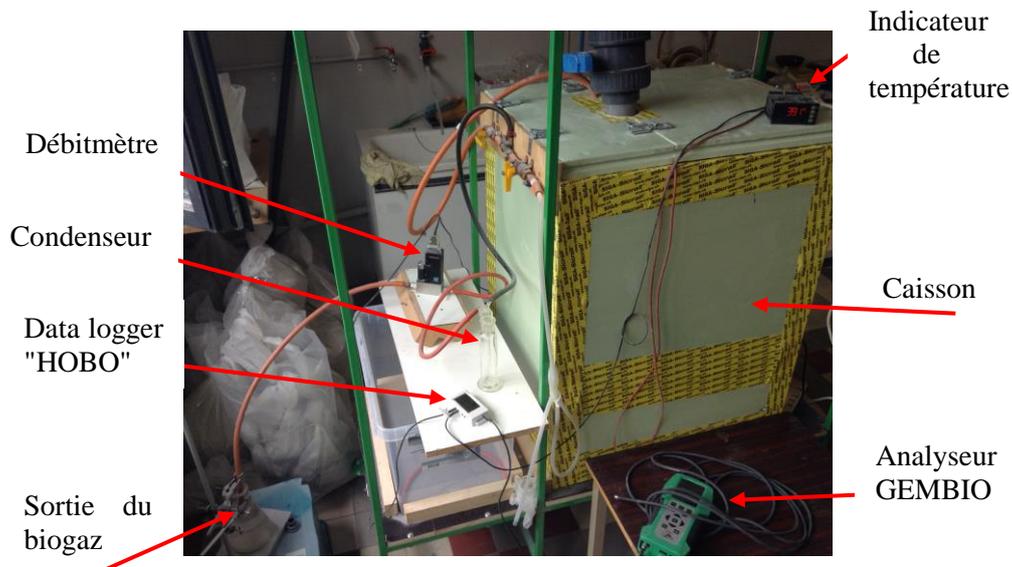
Figure 7 : Évolution de la température en fonction du régime de chauffage et de l'inertie du caisson

On peut constater que la température chute assez fortement la nuit dans le caisson, puisqu'elle est passée de 39°C à 24°C lors de la nuit du 15 au 16 mai. Pour atténuer la chute de température durant la nuit, on peut envisager d'augmenter l'inertie dans le caisson. Pour ce faire, 22 kg de briques ont d'abord été ajoutés le 16 mai. L'effet s'est fait sentir dès la nuit d'après, puisque le 17 mai au matin la température du bidon était de 26°C, soit 2°C de plus que la veille. L'ajout de briques ayant bien fonctionné, 26 kg de briques en béton ont encore été ajoutés, précisément le 18 mai. On constate que ce gain d'inertie permet de maintenir la température au-delà de 29°C, soit 5°C de plus qu'au démarrage de l'expérience.

Pour analyser le biogaz et ainsi déterminer le volume de méthane produit, l'analyseur GEMBIO de la société *Gruter et Marchand* a été utilisé. La prise de mesure est cette fois réalisée manuellement. Les prises de mesures ont été réalisées 7 jours/7. Durant les neuf premiers jours, la composition du biogaz étant fort variable, deux mesures ont été prises quotidiennement. Par la suite, nous nous sommes limités à une prise de mesure journalière.

En effet, la mesure consomme du gaz produit et il a fallu l'évaluer. L'analyseur pompe le biogaz avec un débit de 0,8 l/min. Etant donné que le volume moyen généré quotidiennement est de cinq litres de méthane, on comprend aisément l'importance

prise par les ponctions de l'analyseur sur les résultats finaux. Le temps de mesure a par conséquent été mesuré pour rajouter le volume de biogaz adéquat aux résultats.



40

Figure 8: Unité de laboratoire réalisée à l'institut HELMo Gramme

4.3. Résultats

Les résultats fournis dans cette section correspondront à la biométhanisation de dix kg de fumier bovin en voie sèche discontinuée sans ajout d'inoculum et sans recirculation.

Production de jus

Après trois jours de digestions, la vanne sous le digesteur a été ouverte pour récolter les jus. Seuls 2 ml de percolats ont pu être récupérés. Après cette récolte peu fructueuse, il a été décidé d'étudier la décomposition du fumier sans recirculation des percolats. Une recirculation aurait pu être envisagée si le fumier avait été inoculé à l'aide d'un liquide³ adéquat, sans quoi, le volume d'eau libre dans le réacteur n'est pas suffisant. Après les 35 jours de digestion, le volume de jus produits était de 58 ml pour 10 kg de fumier soit 5,8 ml/kg de matière.

³ Pour disposer d'un inoculum liquide, il faut avoir réalisé une digestion au préalable et récolté les jus produits. Dans notre cas, ce n'était pas possible puisque l'installation fonctionnait pour la première fois.

Influence de la température

On a pu constater que la température influence l'activité microbienne. Sur le graphe reprenant les informations enregistrées sur le datalogger durant les sept derniers jours, on peut voir clairement que le débit de biogaz diminue durant la nuit. Cependant celui-ci n'est pas nul, on peut voir l'existence d'un plateau aux alentours de 2-3 ml/min durant certaines nuits. Cette activité nocturne laisse sous-entendre qu'une partie des bactéries méthanogènes possèdent une certaine tolérance aux variations de température et peuvent donc produire du biogaz à des températures plus faibles mais en moindres quantités.

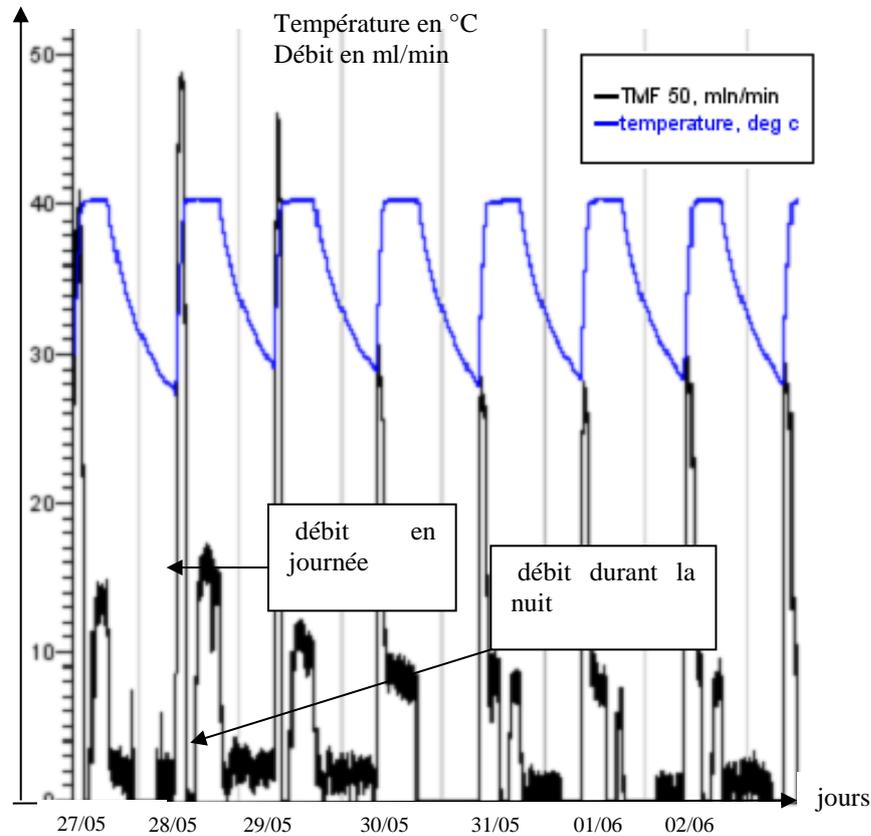


Figure 9: Evolution du débit de biogaz en fonction de la température

Production de méthane

Il a été décidé de s'attarder sur le volume de méthane produit en 21 jours et l'évolution du débit de ce même gaz.

La production de méthane obtenue en 21 jours à partir de 10 kg de fumier bovin a fourni 53 litres de méthane.

Pour arriver à une telle production, le débit de méthane journalier n'a pas toujours été constant, comme on peut le voir sur la figure 10. Sur cette figure, on peut distinguer deux pics de production de méthane successifs, respectivement le quinzième et le vingtième jour, ainsi qu'un creux entre le dixième et le quinzième jour⁴.

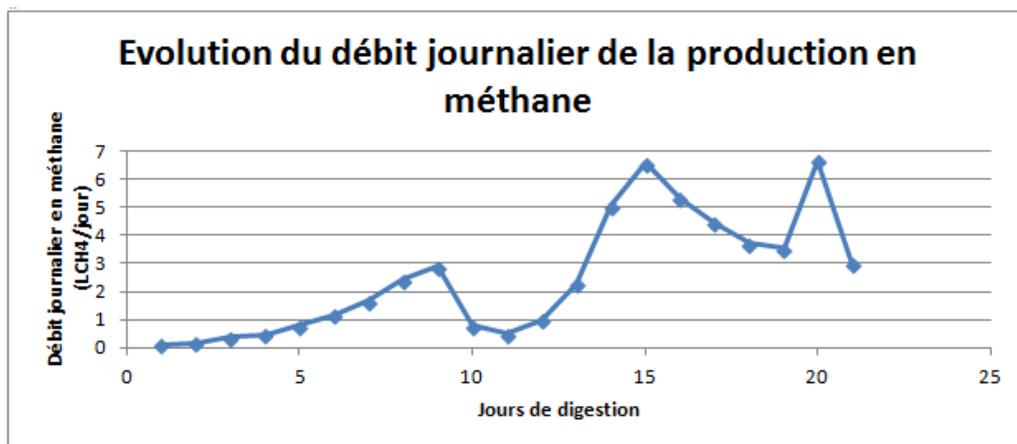


Figure 10: Evolution du débit journalier de la production en méthane

La présence de ces deux pics est une chose communément rencontrée en voie sèche discontinue. Les pics proviennent de la différence de cinétique de dégradation qui sépare les matières plus facilement hydrolysables (premier pic de production) des matières plus lentement dégradables (deuxième pic de production).

4.4. Interprétation des résultats

Les points développés dans cette partie vont permettre de placer l'expérience dans un certain contexte d'étude.

Les résultats obtenus ont prouvé qu'une production de méthane à partir de fumier bovin était possible sans recirculation et sans ajout d'inoculum⁵. C'est la nature même

⁴ Ce creux de production était dû à la présence d'eau à l'entrée du débitmètre qui empêchait le passage du biogaz, il n'est donc pas dû à un arrêt de la production. Dès lors si l'on fait abstraction de ce creux, la présence de 2 pics de production est bien visible.

⁵ On pouvait s'y attendre vu la littérature sur le sujet mais le prouver par une réalisation en pratique constituait un autre challenge.

du substrat qui permet de démarrer le processus. En effet, le fumier bovin contient déjà le consortium⁶ bactérien nécessaire à la biométhanisation.

On pourrait dès lors se demander quel est l'intérêt d'ajouter un inoculum lors de la méthanisation de fumier bovin car cela ne simplifie pas le système et son utilisation. C'est justement la question que se sont posée des chercheurs de *l'Université Européenne de Bretagne* au travers d'une étude sur le rôle biotique⁷ et abiotique des percolats dans la digestion de fumier bovin [4].

Dans cette étude, du fumier bovin a été digéré avec apport initial d'un inoculum liquide. Pour étudier l'effet des bactéries présentes dans l'inoculum liquide, deux inoculums différents ont été sélectionnés, ceci dans le but de mener deux expériences de front et pouvoir comparer les résultats. Les deux inoculums avaient la même origine, ils étaient tous deux issus d'une digestion précédente, la différence résidait dans le fait que l'un d'eux avait été stérilisé, n'apportant plus que des facteurs abiotiques tels le pouvoir tampon et les éléments nutritifs.

Il est à noter qu'une recirculation d'un volume de 500 ml a été appliquée toutes les heures durant les deux expériences menées en Bretagne.

Pour pouvoir comparer les résultats obtenus dans l'expérience bretonne avec les résultats issus de notre propre expérience, ceux-ci ont été ramenés en litres de méthane produit par kg de matière organique. Le pouvoir méthanogène total en matière organique du fumier breton étant de 175 litres de CH₄/kgVS⁸, un pouvoir méthanogène similaire a été considéré pour le fumier liégeois. Une fois ces hypothèses prises en compte, on obtient le graphique suivant :

⁶ Association de bactéries qui agissent ensemble.

⁷ Les facteurs abiotiques représentent l'ensemble des facteurs physico-chimiques d'un écosystème influençant sur une biocénose donnée. C'est l'action du non-vivant sur le vivant.

⁸ VS (volatile solids) représente la matière organique d'une substance.

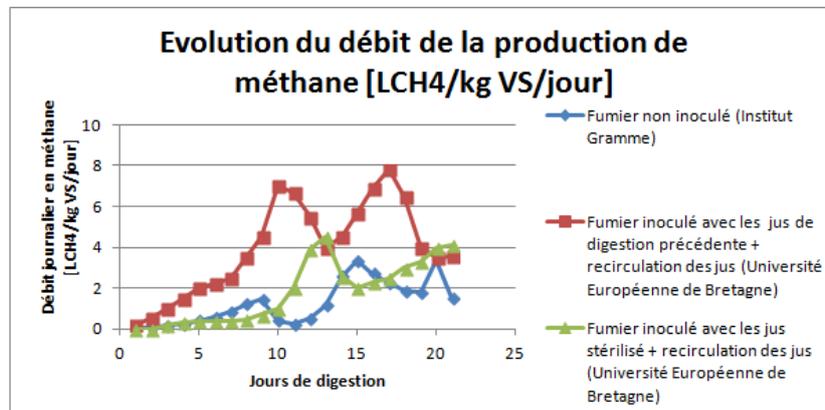


Figure 11 : Comparaison entre les débits de productions issues des différentes expériences

Sur les courbes de l'Université bretonne, on aperçoit de nouveau les deux pics de production caractéristiques d'une digestion en voie sèche discontinue. Concernant les résultats de notre expérience dans laquelle le fumier n'a donc pas été inoculé, on peut voir qu'ils sont clairement en dessous des résultats obtenus dans les expériences menées par les chercheurs bretons. Cette différence est encore plus nette lorsque l'on somme les volumes produits sur les 21 jours (voir figure ci-dessous).

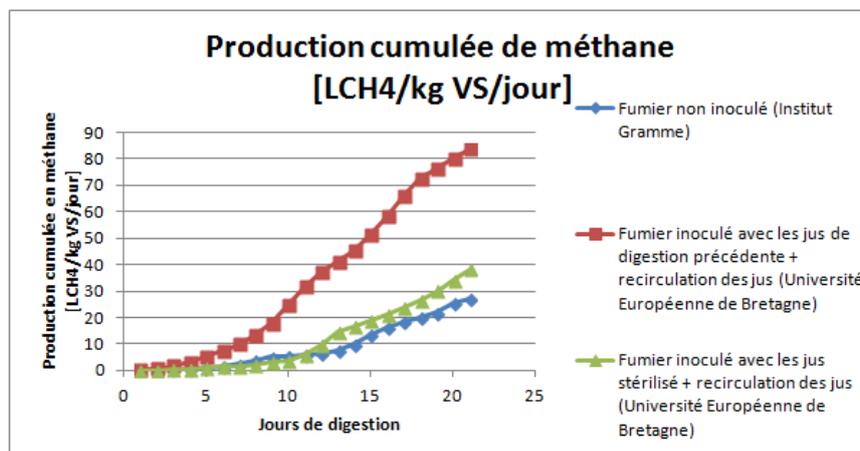


Figure 12 : Comparaison entre les productions cumulées issues des différentes expériences

On peut voir que dans le cadre de notre expérience, 27 litres de CH₄/kgVS ont été générés en 21 jours. Ce volume est équivalent à 70% du volume libéré par le fumier inoculé avec les jus stérilisés. Dans ce cas, 38 litres de CH₄/kgVS sont produits, soit

une production supplémentaire de 28%. Ce gain de production est uniquement lié aux bénéfices apportés par les facteurs abiotiques de l'inoculum et la recirculation.

Par rapport au volume de méthane libéré par le fumier inoculé grâce aux jus d'une digestion précédente contenant les bactéries méthanogènes à maturité, notre production ne représente plus que 32% du volume généré lors de l'expérience bretonne. On comprend dès lors que l'utilisation d'un inoculum contenant des bactéries méthanogènes matures ajouté à une recirculation horaire permet d'obtenir plus rapidement une quantité de méthane plus conséquente. En effet, avec des conditions optimales, la dégradation du fumier produit 47,5% du potentiel méthanogène total disponible en 21 jours, alors qu'on arrive à 15% dans notre cas et ce dans le même laps de temps. On voit clairement que la première configuration est la plus rentable en termes de cinétique de production.

A l'examen de la figure 12, on prend conscience de l'importance de l'inoculation et de la recirculation pour augmenter les rendements de productions en méthane. Cependant, la mise en place d'une recirculation des jus complexifie l'installation de biométhanisation. Sur des unités de taille conséquente, elle se justifie amplement vu la rentabilité recherchée pour rembourser les investissements. Dans le cas d'une unité plus petite telle que celle développée au laboratoire, on est en droit de se poser la question sur la nécessité d'une recirculation. Certes, sans elle, la production est diminuée mais on constate que celle-ci reste en cohérence avec les moyens simples mis en œuvre.

5. Conclusion

Pour ce type d'installation, l'utilité d'une recirculation n'est plus à démontrer. Encore faut-il que cette recirculation soit menée de la bonne façon et c'est là tout le challenge.

On retiendra que la fréquence de recirculation et le volume d'inoculum doivent être adaptés au mieux au type de substrat dégradé. Une recirculation continue des percolats est en tout cas à éviter pour limiter les risques d'acidification du digesteur.

Cependant le substrat étudié, à savoir le fumier bovin, est un cas un peu à part puisqu'il peut produire du méthane sans être inoculé et sans recirculation des jus. Et ce sont les conclusions que l'on peut tirer de l'expérience menée à partir de ce substrat au sein de l'unité de laboratoire de l'Institut HELMo-Gramme. Le fumier bovin possède en effet le consortium bactérien nécessaire pour démarrer le processus de biométhanisation. Une inoculation ne fait qu'améliorer la cinétique puisque dans ce cas,

les bactéries méthanogènes sont présentes directement en nombre. La recirculation provoque elle aussi une accélération du processus.

La cinétique de production est un paramètre important dans le cas d'installations de plus grandes tailles comme pour celle développée en containers maritimes. Dans ce cadre, ce travail donne des pistes quant à la quantité d'inoculum et la recirculation adaptée pour optimiser la digestion.

Pour les petites installations par contre, et notamment celles à promouvoir dans les pays en voie de développement, l'expérience a montré que l'on peut se passer d'inoculum liquide et de recirculation, le procédé sera plus lent, mais aura l'avantage d'être plus simple.

En conclusion, la biométhanisation en voie sèche, avec ses différentes applications possibles, est une filière d'avenir, tant dans nos pays industrialisés en recherche d'alternatives aux énergies fossiles, que dans les pays en voie de développement où l'accès à l'énergie est à la fois une nécessité et une priorité, tout en permettant la gestion de déchets organiques.

6. Sources

[1] ANDRÉ, L. (2016). *Methane production improvement by modulation of solid phase immersion in dry batch anaerobic digestion process: Dynamic of methanogen populations*. Université de Technologie de Compiègne.

[2] ANDRÉ, L. (2015). *Quantifying physical structure changes and non-uniform water flow in cattle manure during dry anaerobic digestion process at lab scale: Implication for biogas production*. Université de Technologie de Compiègne.

[3] BIOMASSE NORMANDIE. (2010). *Suivi expérimental de l'installation de méthanisation du GAEC du Bois Joly*.

[4] DEGUEURCE, A. (2015). *Biotic and abiotic roles of leachate recirculation in batch mode solid-state anaerobic digestion of cattle manure*. Université Européenne de Bretagne.

[5] KUSCH, S. (2007). *Biogas production with horse dung in solid-phase digestion system*. University of Hohenheim.

[6] KUSCH, S. (2012). *Effect of various leachate recirculation strategies*. University of Hohenheim.

[7] LABEYE, C. (2015). *Développement d'une unité de micro-biométhanisation en voie sèche à partir de containers maritimes*. HELMo Gramme.