

Methanisation du Lactosérum à La Ferme

LEFRILEUX Y. (1), CASTILLON P. (2),

(1) Station expérimentale caprine du Pradel EPLEFPA – Institut de l'Élevage, Le Pradel, 07170 - MIRABEL

(2) Institut National Polytechnique – Ecole d'ingénieurs de Purpan, 31076 Toulouse

RESUME

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. Le lactosérum, mélangé aux eaux blanches, représente à lui seul 80% de la charge polluante des rejets. La méthanisation de ce substrat est une alternative intéressante aux procédés de gestion/traitement déjà existants. 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 eu pour but de participer à la mise au point d'un procédé efficace, rustique, simple d'utilisation, financièrement abordable et adapté aux dimensionnements nécessairement réduits des ateliers fermiers. L'étude expérimentale a été menée sur un micro-pilote d'1 m³ 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 correspondant à 90L de lactosérum, selon une modalité d'apport très fractionnée sur 24h. Le rendement en méthane a atteint plus de 95% du potentiel théorique. En termes de performances épuratoires 80 à 90% 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 et soulèvent la question du maintien de la biomasse microbienne dans le digesteur pour assurer des performances optimales. La mise en place de supports favorisant la formation de biofilms bactériens à l'intérieur du digesteur semble une réponse à cette difficulté. La deuxième partie de l'essai a consisté à utiliser comme substrat du lactosérum dilué. Ces premiers essais laissent à penser à une amélioration possible dans le fonctionnement et la stabilité du process. Des essais complémentaires demandent à être conduits avant d'envisager un développement auprès des producteurs. L'attente des producteurs fermiers en la matière est importante : disposer de techniques permettant de concilier la diminution des rejets et la production d'énergie à la ferme.

On-Farm Methanation of Cheese Whey

LEFRILEUX Y. (1), CASTILLON P. (2),

(1) Station expérimentale caprine du Pradel EPLEFPA – Institut de l'Élevage, Le Pradel, 07170 – MIRABEL

SUMMARY

The management of whey, a residual product from the farm cheese process is a major concern for producers. Indeed, its high organic content makes it a highly polluting effluent. The whey mixed with white waters, represents 80% of the rejection's polluting load. The methanation of this substrate is an interesting alternative to the existing treatment processes. Apart from the purifying aspect, it enables valorizing an easily available source of organic matter into renewable energy, thanks to the production of biogas. The aim of this study was to participate in the development of an efficient, rustic, easy to use, cost effective process that is adapted to the necessarily reduced dimensions of the farm workshops. The experimental study was led on a micro pilot of 1 m³ sludge bed and continuously stirred reactor. The first experimental results show a good performance with a 6 kgCOD/m³/day level load, which corresponds to 90L of whey, according to a timely sequenced supply on 24h. The yield in methane reached over 95% of the theoretical potential. The DCO reduction performances were 80 to 90% of the entering DCO, reducing the impact of rejection in terms of pollution. When increasing the organic load from 6 to 8 kg DCO/m³/day a slightly adverse functioning was observed for the reactor thus raising the question on how to maintain the granular sludge in the reactor to ensure optimal performances. The development of supports favoring the formation of bacterial biofilms inside the reactor appears to give an answer to this difficulty. The second part of the study consisted in using diluted whey as a substrate. These first experiments suggest improvements be made in the functioning and stability of the process. Additional studies have to be made before considering a development with the producers. The farm producers' demand in this concern is important: to dispose of techniques that include both the decrease of rejection and the energy production on the farm.

INTRODUCTION

Les ateliers fermiers, comme tout élevage laitier, génèrent des eaux blanches liées aux procédures de nettoyage et de désinfection des installations de traite mais également, du fait de l'activité de transformation, des eaux de lavage liées au nettoyage des différents matériels (bassines de caillage, moules, tables d'égouttage, claies d'affinage). La quantité d'eaux blanches se trouve donc augmentée. Par ailleurs, dans de nombreuses exploitations, le lactosérum issu de la fabrication est intégré dans les effluents et augmente de manière sensible la quantité de matière organique rejetée (Frey-Diallo et al. 2002). Des enquêtes réalisées dans des

exploitations et sur des sites expérimentaux ont permis d'évaluer le niveau de ces rejets. Ainsi, on considère en moyenne que la production d'un litre de lait en transformation fromagère en technologie lactique va entraîner en termes de rejets environ 60g de DCO (Demande Chimique en Oxygène) si le lactosérum est mélangé aux eaux blanches, et environ 10g dans les autres cas (Menoret., 2001, PEP, 2000). Ces effluents de fromagerie, de par leur charge organique élevée s'avèrent être une source de pollution non négligeable pour l'environnement et nécessitent la mise en place de systèmes de traitement ou de stockage avant épandage. L'interdiction réglementaire du rejet direct dans le milieu naturel a amené la filière fermière à s'intéresser aux

différentes solutions techniques de traitement adaptées aux producteurs fermiers. Dans les faits si la valorisation directe du lactosérum par les animaux semble être une technique opérationnelle (Rapetti et al. 1995, Frey-Diallo et al. 2002, Institut de l'Élevage 2002), des contraintes structurelles ou même sanitaires pour certains producteurs rendent difficile son application. S'il existe un certain nombre de procédés pour l'épuration des mélanges eaux blanches-lactosérum (système SBR, filtres à pouzzolane) (Dolle 2003), la gestion du lactosérum seul permettrait de réduire la charge polluante totale des rejets ainsi que le dimensionnement des installations de traitement. Parmi les solutions techniques, si la méthanisation pour le traitement des effluents au niveau industriel du mélange eaux blanches et lactosérum existe, peu de données sont disponibles pour le traitement du lactosérum pur et en particulier pour les petites fromageries fermières. Cette voie demandait donc à être investiguée avec un double objectif : un volet environnemental concernant la réduction de la charge polluante organique et un volet énergie avec l'optimisation de la production de biogaz et sa valorisation pour la production d'eau chaude. Dans un contexte fermier, la miniaturisation est l'élément clé de cette démarche par la mise au point d'un procédé efficace, rustique, simple d'utilisation, financièrement abordable et adapté aux dimensionnements de petits ateliers fermiers. A terme, ces travaux devront permettre d'apprécier les performances énergétiques et épuratoires de l'unité de méthanisation et de dimensionner l'ensemble de la filière de traitement des ateliers fermiers.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1 DESCRIPTION DU PILOTE

Le pilote est constitué (1) d'un digesteur d'1m³ (900 L de volume utile) de type infiniment mélangé par recirculation du substrat, à lit de boues granulaires, (2) 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, (3) d'une cloche gazométrique de 450 L et (4) 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 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. Lorsque le volume de gaz est suffisant, il permet également la production d'eau chaude sanitaire

1.2 DEROULEMENT DES ESSAIS

Les essais se sont déroulés pendant 2 années successives (2012 et 2013) à la ferme expérimentale du Pradel. L'atelier est représentatif d'un atelier fermier moyen : 120 chèvres laitières, 500 Litres de lait transformés par jour au pic de lactation en fromages de type lactique.

Ces essais ont consisté dans un premier temps à alimenter un digesteur avec du lactosérum pur et ensuite avec du lactosérum dilué. Après une phase de mise en route, nous avons fait varier d'une part les modalités d'alimentation du digesteur (fractionné ou non) et d'autre part la quantité journalière de lactosérum incorporée. Afin d'accélérer la phase de démarrage nous avonsensemencé le réacteur avec des boues granulaires disponibles localement, celles-ci étaient issues d'une unité de méthanisation traitant les eaux de process de sucrerie. Après l'ensemencement et afin d'acclimater l'écosystème, le lactosérum a été introduit dans un premier temps avec une Charge Volumique Appliquée (CVA) très faible équivalente à 0,3 kg DCO/m³/jour (soit environ 5 litres de lactosérum/jour). Ainsi, durant un mois et jusqu'à atteindre la charge nominale du digesteur, la CVA en

lactosérum a été augmentée pour atteindre 2 kg DCO/m³/jour (soit 30 L/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 pour atteindre une CVA de 6 kg DCO/m³/jour (90 L/jour) et un Temps de séjour Hydraulique (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). La vidange anormale des boues granulaires après la première augmentation de charge nous a amené à fractionner les apports de manière à charger environ 1 Litre de lactosérum toutes les 15 minutes. Avant cette modification du mode d'alimentation, un nouvel ensemencement du pilote avec des boues a été nécessaire afin de relancer l'activité de méthanisation. Cette procédure a eu pour conséquence de limiter le lessivage trop important des boues granulaires liées aux à-coups de charge. Dans un deuxième temps, la CVA a été augmentée d'environ 30 % pour atteindre 8 kg DCO/m³/jour (120 L/jour) et un TSH de 7,5 jours avec le même type de fractionnement.

Lors de la 2^{ème} année, afin de faciliter le maintien de la biomasse microbienne, 200 L de supports (bioflow 30 ®) ont été ajoutés dans le digesteur. La surface spécifique élevée de ces supports (302 m²/m³) devrait faciliter le maintien des populations microbiennes au sein du digesteur par une formation importante de biofilms Ceci a été évalué principalement par une observation visuelle des supports en fin d'essai. Après la remise en fonction du méthaniseur, la CVA a été progressivement augmentée de 1 à 4 kg DCO/m³/jour. Dans un deuxième temps, en maintenant le même niveau de charge, 2 périodes successives ont été mises en place en faisant varier le temps de séjour par une dilution du lactosérum avec de l'eau (respectivement non dilué et dilué 1/1).

1.3 CONTROLES ET MESURES

1.3.1 Performances épuratoires

La DCO et le pH du lactosérum pur sont mesurés à chaque remplissage de la précuve. Au niveau du digesteur, le pH est mesuré soit en continu (année 1), soit en ponctuel (année 2). La DCO brute est mesurée sur l'effluent sortant par la surverse en fin de journée analytique afin d'évaluer le taux d'abattement (année 1 et 2). Des analyses physicochimiques (année 1) sur le digestat ont également été réalisées (matières en suspension, acides gras volatils, azote total, alcalinité, phosphore total, calcium) pour évaluer le bon fonctionnement du digesteur.

1.3.2 Composition du biogaz

Des prélèvements ont été réalisés 3 jours consécutifs (année 1) lors des apports avec des CVA de 6 et 8 kg DCO/m³/jour, à 5 moments différents au cours de la journée (+1 h, +4h, +6h, +12h, et 24h après le chargement) afin d'identifier d'éventuelles variations au cours de la journée. Les prélèvements sont réalisés à l'aide d'un sac en tedar de 0,5 L pour une analyse de composition (N₂, H₂S, O₂, CO₂ et CH₄). Lors des suivis (année 1 et 2) des tests de combustion et d'appréciation qualitative de la flamme lors des différentes périodes ont été réalisés.

1.3.3 Autres mesures

Les caractéristiques du lactosérum produit ont fait l'objet de plusieurs séries d'analyses au cours de ces 2 années, (pH, DCO, azote total, azote ammoniacale, matières grasses et matières sèches). Afin de préciser les besoins en eau chaude d'un atelier fermier, des compteurs (eau et électricité) ont été mis en place aux différents points de consommations liées au lavage de la machine à traire et du matériel de la fromagerie du Pradel.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. CARACTERISTIQUES DU LACTOSERUM

La qualité du lactosérum peut varier au cours de l'année et ce en fonction de la qualité du lait mis en fabrication (variation saisonnière des taux butyreux et protéiques) mais également en fonction de la technologie fromagère. Les quantités de matières grasses du lactosérum ont ainsi varié de 1,95 à 2,27g/L lors des contrôles effectués en année 1 et autour de 2,7 g/L au début de l'été de l'année 2 et pour les matières azotées totales entre 1,1 et 1,6 g/L en année 1 et autour de 1,8 g/L en année 2. La quantité d'azote ammoniacal est faible (0,01 g/L) et l'azote est sans doute majoritaire sous forme de protéines dans ce type de substrat. Ces données sont conformes à celles de la littérature (Menoret 2001 ; Masle et al 2002). La concentration en DCO du lactosérum récupéré sur les tables d'égouttage est également sujette à des variations. Ainsi, si les valeurs observées sont souvent supérieures à 50g/L (57,5 en année 1 et 70,3 en année 2), les pertes de matières (fines) retrouvées dans le lactosérum lors de la phase d'égouttage peuvent sans doute expliquer ces écarts. Les valeurs retenues pour le calcul des charges est souvent autour de 60 g/L (PEP Caprins, 2000, Gonnon, 2002). En technologie lactique, les valeurs de pH des lactosérums sont souvent autour de 4,3 au niveau de l'égouttage et malgré un stockage limité (inférieur à 24 heures) les valeurs observées à l'entrée du digesteur (année 2) sont sensiblement inférieures (moyenne 3,61 et écart type 0,23). L'évolution du substrat semble inévitable et est certainement liée aux conditions d'acheminement du substrat au niveau de la cuve située en amont du digesteur.

2.2. PERFORMANCES EPURATOIRES

Lors de l'année 1, avec une CVA de 2 kg DCO/m³/jour (soit 30 L/jour), les taux d'abattement de la DCO sortante étaient de 73 % en moyenne avec un maximum de 97 % et une tendance à l'amélioration au cours des phases d'alimentation. L'augmentation de charge de 2 à 6 kg de DCO/m³/jour a permis une amélioration des performances générales du digesteur (85 % d'abattement). Après modification des modalités d'apport et augmentation de la CVA de 6 à 8 kg, le rendement épuratoire a été globalement maintenu. Ces résultats sont certainement biaisés du fait d'un réensemencement du pilote dans les semaines qui ont précédé les campagnes de mesures. Lors de l'année 2, avec des niveaux d'apport ne dépassant jamais 4 kg DCO/m³/jour, les taux d'abattement étaient en moyenne de 87,9% (écart type 0,07) et ce sans réensemencement du pilote au cours de la campagne. La dilution du lactosérum n'a pas affecté de manière négative l'efficacité du dispositif et a même eu tendance à l'améliorer (abattement moyen = 92,5 %). Lors de l'année 1 le pH du digestat était toujours supérieur à 7, ce qui n'a pas toujours été le cas lors de l'année 2. Le caractère acide et acidogène du lactosérum en est certainement la raison. Lors de ces épisodes, la mise à la diète du digesteur pendant quelques jours a permis rapidement de corriger cet état (ITG 1995). Ceci est révélateur du caractère non réhibitoire de ces dysfonctionnements. Les premiers éléments dont nous disposons laissent à penser qu'afin de maintenir une bonne stabilité du fonctionnement du digesteur, les caractéristiques des matières entrantes semblent déterminantes. S'il n'a pas été possible d'identifier des éléments défavorables à une bonne stabilité du fonctionnement du process, des hypothèses ont été évoquées. Celles-ci concernaient principalement une forte tendance à l'intoxication aux acides liée au pH du lactosérum, et la présence de facteurs limitants tels le manque de nutriments. Le spectre en AGV (année 1) issu des prélèvements réalisés au niveau du digesteur mettent en évidence un rapport acide Acétique/ acide Propionique nettement en faveur de ce dernier ce qui conforte l'hypothèse d'une acidose du digesteur. La dilution du lactosérum (année

2) semble confirmer une amélioration du fonctionnement du digesteur. Il est probable que la dilution de la matière entrante ait diminué l'acidité du réacteur par lessivage des acides. Dans la mesure où cet élément serait validé à moyen et long terme, cela remettrait éventuellement en cause la possibilité de mettre en place un système de traitement du lactosérum pur et de s'orienter vers une phase de traitement qui intégrerait l'ensemble des eaux blanches et du lactosérum. La conséquence directe serait le dimensionnement du digesteur qui, de ce fait, serait augmenté d'un facteur équivalent. Dans cette hypothèse, le niveau optimum de charge demanderait également à être précisé.

2.3. PRODUCTION ET COMPOSITION DU BIOGAZ

Les résultats de production et de caractérisation des gaz produits en année 1 sont consignés dans le tableau 1. Avec une CVA de 6 kg, la production énergétique est proche des résultats attendus et donnés dans la littérature (Ghaly et al 2000), avec un rendement en méthane par kg de DCO abattue de 0,44 m³, soit environ 20m³ de méthane par m³ de lactosérum. La composition du gaz (environ 60 % en CH₄ et 40 % en CO₂) a des caractéristiques compatibles avec l'utilisation d'une chaudière à gaz.

Tableau 1 : Effets de la charge volumique de lactosérum sur les performances moyennes du digesteur.

Débit volumétrique (L/jour)	90	120
CVA (kg DCO/m ³ /jour)	6	8
TSH (jour)	10	7,5
DCO entrée (gDCO/L)	57,5	57,0
Azote total N-K (g/L)*	1,31	
Taux d'abattement DCO sur effluent décanté (%)	79,7	80,2
MVS dans le digesteur (g/L)	9,23	8,24
à la surverse	7,32	7,28
pH du digesteur	7,57	7,14
Alcalinité Totale (meq/L)	139,80	70,35
Concentration moyenne du biogaz % CH ₄	57,34	49,84
%CO ₂	35,85	43,10
Production de biogaz (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
(m ³ /kg DCO abattue)	0,44	0,28
AGV (g/L)		
Acétate	0,095	1,407
Propionate	3,17	2,727
Isobutyrate	0,07	0,169
Butyrate	<10 ⁻⁴	0,133
Isovalérate	0,081	0,458
Valérate	<10 ⁻⁴	0,585
AGV totaux eq Acétate	2,761	4,436

CVA : Charge Volumique Appliquée ; TSH : Temps de Séjour Hydraulique ; DCO : Demande chimique en Oxygène ; MVS : Matières Volatiles en Suspension ; AGV : Acide Gras Volatils
Azote total : données moyennes sur la période n=3

Dans nos conditions expérimentales, les résultats après l'augmentation de charge (passage de 6 à 8 kg de DCO) font état de performances moindres concernant la production de biogaz. La teneur en méthane est faible (<50%) avec un rendement de 0,28 m³ de CH₄ par kg de DCO abattu, soit environ 1/3 de moins avec le même taux d'abattement de la charge organique. L'accumulation d'Acides Gras Volatils (ég. acétate), la diminution de pH et de l'alcalinité du digestat

traduisent un dysfonctionnement dans le processus de méthanisation. Ainsi, la production de biogaz chute avec une teneur en méthane plus faible. Cette déstabilisation est caractéristique d'une surcharge organique (Moletta, 2008) induite non pas par l'augmentation de la charge elle-même, mais par une perte de biomasse bactérienne au sein du digesteur. La mise en place de supports à l'intérieur du digesteur a permis de limiter ce problème (année 2). En effet, la constitution de biofilms permettant le maintien des populations microbiennes nécessaires au processus de méthanisation a pu être constatée par l'observation visuelle du digestat sortant de la surverse et de l'état des supports en fin d'année 2 après vidange du digesteur. Lors de la 2^{ème} année les rendements obtenus avec du lactosérum pur ont été plus faibles que l'année précédente (28,2 m³ biogaz vs 33,45) malgré la présence des supports, sachant que contrairement à l'année précédente, le digesteur n'a pas été réensemencé au cours de la campagne avec des boues actives. La dilution sur la base de 50% de lactosérum et 50% d'eau a eu pour conséquence d'améliorer le fonctionnement du digesteur : augmentation de 8 points du taux d'abattement de la DCO du digesteur, de 0,4 points la valeur du pH et une production de biogaz plus importante (+ 32,6 %). Les tests de combustion à la sortie de la cloche de stockage ont permis d'estimer une qualité de gaz avec une proportion de méthane de l'ordre de 60%, mais cela demande à être vérifié.

Tableau 2 : Effet de la dilution du lactosérum sur les performances du digesteur

	pur	Dilué (1/1)
Débit volumétrique moyen (L/jour)	50	100
CVA (kg DCO/m ³ /jour)	3,90	3,07
TSH (jour)	18	9
DCO entrée (gDCO/L)	70,0	35,6
Taux d'abattement DCO sur effluent décanté (%)	86,4	92,4
pH du digesteur	6,73	7,12
Production de biogaz (m ³ /jour)	1,31	1,22
Rendement en biogaz (m ³ / m ³ lactosérum)	28,2	37,42
Rendement en méthane* (m ³ / m ³ lactosérum) (m ³ /kg DCO abattue)	16,9 0,32	22,45 0,36

*le % de CH₄ a été estimé à 60%

Actuellement, les travaux se poursuivent pour évaluer les effets avec une dilution plus poussée (1/2). Ceci est largement justifié par les volumes observés chez les producteurs, 2 à 3 litres par litre de lait transformé et par leurs caractéristiques (DCO de 2 à 3 g/L, taux de matières azotées totales <0,5 g/L) (Boutin et al 1999). Le mélange de l'ensemble de ces effluents (eaux blanches et lactosérum) aura pour effet de diminuer fortement la concentration en DCO et celle en matières azotées totales, en moyenne d'un facteur de 3. Les concentrations moyennes en matières azotées totales seront de ce fait entre 0,4 et 0,5 g/L. La grande variabilité des pratiques observées lors d'enquêtes réalisées auprès de fermes commerciales en ce qui concerne les procédures de collecte du lactosérum incitent à s'orienter vers le mélange de l'ensemble des effluents de laiterie avant méthanisation (Gonnon, 2002). Les mesures de consommation d'eau réalisées à la ferme Expérimentale du Pradel confirment les données de la littérature et le ratio ramené au litre de lait est dans notre cas de 2,5 litres d'eau par litre de lait produit dont 1 litre d'eau chaude et une production de 0,75 l de lactosérum. Dans l'hypothèse d'un mélange des eaux blanches et du lactosérum, d'un TSH de

10 jours pour une production de 100 litres de lait, le volume du digesteur serait environ de 3,3 m³, soit plus de 4 fois supérieur qu'avec du lactosérum pur. Ceci devrait permettre d'assurer une meilleure stabilité dans le fonctionnement du digesteur mais demande à être confirmé par des essais complémentaires. Une première approche au niveau énergétique semble montrer qu'avec un abattement de la DCO proche de 90 % la production de méthane induite devrait largement participer à l'autonomie énergétique pour la production d'eau chaude.

CONCLUSION PERSPECTIVES

Ces premiers éléments mettent en évidence l'intérêt en termes épuratoires de ce type de dispositif. Globalement, en moyenne sur ces 2 années, les concentrations de DCO des rejets étaient toujours inférieures à 10 g/L. Ainsi, à partir de ces informations, si 1 litre de lait en transformation génère 60 g de DCO, la phase de traitement du lactosérum par méthanisation permet à elle seule de réduire au minimum la quantité de DCO rejetée environ des 2/3, ce qui permettra de diminuer de manière tout à fait sensible le dimensionnement des installations des traitements complémentaires des rejets et de participer à la production d'eau chaude. Par ailleurs, le fonctionnement du digesteur semble être amélioré avec une dilution du lactosérum par de l'eau dans le cadre de cet essai. Cela a directement pour conséquence, pour une application dans des fermes commerciales, une augmentation du volume du digesteur, ceci devant faire l'objet d'essais complémentaires en situation réelle, c'est-à-dire avec des eaux blanches. Les perspectives de développement de ce procédé semblent intéressantes et l'attente des producteurs fermiers en la matière importante : disposer de techniques permettant de concilier la diminution des rejets dans l'environnement et la production d'énergie à la ferme.

Ces travaux ont fait l'objet d'une collaboration entre la station expérimentale caprine du Pradel et la société Autom'Elec (Saint-Etienne) et d'un appui de la société Moletta-méthanisation.

Cette action a bénéficié du soutien financier du CASDAR, du conseil régional RA et du ministère de l'Agriculture et de la Pêche. Les auteurs tiennent à remercier tout le personnel de la station expérimentale du Pradel ainsi que David Perrin-Caille, stagiaire de l'université de Savoie.

Boutin C., Bolevy L., Beckert J-L., Menoret C., Lienard A. 1999. Rapport interne CEMAGREF
Dolle JB., Frey-Diallo J., 3R 10, 341.
Frey-Diallo J., Lefrileux Y., Manson R., 3R, 9, 379.
Ghaly A.E., Ramkumar D.R., Canadian Agri. Engineering 42, 173-183
Gonnon S. 2002 mémoire ingénieur ENESAD Institut de l'Élevage 2002 fiches coproduits. www.liddele.fr ITG 1983., Etude SS 83.10.D
Koster IW., Lettinga G., Biol.Wastes, 25 51-59
Rapetti L., Falaschi U., Lodi R., Vezzoli F., Tamburini A., Greppi F., Enne G., SRR 16, 215-220
Masle I., Bonnin V., Raynal-Ljutovac K., 3R, 9, 377
Menoret C., 2001. Thèse sciences eau env. Montpellier I
Moletta R., Tech&Doc 2008: 133-153 .
PEP Caprins 2000., fiche en Détail D01302