

Essai de traitement du lactosérum pur issu de la fromagerie pilote de la ferme caprine du Pradel par la méthanisation

Pauline Castillon, Institut National Polytechnique -École d'Ingénieurs de PURPAN

Yves Lefrileux, Institut de l'Élevage

Station Expérimentale Caprine du Pradel – EPLEFPA -Le Pradel - 07170 MIRABEL

+33 (0)4 75 36 74 37

RÉSUMÉ :

La gestion du lactosérum pur issu de la transformation fromagère fermière est une préoccupation pour les producteurs. En effet, sa charge organique élevée en fait un effluent fortement polluant. La méthanisation de ce substrat est une alternative intéressante au procédé de gestion/traitement déjà existant. Outre l'aspect épuratoire, elle permet de valoriser une source de matière organique facilement disponible en énergie renouvelable, par la production de biogaz.

Cette étude a pour but de mettre au point un procédé efficace, rustique, simple d'utilisation, financièrement abordable et adapté aux dimensionnements nécessairement réduits d'une exploitation agricole. La première partie de ce projet a pour objectif de valider des modalités de chargement et un niveau de charge optimaux. Pour cela l'étude expérimentale a été menée sur un micro-pilote d'1m³ à lit de boues granulaires, de type infiniment mélangé. Les premiers résultats expérimentaux font état d'un bon fonctionnement à un niveau de charge de 6 kg DCO/m³/jour, selon une modalité d'apport très fractionnée sur 24h, avec un rendement en méthane atteignant plus de 95% du potentiel théorique¹. Les performances épuratoires sont telles que 80% de la DCO entrante sont abattus, réduisant alors largement l'impact du rejet en termes de pollution. Les résultats de l'augmentation de charge de 6 à 8 kg DCO/m³/jour dénotent d'un moins bon fonctionnement général mais soulèvent néanmoins la question du maintien des boues granulaires dans le digesteur pour assurer des performances optimales. Ainsi, des modifications concernant la conception du pilote sont à envisager afin de pouvoir effectivement valider la faisabilité de ce procédé. Enfin, l'étude du bilan énergétique de l'installation est actuellement en cours et permettra à terme de faire état de l'intérêt économique d'une installation de ce type.

INTRODUCTION :

Les effluents de fromageries fermières (eaux blanches, lactosérum), de par leur charge organique élevée, s'avèrent être une source de pollution non négligeable pour l'environnement.

¹ GHALY *et al.*, 2000, *Effect of resseding and pH control on the performance of a two-stage mesophilic anaerobic digester operating on acid cheese whey* *Canadian Agricultural Engineering* 42 (4): 173–183. *Calcul pour un biogaz à 70% de méthane, et un lactosérum à 50g de lactose/l et 60g DCO/l.*

Le lactosérum issu de la transformation fromagère représente à lui seul 80% de la charge polluante de ces rejets (50 à 70g_{DCO}/L de lactosérum). L'interdiction réglementaire du rejet direct dans le milieu naturel ainsi que les contraintes sanitaires rencontrées lorsqu'il est valorisé en alimentation animale imposent une gestion sur site. S'il existe un certain nombre de procédés pour l'épuration des mélanges eaux blanches et lactosérum (système SBR et filtre à pouzzolane type Pradel, entre autres), la gestion du lactosérum seul permettrait de réduire la charge polluante totale des rejets ainsi que le dimensionnement des installations de traitement préexistantes.

Déjà largement employée, la méthanisation pour le traitement des effluents semble être une solution alternative aux pratiques actuellement autorisées, et permet de valoriser de la matière organique facilement disponible en énergie renouvelable.

Mais si la méthanisation est aujourd'hui largement décrite et fonctionne déjà à une échelle industrielle pour les mélanges eaux blanches-lactosérum, peu de données sont disponibles quant au traitement de tout ou partie du lactosérum pur produit au cours de l'année, à l'échelle d'une petite exploitation fermière.

Cette voie demandait donc à être investiguée, avec un double objectif : un volet environnemental, concernant la réduction de la charge polluante organique que représente le lactosérum, et un volet énergie, avec l'optimisation de la production de biogaz et sa valorisation sur place pour la production d'eau chaude en fromagerie.

Dans un contexte fermier, la miniaturisation est l'élément clé de cette démarche puisqu'il s'agit de mettre au point un procédé efficace, rustique, simple d'utilisation, financièrement abordable et adapté aux dimensionnements nécessairement réduits d'une exploitation agricole.

Ces travaux ont fait l'objet d'une collaboration entre la station expérimentale caprine du Pradel et la société Autom'Elec (Saint-Etienne), pour la mise au point d'un micro pilote de méthanisation d'1 m³. Ces travaux visent à répondre aux questions suivantes :

- La miniaturisation d'une installation de méthanisation est-elle adaptée au traitement d'un effluent fortement chargé tel que le lactosérum ainsi qu'aux contraintes inhérentes au travail en exploitation agricole (variation de qualité et de disponibilité du substrat au cours de l'année, suivi limité) ?
- L'utilisation du lactosérum acide pur impose t'elle des contraintes de gestion spécifique ?
- La conception volontairement simplifiée du pilote de méthanisation utilisé pour l'étude permet-elle d'atteindre des performances proches des performances maximales théoriques attendues (production de biogaz équivalente à 0,39 L CH₄.g DCO⁻¹, taux d'abattement DCO supérieur à 80%) ?
- Quels sont les modalités d'apports à envisager et le niveau de charge optimal pour le bon fonctionnement de l'unité?
- Quel est l'impact d'une augmentation de charge sur la production qualitative et quantitative de biogaz, ainsi que sur les performances épuratoires du réacteur ?

A terme, ces travaux permettront d'apprécier les performances énergétiques potentielles de l'unité de méthanisation lors de son fonctionnement optimal et le niveau de charge à envisager pour, atteindre l'équilibre énergétique pour le fonctionnement du réacteur d'une part, et obtenir une production énergétique suffisante afin de substituer une partie de la consommation d'eau chaude en fromagerie d'autre part.

La conception de l'installation a été avant tout guidée par la recherche d'un outil financièrement abordable pour une petite exploitation agricole, d'où une simplification de l'installation (choix des matériaux, limitation des points de piquage sur la cuve avec utilisation d'une seule et même pompe pour le chargement et la recirculation de l'effluent).

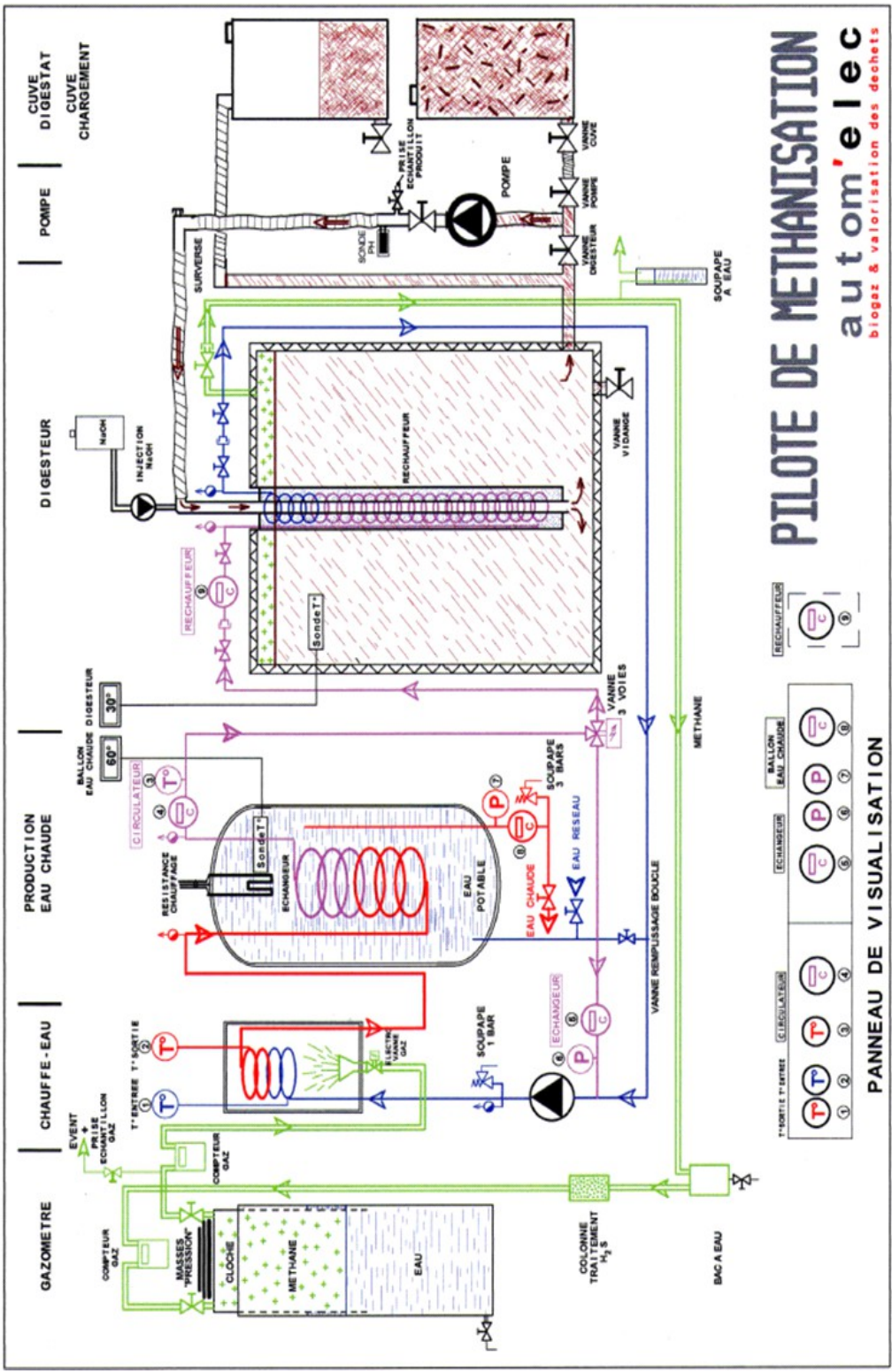
MATÉRIELS ET MÉTHODES :

- ***Descriptif du pilote***

Le pilote est constitué d'un digesteur d'1m³ (900 L de volume utile) de type infiniment mélangé par recirculation du substrat, à lit de boues granulaires, de deux cuves de 250L en amont et en aval de la digestion pour le stockage du lactosérum frais et du digestat évacué par la surverse du digesteur, d'une cloche gazométrique de 450 L et d'une chaudière biogaz. Le système est également équipé de deux compteurs à biogaz permettant de mesurer les volumes de gaz produit et brûlé.

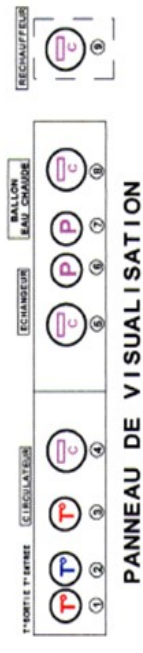
La surverse du réacteur est piquée sur l'aspiration de la pompe centrifuge, afin de limiter les piquages sur la cuve. Elle est donc positionnée en partie basse du digesteur.

Le gaz brûlé permet d'une part, et en priorité, la production d'eau chaude pour le maintien en température du digesteur, par conduction thermique au travers de l'échangeur du ballon d'eau chaude et du réchauffeur, et d'autre part, lorsque le volume de gaz est suffisant, pour la production d'eau chaude sanitaire. L'installation comporte également une pompe doseuse pour la régulation du pH par la soude si besoin.



PILOTE DE METHANISATION

autom'elec
biogaz & valorisation des déchets



Afin d'accélérer la phase de démarrage nous avonsensemencé le réacteur avec des boues granulaires, issues d'une step de type UASB, traitant les eaux de process de sucrerie. Après l'ensemencement et afin d'acclimater l'écosystème, le lactosérum a été introduit avec une charge très faible équivalente à 0,3 kg DCO/m³/jour.

Pour éviter toute surcharge organique, l'augmentation de charge a été progressive et par paliers. Ainsi, durant un mois et jusqu'à atteindre la charge nominale du digesteur de 900L, la charge volumique appliquée en lactosérum est augmentée de 20% par semaine. L'augmentation de charge progressive est maintenue jusqu'à atteindre un temps de séjour du substrat au sein du réacteur de 30 jours, fixé aléatoirement. Le débit volumique d'entrée est de 30 litres par jour, soit 2 kg DCO/m³/jour, chargés en une fois au cours de la journée.

La charge appliquée a ensuite été augmentée en multipliant par 3 le débit d'alimentation, sans période de transition. Le débit volumique en entrée est de 90 L, soit une CVA de 6 kg DCO/m³/jour et un TSH de 10 jours, selon une modalité de chargement rapide en une fois au cours de la journée (les 90 litres sont chargés en 1 minute).

Lors de cette phase de mise en route et de stabilisation, nous avons rencontré quelques difficultés d'ordre mécanique, qui ont concouru à l'arrêt de la méthanisation (baisse anormale de la température du digesteur en période hivernale, bouchage de la pompe centrifuge et absence de recirculation du substrat). D'autre part, cette phase de pré-test a mis en avant la vidange anormale des boues granulaires après la première augmentation de charge, d'où la nécessité de revoir les modalités de chargement. Afin de palier à cette perte de biomasse, il a été nécessaire de réensemencer le digesteur à plusieurs reprises.

Les essais préliminaires nous ont donc permis de valider la faisabilité du traitement du lactosérum par la méthanisation sans dysfonctionnements majeurs dus aux caractéristiques mêmes de l'effluent, et nous ont orientés vers une modalité d'apport très fractionnée sur 24h, plus adaptée au procédé utilisé.

Au cours des deux dernières phases expérimentales, nous avons cherché à déterminer le niveau de charge optimal pour le bon fonctionnement du process et à évaluer l'impact d'une augmentation de charge sur la production qualitative et quantitative de gaz au cours d'une journée, ainsi que sur les performances épuratoires en termes d'abattement de la charge organique et du niveau de pH.

Deux niveaux de charge ont ensuite été testés dans une dernière phase expérimentale, 6 et 8 kgDCO.m⁻³ de digesteur.j⁻¹ (équivalents à un débit volumique de 90 et 120L de lactosérum/jour), selon les mêmes modalités d'apport fractionnées sur 24h.

Des observations complémentaires ont été réalisées suite à cette étude.

- **Contrôles et mesures**

Afin de tester les deux niveaux de charge, chaque campagne analytique a duré une semaine, à raison de :

-5 prélèvements de biogaz par jour durant 3 jours consécutifs et suivi de la production quantitative journalière.

-1 analyse physico-chimique de digestat par campagne

-1 suivi de la DCO entrante et sortante durant 3 jours consécutifs

Les résultats analytiques principaux de ces essais sont consignés dans le tableau ci-dessous.

RÉSULTATS :

Date	du 11/ 06/ 2012 au 13/ 06/ 2012	du 10/ 07/ 2012 au 12/ 07/ 2012
Durée	1 semaine	1 semaine
Débit volumique (L/ jour)	90	120
Modalités de chargement	fractionné sur 24h	fractionné sur 24h
Fréquence de chargement	1min/ 15min	1min/ 7min30sec
CVA (kgDCO/ m ³ digesteur/ jour)	6	8
TSH (jour)	10	7,5
DCOe moyenne (gDCO/ L)	57,5	57
Taux d'abattement DCO moyen sur effluent décanté (%)		
	DCOs-d 79,7	80,2
Concentration en MVS dans le digesteur (g.L ⁻¹)	9,23	8,24
Concentration en MVS dans l'effluent sortant par la surverse (g.L ⁻¹)	7,32	7,28
Concentration moyenne biogaz(%)		
	CH ₄ 57,34	49,84
	CO ₂ 35,85	43,1
Production gaz moyenne (m ³ / jour)	2,59	3,08
Rendement en biogaz (m ³ / m ³ lactosérum)	33,45	26,86
Rendement en méthane (m ³ / m ³ lactosérum)	20,23	13,09
Rendement en méthane (m ³ / kgDCO abbatue)	0,44	0,28
Rendement en méthane (%du max théorique)	95,6	61

Les résultats de la première campagne analytique (i.e débit volumique 90L) font état de bonnes performances épuratoires avec un taux d'abattement de la charge organique de 80%. L'effluent entrant étant très fortement chargé, l'abattement de la DCO n'est cependant pas suffisant pour permettre son rejet dans l'environnement sans post-traitement. La production énergétique est proche des résultats attendus et donnés dans la littérature avec un rendement en méthane par kilogramme de DCO abattue de 0.44m³, soit 20,23m³ de méthane/m³ de lactosérum.

L'augmentation de charge donne des performances moindres concernant la production de biogaz. La teneur en méthane du biogaz est faible (<50%) avec un rendement en méthane par kilogramme de DCO abattue de 0,28 m³.

Ces résultats sont néanmoins à nuancer Au cours de l'étude, il a pu être observé une vidange anormalement rapide des boues granulaires du digesteur (évacuation des granules plus rapide que la formation de ces dernières).

Pour des raisons pratiques, nous n'avons pas réensemencé le digesteur entre les deux campagnes analytiques (90 et 120L) et la concentration en microorganismes (équivalente au taux de MVES dans le digesteur) en début de deuxième phase était insuffisante pour un tel niveau de charge appliquée et inférieure aux valeurs seuil préconisées (de 0,5 à 1 kg de DCO.kg⁻¹ de MVES.j⁻¹, soit 8 à16 kg de MVES lorsque la charge appliquée est équivalente à 8kg de DCO.j⁻¹)²

Néanmoins suite à cette dernière phase expérimentale et à plusieurs reprises, un réensemencement partiel du digesteur a permis de relancer la production de biogaz après une déstabilisation importante du processus.

Nous admettons donc que la déstabilisation du digesteur et les rendements inférieurs après l'augmentation de charge de 6 à 8 kg DCO/m³/jour sont principalement dus à une perte de biomasse et non à un niveau de charge trop élevé par rapport aux capacités du digesteur. Il serait nécessaire d'évaluer à nouveau les performances du digesteur à un niveau de charge équivalent lorsque la concentration en micro-organismes est suffisante.

CONCLUSION / PERSPECTIVES :

Il apparaît ainsi que l'utilisation du lactosérum acide pur n'impose pas de contraintes de gestion spécifique concernant le niveau de pH. La remontée artificielle du pH au sein du digesteur n'intervient qu'exceptionnellement, en cas de déséquilibre profond. Aucune accumulation de composés toxiques ou susceptibles d'inhiber la méthanisation (e.g. concentrations en calcium et phosphore inférieures à 1 g.L⁻¹) n'a été observée au sein du digesteur.

La première phase de pré-essai réalisée permet d'avancer le fait qu'une modalité de chargement très fractionnée sur 24h apporte de meilleurs résultats concernant les performances énergétiques et épuratoires que lors d'un chargement rapide en une fois par jour. Même pour un faible débit volumique (1/10^{ème} du volume utile du digesteur), l'à-coup de charge est tel qu'il entraîne une variabilité de la production qualitative (teneur en méthane du biogaz variable de 22% à 65%) et quantitative de biogaz au cours d'une journée, ainsi qu'une vidange anormalement rapide des boues granulaires du digesteur.

Une charge appliquée équivalente à 6kg de DCO.l⁻¹.j⁻¹ donne de bons résultats, proches des valeurs maximales théoriques, en termes de rendement épuratoire et de production énergétique sur une période de 1 mois.

2 *MOLETTA 2008, Technologies de traitement des effluents industriels par la méthanisation. Stratégies et traitements, in La méthanisation, Tec&Doc, Paris, pp 133-153*

Cependant, la perte anormale de biomasse bactérienne a été un frein dans la recherche du niveau de charge optimal et n'a pas permis une amélioration des rendements épuratoires et énergétiques après augmentation de charge.

Le maintien des boues dans le digesteur est donc le paramètre clé pour la pérennité du système. Dans un premier temps, il conviendra donc d'axer notre réflexion sur les modalités de chargement et de recirculation du substrat, ainsi que sur la conception même du pilote, afin de réduire la vidange des granules. Cette remarque nous aiguille sur la nécessité ou non d'un réensemencement périodique pour assurer une concentration constante et optimale en microorganismes. Nous pouvons également nous demander s'il ne serait pas plus judicieux de s'orienter vers un procédé à biomasse fixée sur support.

Dans un deuxième temps, il apparaît nécessaire de procéder à des essais complémentaires afin de valider l'hypothèse d'une amélioration des résultats de production énergétique à une charge supérieure, lorsque la quantité de microorganismes dans le digesteur est suffisante, afin de connaître les limites biologiques du process.

D'autre part, l'enregistrement en continu des temps de fonctionnement des différents éléments (résistance électrique, brûleur de la chaudière) ainsi que des compteurs volumétriques des circuits d'eau (compteur réchauffeur, chaudière et compteur général) doit permettre par la suite de réaliser un bilan énergétique, et d'appréhender :

- l'énergie potentielle du biogaz produit
- l'énergie dissipée par l'échangeur de la chaudière
- le rendement énergétique de la chaudière
- l'énergie dissipée par le réchauffeur
- l'énergie disponible pour une valorisation externe

L'étude du bilan énergétique de l'installation est actuellement en cours.

Enfin, d'un point de vue plus technique, la méthanisation mono-substrat dans un contexte fermier nécessite une adaptation quant à la disponibilité saisonnière de celui-ci. Les variations de charge sont difficilement tolérées par le procédé de méthanisation. Aussi, la question de la gestion des périodes de manque en substrat (périodes de tarissement des animaux) du surplus ne pouvant être géré par cette voie se pose. Il s'agit là d'envisager la co-digestion d'autres substrats issus de la production laitière, type laits non fromageables ou post-colostraux, et de prévoir un dispositif de traitement/gestion du lactosérum en excès.

Des études complémentaires seront réalisées dès 2013 avec pour objectif l'augmentation de la charge appliquée, après une réadaptation préalable du pilote.