

Aurore TOUDIC, Anne-Sophie Langlois, Frédéric Kergourlay, Jean-Yves Carré, Chambre d'agriculture de Bretagne ; **Kristell Lavenan,** Utilities Performance ; **Patrick Dabert,** Irstea ; **Thomas Lendormi** Université de Bretagne Sud

Le procédé de méthanisation passive Nénufar est testé à la station expérimentale de Guernévez depuis juin 2016. Suite aux améliorations apportées, le procédé est techniquement au point. La rentabilité, accessible en moins de 8 ans sous conditions, est à apprécier au cas par cas.

1. Introduction

La petite méthanisation à la ferme possède de nombreux atouts environnementaux mais les coûts d'investissement et de fonctionnement restent élevés. Or il est connu que les effluents d'élevage émettent du méthane naturellement au stockage. Cette méthanisation passive (sans chauffer le lisier) est cependant peu productive. L'expérience canadienne (King et al, 2011) et française (Dabert et al, 2015) montre en effet qu'en dessous de 13°C, les bactéries méthanogènes travaillent au ralenti.

Depuis 2014, la société Nénufar commercialise un procédé de couverture de fosse flottante capable de capter les gaz émis durant le stockage du lisier, dont le méthane. Ce méthane peut être brûlé par une chaudière spécifique pour produire de l'eau chaude au service des ateliers d'élevages (porcs, veaux de boucherie,...). L'intérêt du procédé repose sur ses coûts d'investissement et de fonctionnement réduits. Il est adaptable sur les ouvrages de stockage existants et a été récompensé par un Innov'SPACE (2014) et Biogaz d'Argent (2015).

Dans le cadre du projet Prométhys, piloté par Utilities Performance et financé par l'Ademe et le Conseil Régional de Bretagne, la station expérimentale des Chambres d'Agriculture de Bretagne de Guernévez a équipé en 2016 une de ses fosses existantes du procédé Nénufar. L'objectif du projet est de tester l'intérêt de la méthanisation du lisier de porc à basse température, de démontrer la faisabilité opérationnelle du procédé Nénufar et d'en déterminer les conditions de rentabilité. Il s'agit de vérifier que la capture du méthane en hiver est possible et suffisante, lorsque les besoins de chaleur sur les élevages sont les plus élevés.



2. Bibliographie

2.1. Intérêt de la méthanisation « rustique » en agriculture

Selon l'inventaire national du CITEPA (2014), les émissions issues des déjections animales représentent 19 % des émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole. La très grande majorité de ces émissions est liée au méthane. Son impact sur le réchauffement climatique est 21 fois supérieur à celui du CO₂. Le méthane est spontanément émis lors du stockage des effluents liquides. Le changement climatique étant devenu une préoccupation majeure des politiques publiques au niveau national et supranational, des solutions efficaces, génériques mais surtout facilement adaptables aux différents types d'élevages doivent être trouvées.

La méthanisation agricole fait partie des solutions car elle permet la capture du méthane et son utilisation pour produire de l'énergie renouvelable. Cette filière est en plein essor profitant des dispositifs incitatifs (tarifs de rachat de l'électricité, injection sur le réseau de gaz naturel) et d'un retour d'expérience croissant.

Les procédés de méthanisation classiquement rencontrés aujourd'hui en élevage cherchent à optimiser la dégradation de la matière organique en un minimum de temps. Le digesteur étanche et isolé est chauffé à 35-40°C (méthanisation mésophile) ou à 55-60°C (méthanisation thermophile), et brassé régulièrement pour accélérer la dégradation de la matière. Celle-ci ne reste que quelques dizaines de jours dans le digesteur. Pour avoir un ouvrage efficace il faut le construire à neuf. Cependant, cette approche nécessite des investissements lourds et impose des contraintes opérationnelles fortes. Les seules déjections animales permettent encore difficilement aujourd'hui une production d'énergie suffisante à l'équilibre financier de l'installation.

En méthanisation « rustique », le principe est d'adapter une simple couverture sur une fosse existante, et de laisser la matière se dégrader sur toute la durée du stockage, à température ambiante (méthanisation psychrophile).

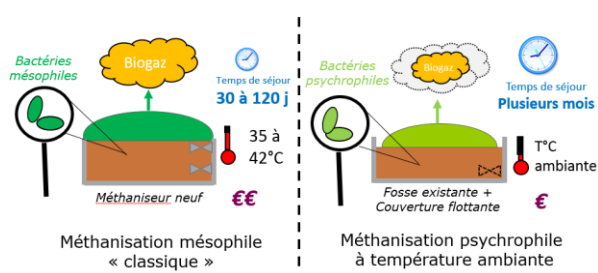


Figure 1 : Comparaison méthanisation classique et méthanisation sans chauffer

2.2. Résultats préliminaires obtenus en laboratoire

Des essais en laboratoire ont été réalisés par l'IRSTEA sur l'adaptation d'inocula aux changements de température et sur la production de méthane à température ambiante. Ces travaux ont été complétés par l'UBS sur la production de méthane dans un milieu stable à 13°C. Les premiers résultats ont montré que le potentiel méthanogène pouvait varier du simple ou double suivant l'inoculum, le pH, la qualité du lisier... En effet, les résultats obtenus concernant la production de méthane permettent d'anticiper que, sur l'année, 50% à 75% du potentiel méthanogène s'exprimerait en conditions psychrophiles.

2.2.1. Essais en pilotes extérieurs de 200L

Les tests menés par l'Irstea se sont déroulés en extérieur, dans des bidons de 200 litres, pour différents inocula (issus métha mésophile, boues de fosse à lisier ou sans inoculum). Du lisier de porc est ajouté toutes les semaines dans les bidons, dans des quantités contrôlées.



Photo 1 : Dispositif expérimental : suivi de production en extérieur, en bidons de 200 litres

Dabert *et al* (2015) concluent que la température est le facteur qui influence le plus la production de biogaz. Des températures inférieures à 15°C limitent fortement la production. En période estivale, sur 7 mois de suivi, de 60 à 65 % du potentiel méthanogène du lisier a été exprimé, soit un rendement proche des procédés de méthanisation classiques, mais pour des cinétiques de production beaucoup plus faibles. Le biogaz produit est de bonne qualité : de l'ordre de 60-65 % de CH₄ en production « de croisière ». Aucun effet de l'inoculum sur la production de

biogaz en été n'a été observé. Ce résultat est surprenant et peut être expliqué par les fortes variations de température qui se traduisent par une moindre sélection des microorganismes. En revanche, la présence d'un inoculum initial permet d'obtenir plus rapidement des cinétiques de production élevées en conditions « difficiles » (hiver, lisier peu méthanogène). La dilution du lisier n'a qu'un effet très limité sur la production de méthane. Il n'a pas été mis en évidence d'inhibition forte (de l'ammoniac) qui serait levée grâce à la dilution. Enfin, dans les conditions d'expérimentation, 30 % de l'azote organique est minéralisé pendant la durée de stockage.

2.2.2. Développement d'inocula psychrophiles en laboratoire

Les tests en laboratoire sont réalisés par l'Université de Bretagne Sud (UBS) à 13°C, dans des bouteilles de 1 litre. Différents types d'inocula, dans différentes proportions (10, 25 et 50 %) sont testés. Du lisier est ajouté chaque semaine.



Figure 2 : Schéma du dispositif expérimental : utilisation de bouteilles de 1 litre, à 13°C

Dabert *et al* (2015) concluent qu'une adaptation de communautés bactériennes capables de produire du méthane à 13°C est possible. Un effet de l'inoculum sur la production de méthane est ici observé. Les conditions sont plus contraignantes que dans les essais précédents, seuls quelques groupes microbiens se sont adaptés. Dans ce cas leur présence dans l'inoculum de départ est primordiale. Cette adaptation des communautés est lente et nécessite plus de 200 jours. Un inoculum mésophile ne produit pas en deçà 15°C, mais un inoculum psychrophile peut produire du biogaz à 13°C, mais aussi 25 et 35°C. La cinétique de production obtenue à 25°C est alors comparable à celle obtenue en mésophile à 35°C. Une fois l'inoculum adapté, il peut produire quasiment toute l'année. Deux digesteurs avec les mêmes cinétiques de production de biogaz peuvent posséder des communautés méthanogènes différentes; et à l'inverse, deux digesteurs avec des communautés apparemment identiques peuvent avoir des activités très différentes.

Ainsi, en méthanisation chauffée ou à température ambiante, ce sont des bactéries méthanogènes qui travaillent. Mais ce ne sont pas les mêmes familles de bactéries

méthanogènes que l'on rencontre dans les différents systèmes. En mésophile ou thermophile, les bactéries sont adaptées à des températures stables 35-40°C ou 55-60°C, alors qu'en psychrophile, on cherche à favoriser le développement des bactéries sachant travailler à des températures proches inférieures à 10°C en hiver et supérieures à 20°C en été.

D'après Dabert *et al* (2015), il faut conserver environ 25 % du volume de lisier dans la fosse pour assurer une production de méthane suffisante. King *et al* (2011) obtiennent les meilleurs résultats pour 10 % comparés à 30 et 50 %.

2.3. Une couverture flottante à la surface des lisiers

La couverture « Nénufar » présente les mêmes intérêts qu'une couverture de fosse classique : pas de stockage inutile des eaux de pluie (moins de volume à épandre), réduction des émissions d'ammoniac de 80 à 90 % au stockage du lisier, ainsi que des odeurs. La particularité de la couverture réside dans sa capacité à capturer les gaz émis au stockage, dont le méthane. Ce méthane peut ensuite être brûlé par une chaudière « biogaz » pour produire de l'eau chaude. La couverture est adaptable sur des ouvrages de stockage de lisiers ou digestats de méthanisation en béton, ronds ou rectangles.

Nénufar est la seule entreprise française à proposer ce type de couverture à ce jour.

3. Matériel et méthodes

Les questions posées sur le fonctionnement du procédé sont nombreuses : durée de la montée en puissance ? Quantité et qualité du biogaz produit ? Périodicité annuelle : quel effet saison ? Quelle part du potentiel méthanogène du lisier est exprimée sur l'année ? Facilité de mise en œuvre et d'exploitation : au brassage, à la vidange ? Tenue au vent ? Quantité de lisier à laisser au fond de la fosse lors vidange pour optimiser la reprise de production ? Qualités agronomiques du « lisier digéré » obtenu ?

Les essais menés à Guernévez visent donc à vérifier d'une part la transposabilité du procédé en élevage (comment mettre en service la fosse ? quelle quantité de boues garder ? quels lisiers prioriser ? fréquence des apports ? quel temps de travail prévoir ?) **et d'autre part les conditions de rentabilité** (quelle proportion des besoins énergétiques de l'élevage la quantité de gaz produite permet-elle de couvrir ? Coût de mise en œuvre et d'entretien ? Temps de retour sur investissement).

Le travail a donc été réalisé en deux temps : l'évaluation du procédé sur une année complète à Guernévez et une analyse économique en particulier pour deux élevages porcins-types.

3.1. Evaluation du procédé en station sur un an

3.1.1. Fosse existante semi-enterrée de 300 m³

Une couverture « Nénufar » a été mise en service fin juin 2016 sur une fosse existante de Guernévez, semi-enterrée, en béton, d'environ 300 m³ (10 m diamètre et 4 m de profondeur). L'installation comprend une simple membrane qui recouvre 90 % de la surface du lisier, un boudin gonflable assurant sa flottaison, et un lest. Un compresseur maintient le boudin gonflé. Une poire de niveau, placée sous la membrane qui se gonfle avec les gaz émis par le lisier, actionne un surpresseur. Celui-ci envoie, par bâchées, le biogaz vers une chaudière tout inox. Un débitmètre à oscillations assure le comptage du volume de biogaz produit. Un système d'injection d'air sous le Nénufar participe à la désulfuration du biogaz produit. Un filtre à charbon actif placé en amont de la chaudière garanti le traitement de l'hydrogène sulfuré (H₂S) résiduel.

3.1.2. Suivi en trois périodes

L'année de suivi peut être découpée en trois périodes : 1/ « Été 2016 » de juin à août 2016, période estivale de stockage du lisier avant les épandages sur colza fin août, 2/ « Hiver 2016-2017 », de septembre 2016 à mars 2017, période hivernale de stockage de lisier, 3/ de mars à juin 2017, période d'épandage, donc de transition, durant laquelle la fosse est remplie puis vidée à plusieurs reprises.

Dans la suite de cette synthèse nous présenterons en détail les bilans de matière réalisés sur les périodes « Été 2016 » et « Hiver 2016-2017 ». Le comptage de la production de biogaz n'étant pas mis en place avant août 2016, le bilan de production n'est que partiel sur l'« Été 2016 ». L'évaluation du procédé s'est poursuivie sur une année supplémentaire, les résultats obtenus sur l'« Été 2017 » et sur l'« Hiver 2017-2018 » seront présentés plus succinctement.

3.1.3. Alimentations en lisiers

La fosse est alimentée successivement en lisiers de truies, de post-sevrage et d'engraissement afin de recréer un lisier mixte dans la fosse. Chaque lisier a été échantillonné lors de l'apport et analysé (MS, MO, NPK, AGV, potentiel méthanogène théorique).

Sur la période « Été 2016 », le bilan est initié fin juin après une période d'épandage. La fosse contient près de 65 m³ de lisier soit 20% du volume utile. Les alimentations en lisier ont été réalisées par apports de 10 à 35 m³ répartis sur l'été. Un prélèvement du contenu de la fosse (lisier digéré) a été réalisé au moment de l'épandage début septembre.

Sur la période « Hiver 2016-2017 », le bilan est initié fin septembre après la période d'épandage.

La fosse n'était pas entièrement vide, elle contenait 104 m³ de lisier, qui ont été échantillonnés. Les alimentations, de 8 à 24 m³ ont été réalisées environ tous les quinze jours entre le 23 septembre 2016 et le 31 janvier 2017. Un prélèvement du contenu de la fosse (lisier digéré) a été réalisé le jour précédent l'épandage, le 14 mars, date de la fin du bilan, un mois et demi après le dernier apport de lisier.

3.1.4. Agitation

La fosse de Guernévez est équipée d'un agitateur en poste fixe. La première année de suivi, l'agitateur est programmé pour fonctionner systématiquement 5 min par jour. La

seconde année de suivi, l'agitation est à l'arrêt. En revanche, la fosse est brassée après chaque apport de lisier sur les deux années de suivi.

3.1.5. Enregistrements quotidiens

La température et la hauteur de lisier dans la fosse sont enregistrées toutes les heures. La composition du biogaz en méthane (CH₄), dioxyde de carbone (CO₂), oxygène et H₂S est analysée tous les jours. La quantité de méthane produite est donc calculée tous les jours à partir du volume de biogaz produit et de sa teneur en méthane.

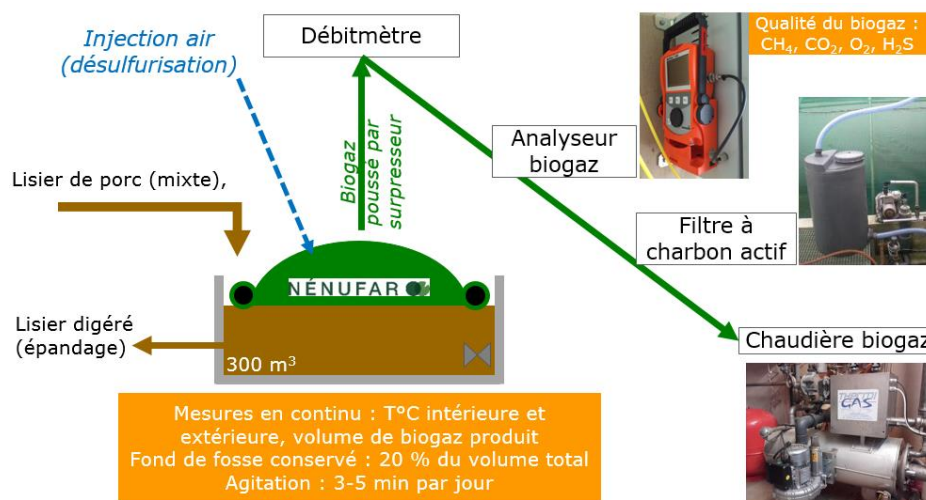


Figure 3 : Principe de fonctionnement de l'installation de Guernévez

3.2. Evaluation de la rentabilité : application à deux cas-types

3.2.1. Elevages naisseurs-engraisseurs de 210 et 300 truies

La simulation économique a été réalisée selon deux scénarios : (A) un élevage de 210 truies, naisseur-engraisseur, déjà équipé de chauffage eau chaude et devant changer son système de production d'eau chaude devenu obsolète, (B) un élevage de 300 truies, naisseur-engraisseur, ayant l'obligation de couvrir sa fosse à lisier pour diminuer les émissions d'ammoniac et n'étant pas encore équipé de chauffage à eau chaude.

3.2.2. Fosse de 1 200 m³, 69 à 86 % du besoin couvert

Les élevages (7 bandes, sevrage à 28 jours) disposent de 60 et 80 places de maternité respectivement, ainsi que de 1080 et 1440 places de post-sevrage, seuls stades physiologiques chauffés. Les consommations d'énergie liées au chauffage utilisées dans cette étude reposent sur les références connues en l'absence de système d'économie d'énergie dans les salles, soit 452 kWh/truie/an (Ifip, 2008).

Les simulations ont été réalisées pour une fosse de 1 200 m³, de 4 m de profondeur et 20 m de diamètre. Compte tenu des niveaux de production de biogaz mesurés à Guernévez, il a été considéré qu'en conditions optimisées (fosse semi-enterrée, climat tempéré, apports de lisiers toute l'année) l'installation Nénufar permettait de répondre à 86 et 69 % des besoins de chaleur des élevages A et B, respectivement.

3.2.3. Hypothèses économiques retenues

L'investissement se découpe en trois postes. (1) La couverture Nénufar et ses équipements (surpresseur, compresseurs, pompe vide-cave,...) s'élève à 38 500 €, valeur retenue pour le scénario A. Pour le scénario B, il n'est compté que le surcoût de 19 500 € lié à la spécificité de la couverture Nénufar, compte tenu de l'obligation de couvrir la fosse. (2) La chaudière mixte biogaz/propane tout inox de 70 kW et la ligne de valorisation du biogaz valent 45 000 €. (3) Les équipements de chauffage eau chaude dans les porcheries, en option, sont chiffrés à 8 €/place de post-sevrage et 250 €/place en maternité. Dans le contexte breton, les élevages bénéficient d'une aide à hauteur de 40 % de

l'investissement pour la couverture de fosse et la ligne biogaz complète (PCAEA, Plan Biogaz).

Les frais de fonctionnement intègrent les consommables et les frais de maintenance. La consommation électrique du procédé Nénufar a été calculée à partir de la consommation enregistrée à Guernévez. Les consommables sont réduits au charbon actif utilisé pour la désulfuration (hypothèse : renouvellement une fois par an). L'entretien et la maintenance concernent prioritairement l'analyseur de biogaz, présent pour contrôler le bon fonctionnement, ainsi que la chaudière. Une révision annuelle est nécessaire dans les deux cas.

Le temps passé comprend la surveillance quotidienne, le réglage de l'injection d'air et de la chaudière (30 min par semaine), ainsi que les interventions d'entretien et maintenance (1h par mois). Une demi-journée par an devra être consacrée au remplacement du charbon actif et au retrait des feuilles mortes de la couverture. Le coût de la main d'œuvre est chiffré à 19,52 €/h (2 SMIC horaire - tarif 2017).

Des économies liées à la couverture ont été considérées pour le scénario A : un gain à l'épandage grâce à l'eau de pluie non stockée (800 mm/an), un gain sur l'engrais minéral grâce à l'azote conservé. Pour le scénario B, la substitution de l'électricité par du propane, lorsque la production de biogaz est insuffisante, a été prise en compte. Avec un tarif du propane moyenné sur les cinq dernières années, c'est une économie de 4 ct €/kWh consommé qui est retenue.

4. Résultats

4.1. Procédé validé techniquement à Guernévez

4.1.1. Evolution de la température du lisier

La fosse de Guernévez est semi-enterrée. Elle bénéficie donc d'une inertie thermique. En hiver la température du lisier dans la fosse ne descend pas au-dessous de 8°C, et en été elle ne monte pas au-dessus de 20°C (Figure 5). Les bactéries méthanogènes qui assurent la production doivent donc être capables de travailler dans cette fourchette de températures.

4.1.2. Production de biogaz

La production de biogaz n'a été quantifiée qu'à partir du 10 août 2016. Sur la période « Eté 2016 », les productions de biogaz enregistrées vont de 20 à plus de 50 m³/j. Les productions les plus élevées sont notées lorsque la fosse est pleine, juste après les apports de nouveaux lisiers dans la fosse.

Sur la période « Hiver 2016-2017 », de septembre 2016 et mars 2017, la production de biogaz s'élève au maximum jusqu'à 40 m³/j, dans la fosse de 300 m³.

4.1.3. Qualité du biogaz

La qualité du biogaz est quant à elle très stable sur l'année (Figure 4). **Depuis la mise en service du procédé en juin 2016, jusqu'à mai 2018, le biogaz produit a une composition moyenne de 65,7 ± 5 % de CH₄, 25,8 ± 4 % de CO₂ et 8,5 % d'autres gaz** (oxygène, diazote, H₂S, COV et NO_x sous forme de traces...). Les plus fortes concentrations en méthane sont enregistrées en hiver lorsqu'il fait le plus froid (jusqu'à 72 % de CH₄). Les concentrations les plus faibles sont enregistrées au printemps, lorsque la fosse est à son niveau de lisier le plus bas et que les températures dépassent 15°C (58 % CH₄).

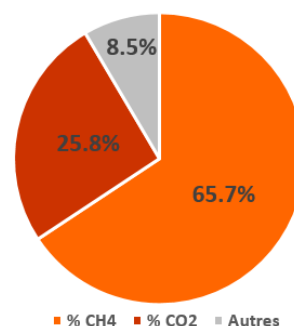


Figure 4 : Composition moyenne du biogaz produit à Guernévez de juin 2016 à mai 2018

4.1.4. Production de méthane

En multipliant la production de biogaz produite chaque jour par sa teneur en méthane (également analysée chaque jour), nous obtenons la production de méthane quotidienne (Figure 7). Sur la période « Hiver 2016-2017 », 1518 m³ de méthane ont été captés par la couverture et valorisés en eau chaude (soit une production de près de 12 500 kWh sous forme d'eau chaude). Sur cette période « Hiver 2016-2017 » la production moyenne de méthane est de 10 m³ /j. Elle reste comprise entre 5 et 15 m³ de méthane par jour au cœur de l'hiver, grâce aux apports fréquents de lisier dans la fosse (tous les 15 jours). **Dès le lendemain d'un apport de lisier la production de méthane est boostée, puis elle diminue au bout d'une semaine.** En l'espace de 10 jours toute la matière organique facilement biodégradable du lisier aura exprimé son méthane. Il faudra plusieurs mois au reste de la matière organique (plus résistante aux bactéries) pour se dégrader. Les lisiers apportés, sont des lisiers restés stockés sous les animaux de 1 à 3 mois. En engraissement pas exemple, une vidange est effectuée en milieu de bande, puis en fin de bande. Les lisiers de post-sevrage et maternité sont vidés en fin de bande et les lisiers de gestantes lorsque les fosses sont quasiment pleines.

Ainsi, malgré la baisse notable des températures en hiver, même en atteignant 8°C dans la fosse fin janvier, la production se maintient à un niveau intéressant. **La baisse des**

températures est compensée par l'augmentation progressive du niveau de lisier dans la fosse qui continue de produire du méthane, même si les cinétiques sont très lentes (Figure 6).

Entre septembre 2016 et mai 2018, plus de 5 500 m³ de méthane produits par la fosse de 300 m³ ont été mesurés (équivalent à plus de 45 000 kWh sous forme d'eau chaude). Le défaut de comptage sur trois mois (panne de débitmètre), pendant cette période, ne permettent pas un chiffrage complet.

Pour chaque mois, la production de méthane a été rapportée à la quantité de lisier moyenne présente dans la fosse (Tableau 1).

Sur la période « Hiver 2016-2017 », le temps de séjour moyen des lisiers dans la fosse est de 103 j. La production moyenne de méthane est de 0,28 m³ CH₄/semaine/m³ de lisier présent dans la fosse en hiver (de 0,12 à 0,51), comparable aux 0,1 à 0,6 NL CH₄/L/semaine obtenus à 13°C par Dabert et al en 2015. C'est également 15 fois moins que la production d'un lisier de porc en condition mésophile (38°C) pour un temps de séjour moyen de 33 j.

4.1.5. Production de méthane par m³ de lisier

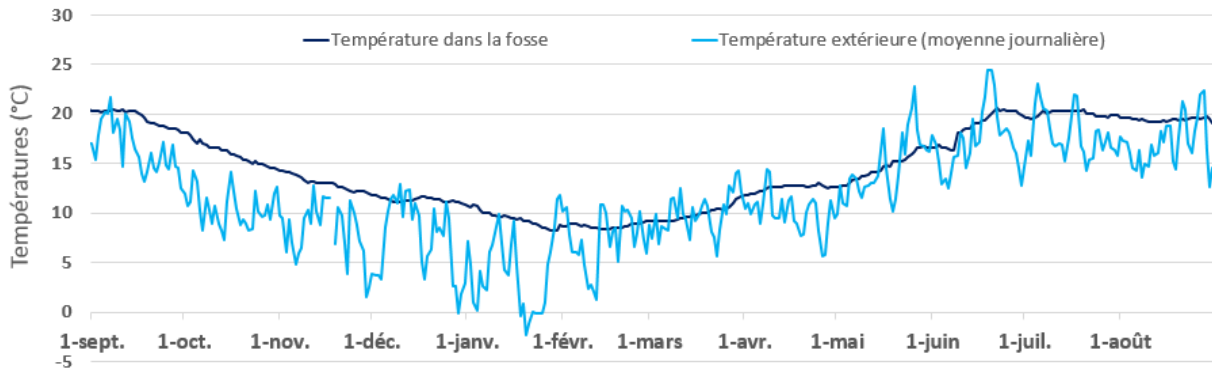


Figure 5 : Evolution des températures extérieures et du lisier dans la fosse sur une année (sept 2016-août 2017)

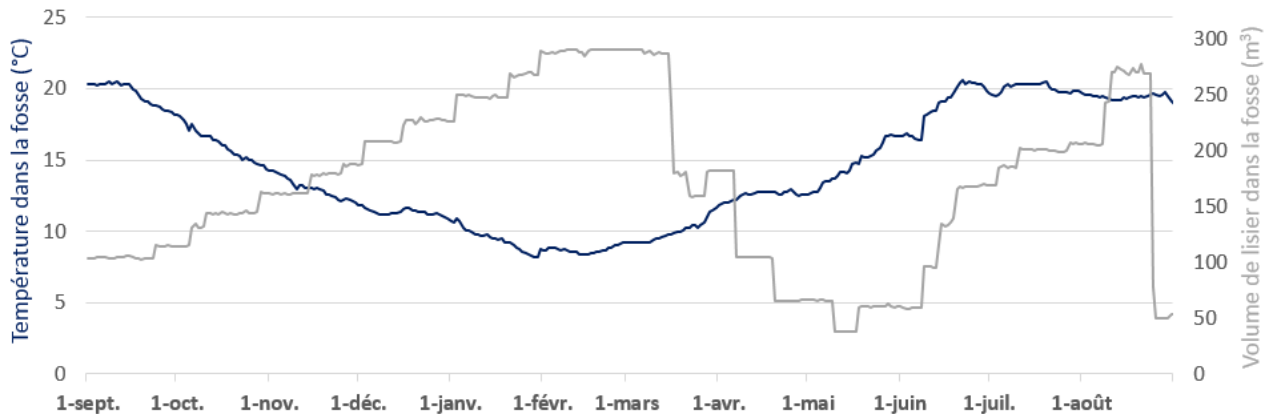
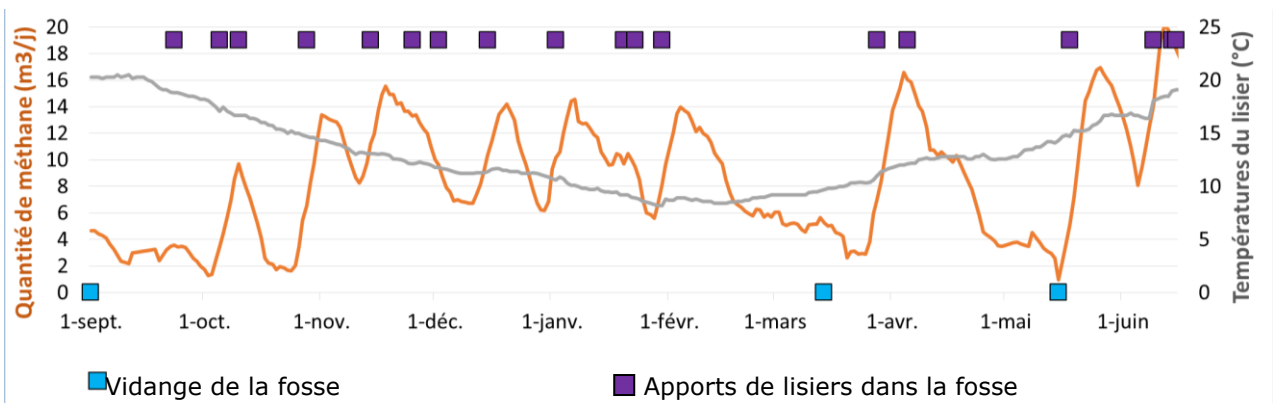


Figure 6 : Evolution de la température sur lisier dans la fosse et du volume de lisier dans la fosse sur une année (sept 2016-août 2017)



Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin
m ³ CH ₄	101	170	375	280	320	270	160	232	245	272

Figure 7 : Production journalière de méthane de septembre 2016 à juin 2017

Tableau 1 : Production moyenne de méthane par mois, par m³ de lisier présent dans la fosse et par semaine et équivalence en production d'eau chaude (de septembre 2016 à août 2017)

2016/2017	Température moyenne du lisier dans la fosse (°C)	Volume moyen de lisier dans la fosse (m ³)	Production de méthane m ³ /mois	Production de méthane m ³ /m ³ lisier/semaine	Equivalence MWh (eau chaude)
Septembre	19,5	107	121	0,26	1,1
Octobre	15,8	139	171	0,28	1,6
Novembre	12,8	173	376	0,51	3,5
Décembre	11,3	215	283	0,30	2,6
Janvier	9,5	254	321	0,28	2,9
Février	8,7	290	272	0,23	2,5
Mars	9,9	231	160	0,16	1,5
Avril	12,5	107	301	0,66	2,8
Mai	14,7	56	245	0,98	2,2
Juin	18,8	120	272	0,53	2,5
Juillet	20,0	195	483	0,56	4,4
Août	19,5	204	697	0,77	6,3

Tableau 2 : Composition moyenne des lisiers introduits dans la fosse et du lisier stocké, juste avant l'épandage pour les deux périodes « Été 2016 » et « Hiver 2016-2017 »

Période	Été 2016		Hiver 2016-2017	
	Lisier entrant moyen	Lisier digéré 24 août 2016	Lisier entrant moyen	Lisier digéré 14 mars 2017
Matière sèche (%)	5,65	4	5,5	3,6
Matière organique (%)	4,59	2,8	4,1	2,4
DCO Totale (mgO ₂ /l)	66 072	30 100	64 000	30 000
DCO soluble (mgO ₂ /l)	14 338	4 560	21 500	4 500
Azote total (%)	0,34	0,36	0,44	0,39
Azote ammoniacal (%)	0,21	0,23	0,29	0,23
Phosphore P ₂ O ₅ (%)	0,18	0,24	0,23	0,20
Potassium K ₂ O (%)	0,22	0,22	0,29	0,26
BMP NLCH ₄ /kg MO	-	-	346	56

Tableau 3 : Bilan matière pour quatre périodes suivies de 2016 à 2018

Période	Été 2016	Hiver 2016-2017	Été 2017	Hiver 2017-2018
Date premier apport lisier	21 juin 2016	28 sept. 2016	6 juin 2017	9 octobre 2017
Date échantillonnage lisier avant épandage	24 août 2016	14 mars 2017	25 août 2018	5 mars 2018
Matière sèche (kg)	-30%	-24%	-18%	-16%
Matière organique (kg)	-38%	-31%	-24%	-21%
Carbone organique total (kg)	-36%	-32%	-21%	-20%
DCO soluble (gO ₂)	-65%	-68%	-62%	-65%
Azote total (kg)	-4%	-2%	-1%	-4%
Phosphore P ₂ O ₅ (kg)	14%	-8%	-8%	-3%
Potassium K ₂ O (kg)	-7%	-2%	-2%	1%

Tableau 4 : Expression du potentiel méthanogène des lisiers pour trois périodes suivies de 2016 à 2017

Période	Été 2016	Hiver 2016-2017	Été 2017	Hiver 2017-2018
m ³ méthane captés	Comptage incomplet	1518	1452	> 1185 ; Pas de comptage sur Oct.
m ³ méthane exprimés	Comptage incomplet	1670	1633	1362
Part potentiel métha de lisiers entrants captée	Non Connue	60 %	78 %	> 59 %
Part potentiel métha des lisiers entrants exprimée	Non Connue	65 %	70 %	> 66 %

4.1.6. Jusqu'à 65 % du potentiel méthanogène exprimé en hiver

Un bilan matière complet, comparant la qualité des lisiers lors de l'entrée dans la fosse, et juste avant l'épandage a été réalisé pour les périodes « Eté 2016 » et « Hiver 2016-2017 » (Tableau 2).

Nous détaillons ici les résultats obtenus sur la période « Hiver 2016-2017 » pour laquelle les potentiels méthanogènes des lisiers ont été analysés. Les différents lisiers introduits dans la fosse (50 % de lisier d'engraissement, 31 % de lisier de truies et 19 % de lisier de post-sevrage) présentent une composition moyenne de 5,4 % de MS et 4,1 % de MO. Le potentiel méthanogène moyen des lisiers introduits est de 346 NL de CH₄/kg de matière volatile. Le lisier digéré, échantillonné en mars, avant épandage, présente un pouvoir méthanogène de 56 NL de CH₄/kg de matière volatile. Son pH est de 8,0.

Le bilan matière réalisé entre le début et la fin du stockage montre que 32 % du carbone organique sont dégradés, soit 1624 kg de carbone (Tableau 3, à 70 % sous forme de méthane et 30% sous forme de CO₂). Notons que seuls 2 % de l'azote sont perdus, témoignant de l'effet de la couverture sur la préservation de l'azote dans le lisier. Les défauts de bilan sur le phosphore et le potassium, de -8 et -2 % respectivement, confirment la fiabilité de ce bilan matière.

En calculant les volumes de méthane produits et enregistrés par le débitmètre et l'analyseur, on trouve sur la même période 1 518±25 m³ de méthane captés, soit 60 % du potentiel méthanogène des lisiers introduits dans la fosse. Seuls 90 % de la fosse sont recouverts par le Nénufar, soit une perte dans l'air (méthane non capté) de 152 m³. En prenant en compte ces pertes sur le bord de fosse, c'est 65 % du potentiel méthanogène des lisiers introduits qui s'est exprimé de fin septembre à mi-mars. Ce résultat est en accord avec Dabert et al (2015). En mésophile on peut atteindre 80 à 90 % en 30 j.

Sur la période « Eté 2016 », pour un temps de séjour moyen de 53 j des lisiers dans la fosse, la qualité de la digestion est très proche de celle enregistrée en hiver pour un temps de séjour moyen de 103 j (Tableau 3). Les résultats des différents bilans matière effectués sont très similaires.

4.1.7. Qualité agronomique du « lisier digéré »

La présence de la couverture de fosse Nénufar modifie très peu les conditions de stockage du lisier par rapport à une couverture de fosse classique (Tableau 2). Il est possible que la production de méthane soit très légèrement boostée, mais sur la durée de stockage totale du lisier, la différence doit rester très faible. Même

en l'absence de couverture, la matière organique se dégrade et libère du carbone dans l'air.

La qualité agronomique d'un lisier après stockage en fosse couverte d'une couverture classique ou d'un « Nénufar » varie peu. Dans tous les cas, avant épandage, il est indispensable d'évaluer la valeur azotée du lisier. La comparaison du lisier stocké à Guernévez en fosse munie d'une couverture classique ou d'une couverture Nénufar ne montre pas de différence flagrante (part de l'azote ammoniacal sur l'azote total pouvant aller jusqu'à 70%, et pH pouvant atteindre une valeur proche de 8).

4.1.8. Validation opérationnelle du procédé

Au-delà de la production de méthane, plusieurs points d'évaluation technique du procédé ont été identifiés. Le procédé semble robuste. A l'issue des deux années de suivi la qualité de la membrane ne semble pas s'être détériorée. La couverture et ses équipements n'ont pas bougé durant les différents coups de vents essuyés depuis juin 2016 (dont tempête Zeus de mars 2017). Au démarrage, la question de la tenue de la membrane à l'agitation du lisier était posée. La mise en route de l'agitateur et le brassage du lisier ne modifient pas la position de la couverture. La simplicité du procédé est également notée. Il demande peu de temps de suivi et la gestion est simple au quotidien (désulfuration, vérification des vannes de condensats, vérification d'absence de défaut de la chaudière).

4.2. Entre 80 et 90 % des besoins de chaleur couverts en conditions optimisées

Les résultats obtenus à Guernévez sur la fosse de 300 m³ ont été transposés à une fosse de 1200 m³ au fonctionnement équivalent : apports fréquents de lisiers mixtes de moins de 4 mois, climat tempéré, fosse semi-enterrée bénéficiant d'une certaine inertie thermique... La production de méthane a été traduite en production d'eau chaude. Les kWh produits ont été comparés au besoin de chaleur d'un élevage de 210 truies naisseur-engraisseur total pour chauffer post-sevrages et maternités. Les consommations sont considérées moyennes, sans équipement d'économie d'énergie en place.

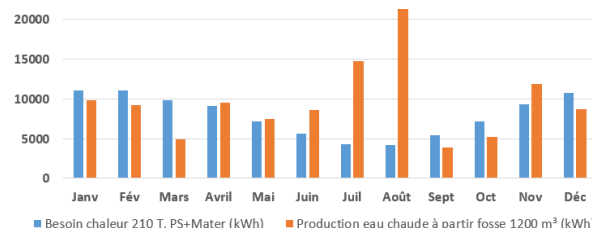


Figure 8 : Comparaison du besoin de chaleur d'un 210 TNE et de la production estimée de chaleur par une fosse de 1200 m³

C'est près de 85 % des besoins de chaleur qui peuvent être couverts en conditions optimisées.

4.3. 8 ans de temps de retour sur investissement en conditions favorables

L'analyse économique visait à calculer le temps de retour sur investissement des scénarios A et B décrits précédemment (3.2)

4.3.1. Coûts d'investissement

L'investissement total s'élève à 83 500 € dans le scénario A pour le procédé complet : couverture de fosse et ligne de valorisation du biogaz. Dans le scénario B, le surcoût de la couverture, la ligne biogaz et les équipements de chauffage eau chaude correspondent à un montant total de 96 020 €. Un amortissement est calculé sur 10 ans pour un taux de 2 %.

Tableau 1 – Coûts d'investissement

	Scénario A	Scénario B
1- Couverture de fosse et équipements	38 500 €	19 500 €
2- Ligne de valorisation du biogaz et chaudière	45 000 €	45 000 €
3- Equipement chauffage eau chaude		31 520 €
Total INVESTISSEMENT	83 500€	96 020 €
Montant des aides ¹ (40 % de 1 et 2)	33 400 €	25 800 €
Annuité aides exclues (€/an)	9 541 €	10 971 €
Annuité aides incluses (€/an)	5 724 €	8 023 €

¹Mobilisables sur les trois postes à des taux variables selon les régions.

4.3.2. Coûts de fonctionnement

Le premier poste de dépenses est la main d'œuvre qui représente 30 % du coût de production du kWh thermique. Il faut compter 43 heures par an, hors épandage du lisier. Le procédé est très peu consommateur d'électricité. Les frais de fonctionnement, hors économie, s'élèvent à 2 679 € dans les deux cas (soit 3 ct €/kWh thermique produit). En considérant les gains à l'épandage pour le scénario A et la substitution du résidu d'énergie électrique par du propane dans le scénario B, les frais de fonctionnement s'élèvent à 2 106 € et 998 € respectivement.

Tableau 2 – Coûts de fonctionnement (fosse de 1200 m³)

Postes (montants en €/an)	Scénario A	Scénario B
Consommation électrique	240	240
Main d'œuvre (temps passé)	839	839
Charbon actif	800	880
Maintenance chaudière	500	500
Entretien analyseur biogaz	400	400
Total	2 779	2 779
Gain d'épandage	- 432	- 432
Gain d'azote minéral	-142	-142
Gain substitution élec/propane		-1 261
Total (économies incluses)	2 206	1 025

Ainsi le coût global amortissement et fonctionnement s'élève à 8 257 €/an pour l'élevage de 210 truies et à 10 497 €/an pour l'élevage de 300 truies, soit un coût global du kWh thermique produit de respectivement 10 et 11 ct €/kWh (sur dix ans).

La rentabilité a ensuite été calculée sur la base des économies réalisées sur la facture de chauffage grâce au biogaz, pour un coût énergétique initial de 10 ct €/kWh. Le temps de retour sur investissement est de 8 ans, avec les aides dans les deux cas, et de 9 et 11 ans sans aides. Dans le scénario A, ce temps de retour sur investissement est à comparer à celui d'autres techniques de production d'eau chaude.

4.3.3. De 4 à 21 ans de temps de retour sur investissement

Les simulations ont été complétées pour différentes hypothèses : taille d'élevage, volume de la fosse, mobilisation d'aides, tarif électrique... Selon le scénario, le temps de retour sur l'investissement total est compris entre 4 et 21 ans. Les projets sans aides sont difficilement rentabilisés en moins de 10 ans. Plus la fosse est grande et plus les apports de lisier sont optimisés, plus les besoins thermiques sont couverts et plus le projet est rentable. Plus le tarif électrique de l'élevage est élevé, plus l'économie réalisable sera forte et déterminera la rentabilité du projet. L'évolution de ce tarif électrique face au coût de production du kWh thermique via un Nénufar aura aussi un impact sur la rentabilité.

5. Discussion et perspectives

5.1. Comparaison aux essais menés à l'échelle du laboratoire

Les résultats obtenus sur la station de Guernévez sont très encourageants. Ils viennent confirmer ou compléter les résultats obtenus précédemment par l'Irstea et l'UBS à l'échelle du laboratoire.

Comme observé par l'UBS, les inocula apportés au travers de boues de fond de fosse et des lisiers eux-mêmes sont adaptés. Aucun apport

bactérien extérieur n'a été réalisé dans la fosse de Guernévez. Les productions de méthane sont plus faibles à basse température (inférieur à 15°C), traduisant un fonctionnement ralenti des bactéries. Mais la production est non négligeable à moins de 13°C dans la fosse, en accord avec les observations de l'UBS sur l'acclimatation possible des communautés bactériennes, capables de produire du biogaz à moins de 13°C. L'adaptation des communautés bactériennes lente, supérieure à 200 jours comme identifié par l'UBS n'a pas pu être mise en évidence à ce stade. Il semble même que l'acclimatation soit plus rapide, en lien peut-être avec les volumes importants de lisiers considérés.

60 à 65 % du potentiel méthanogène peut être exprimé en conditions psychrophiles. L'Irstea avait obtenu 60 à 65 % d'expression du potentiel méthanogène sur 7 mois de stockage, en période plutôt chaude. Un niveau similaire d'expression a été obtenu en 6 mois (pour un temps de séjour moyen des lisiers de 103 jours) en période hivernale (de fin Septembre à mi-Mars).

10 et 18 % de l'azote organique est minéralisé pendant le stockage sur les périodes « Eté 2016 » et « Hiver 2016-2017 » respectivement. L'Irstea avait observé une minéralisation jusqu'à 30% de l'azote organique, mais pour des volumes de lisier plus faibles.

L'UBS concluait que la part de lisier idéale à conserver dans la fosse au moment de la vidange était de 25 % pour garantir une reprise rapide de la production de méthane. Ce résultat était obtenu en conservant comparativement 10, 25 et 50 % du volume de lisier dans des bouteilles de 1 litre. A Guernévez, nous avons choisi de conserver 20 % du volume de lisier dans la fosse. Au printemps 2016, l'exercice a même été réalisé de pomper plus de lisier et de ne conserver que 15 % du volume de lisier dans la fosse. Avec ces taux (15 % avant au printemps et 20 % l'automne), la production de méthane est répartie rapidement dès les premiers apports de lisiers. Ainsi 15 % semble suffisant lorsqu'on considère de grands volumes.

Enfin, les essais menés en laboratoires n'avaient pas cherché à répondre à l'effet des antibiotiques et détergents sur la production de méthane. Durant les deux années de suivi à Guernévez, l'introduction de lisiers contenant des résidus d'antibiotiques, des restes de désinfectants ou de détergents ne s'est pas traduite par une chute brutale de la production de biogaz. Aucun effet n'a pu être mis en évidence. Si des effets peuvent être observés dans la cas d'une méthanisation à 38°C, principalement à base de lisiers, le fait d'être sur des volumes de lisiers plus importants et sans chauffage réduit certainement les effets dans le cas de la méthanisation passive.

5.2. Les conditions de rentabilité

La rentabilité économique des projets repose sur l'économie d'énergie réalisée en élevage. Ainsi, plusieurs facteurs entrent en ligne de compte :

1) Estimer son besoin de chaleur et le coût de l'énergie sur l'élevage : quel est le coût de la facture de chauffage sur l'élevage de porc qui envisage de mettre en place une couverture récupératrice de méthane ? Quelle est l'économie potentielle réalisable ? Un élevage bénéficiant d'un tarif électrique très bas ou étant déjà équipé de systèmes de chauffage peu consommateurs d'énergie aura une marge d'économie très faible, ce qui allongera le temps de retour sur investissement du procédé. Au contraire, un élevage étant en chauffage électrique, avec un tarif électrique proche des 12-13 centimes d'euros du kWh fera rapidement des économies (même s'il faut investir dans les équipements de chauffage par eau chaude).

2) Avoir une configuration de fosse permettant une bonne production de méthane : fosse enterrée ou semi-enterrée favorisant l'inertie thermique notamment en hiver, fosse de grande dimension ou à défaut recevant très régulièrement des lisiers. En effet, plus la fosse est grande plus le volume de lisier stocké sera élevé et la production résiduelle de méthane importante. Les fosses de réception de lisier, en amont de station de traitement biologique (nitrification/dénitrification) peuvent être également de bonnes candidates même si elles sont de dimension modeste car elles reçoivent des lisiers très fréquemment, et toute l'année. Il est également indispensable de disposer de suffisamment de capacité de stockage extérieure. En effet, la production de méthane ne sera maintenue en hiver qu'à la condition d'apporter des lisiers dans la fosse. Les élevages avec du stockage de lisier en fosse profonde sous les animaux sont pénalisés. Par ailleurs, il est nécessaire de conserver une partie du lisier dans la fosse (a priori au moins 15%), ce qui est partiellement compensé par le volume de stockage gagné grâce à la couverture (hauteur de garder passe de 50 à 25 cm et pas d'eau de pluie stockée). Enfin le procédé Nénufar est inadapté aux lagunes avec des bords en pentes (dimensionnement du Nénufar en niveau bas, taux de couverture faible).

3) Limiter les frais supplémentaires et mobiliser les aides à l'investissement : retrait de la couverture existante, équipements de chauffage eau chaude à prévoir dans les bâtiments d'élevage, etc. Aujourd'hui plusieurs programmes d'aides existent mais avec de grandes différences régionales.

5.3. Applications en élevage et unités de méthanisation

Lors de la mise en service du procédé Nénufar à Guernévez en 2016, la société comptait trois installations : un prototype installé sur lisier de canard dans les Yvelines (avril 2013), une unité opérationnelle sur la ferme expérimentale de

Grignon (AgroParisTech) sur lisier bovin (juin 2014), une unité opérationnelle sur fosse de lisier de veaux, sur l'unité de méthanisation Méthavo (35, 2015).

Depuis la société Nénufar compte une vingtaine d'installations en fonctionnement ou en construction et autant de projets. Les projets concernent principalement des exploitations de porcs ou de veaux de boucherie, mais également des unités de méthanisation. Dans ce dernier cas, les couvertures flottantes sont installées en amont (lisier) ou en aval (capture du méthane résiduaire sur digestat) de la méthanisation. La rentabilité est souvent plus rapide car le biogaz produit est entièrement valorisé et bien valorisé.

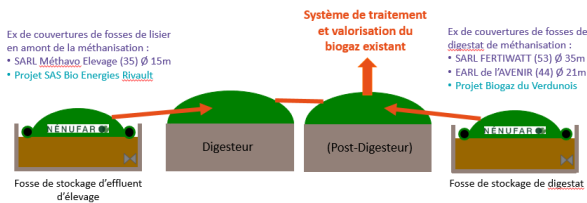


Figure 9 : Schéma positionnant des couvertures Nénufar sur des unités de méthanisation et installations concernées.

5.4. Bénéfices environnementaux : un procédé vertueux

Si les conditions de rentabilité sont à étudier au cas par cas et qu'un soutien financier est aujourd'hui nécessaire dans la majorité des cas, il est important de rappeler l'ensemble des bénéfices environnementaux de la méthanisation passive. La couverture des fosses permet de limiter les émissions d'ammoniac et d'odeurs en empêchant un flux d'air à la surface du lisier. La capture du méthane produit par la dégradation de la matière organique, assure la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ce méthane capté est valorisé pour produire de l'énergie renouvelable utilisable sur l'exploitation. Cette énergie peut venir en substitution d'énergies fossiles.

En évitant l'entrée des eaux de pluie dans la fosse, le lisier n'est plus dilué. Les volumes à épandre sont moindres. Dans une zone d'une pluviométrie de 1000 mm/an, cela représente, pour une fosse de 20 m de diamètre, 300 m³ d'eau à stocker et à épandre. Pour un coût d'épandage de 2 à 3 ct €, c'est plus de 700 € d'économisé à l'année. La valeur azotée du lisier est également préservée, permettant d'économiser des engrais minéraux.

La mise à disposition d'eau chaude au service de l'atelier d'élevage peut avoir des conséquences bénéfiques pour la production animale. En cas d'excès, pouvoir chauffer librement les salles et avoir des entrées d'air chaud sur les animaux donne la possibilité de ventiler davantage les salles. Avec un renouvellement d'air plus puissant, c'est l'ambiance dans le bâtiment qui

est améliorée au profit des animaux et des travailleurs.

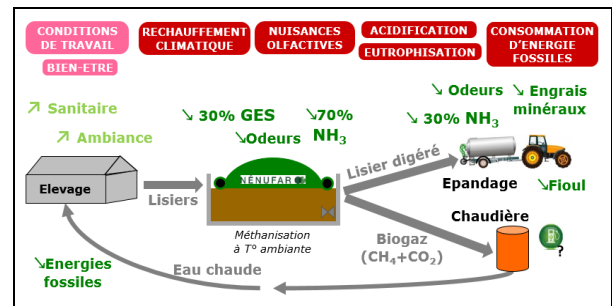


Figure 10 : Schéma récapitulant l'ensemble des bénéfices environnementaux de la méthanisation passive avec production d'eau chaude

5.5. Projet MéthaN'H3

La phase d'expérimentation et de validation réalisée à Guernévez se poursuit par une phase d'accompagnement de projets en élevage réalisé dans le cadre du projet Ademe MéthaN'H3 (2018-2020). Un bilan de fonctionnement d'un an sera réalisé sur cinq sites ayant choisi d'installer une couverture Nénufar sur une de leur fosse (lisier de porc, lisier de veaux de boucherie ou digestat de méthanisation). Une analyse technique, environnementale et économique sera réalisée sur les postes stockage et épandage.



6. Conclusion

Après deux années de fonctionnement, la couverture flottante récupératrice de méthane, installée sur une fosse de 300 m³ de lisier mixte à Guernévez, est techniquement validée. L'intérêt de la méthanisation passive a été démontré. Les résultats confirment l'impact de la température sur la production de biogaz. La cinétique de production est en effet nettement plus rapide en été lorsqu'il fait 20°C dans la fosse, et nettement ralentie en hiver à 10°C. Toutefois, la température n'explique pas à elle seule la production de méthane. Ainsi, le niveau de production peut être maintenu régulier en hiver grâce aux apports fréquents (tous les 15 jours) de lisiers dans la fosse. La production enregistrée à Guernévez entre Novembre 2016 et Mars 2017 est relativement stable avec en moyenne 10 m³ de méthane produits par jour. La baisse progressive des températures est compensée par l'augmentation régulière du volume de lisier dans la fosse. Les injections de lisier permettent de booster la production de

méthane, ils s'accompagnent également d'une augmentation du dégagement d'H₂S qu'il faut traiter. Les périodes de vidange de la fosse correspondent aux niveaux de production de méthane les plus faibles. La reprise de la production a lieu dès les nouveaux apports de lisiers. Notons que les faibles pertes d'azote observées (de 1% à 4%) confirment l'intérêt de la couverture sur la préservation de l'azote du lisier.

Sur une année, 6 120 m³ de biogaz ont été produits avec un taux moyen de CH₄ de 63,1%, soit 3 690 m³ de CH₄. D'après les potentiels méthanogènes réalisés en laboratoire sur les lisiers injectés dans la fosse, 65% de ce potentiel a été exprimé en moyenne durant l'année de suivi. La production de CH₄ représente une production d'énergie thermique équivalente à 30 000 kWh, ce qui couvre 40% des besoins théoriques de l'élevage de Guernévez (170 TNE).

Les résultats obtenus sur la fosse de 300 m³ de Guernévez ont été transposés à une fosse de 1200 m³, conduite selon les mêmes conditions. La production d'énergie obtenue permettrait de couvrir près de 85% des besoins de chaleur d'un élevage de 210 truies naisseur-engraisseur. L'intérêt environnemental et économique du procédé est confirmé. Toutefois, la rentabilité proviendra des économies d'énergie réalisées sur l'élevage et elle est à définir au cas par cas. Quelle est la consommation d'énergie aujourd'hui sur l'élevage ? Quel est le coût de cette énergie ? L'élevage est-il déjà équipé d'un système de chauffage par eau chaude dans ses bâtiments ? De nombreuses questions doivent

être posées. La production enregistrée à Guernévez est par ailleurs obtenue en conditions optimisées : climat tempéré, fosse semi-enterrée, apports réguliers de lisiers ayant séjournés moins de quatre mois en bâtiment, etc. Les élevages où le stockage de lisier se fait en fosse profonde sous les animaux en hiver sont pénalisés.

Les perspectives de développement du procédé sont fortement dépendantes du contexte politique, à la fois en termes de lutte contre les émissions d'ammoniac et de production d'énergies renouvelables. La volonté affichée par le gouvernement de lutter contre le réchauffement climatique oblige à mettre en avant les nombreux avantages environnementaux de ce procédé vertueux : réduction des émissions d'ammoniac, de gaz à effet de serre et d'odeurs au stockage des lisiers (en bâtiment et en fosse extérieure), production d'énergie renouvelable qui vient en substitution directe d'énergie fossile sur l'élevage (chauffage de porcherie, préparation de lait pour veaux de boucherie,...), préservation de l'azote et réduction de l'usage des engrais minéraux, réduction des volumes de lisiers à épandre (pas de dilution par les eaux de pluie) et gain de carburant. Ce type de procédé permet d'apporter de nouveaux arguments à la réflexion sur la mise en œuvre de crédit carbone en élevage. Les efforts réalisés par les agriculteurs sur l'environnement, parfois au travers d'investissement non productifs et sans rentabilité, demanderaient à être reconnus financièrement.

7. Pour plus d'informations...

Aurore Toudic

Mail : aurore.toudic@bretagne.chambagri.fr

Tél : 02 98 52 48 54

Anne-Sophie Langlois

Mail :

anne-sophie.langlois@bretagne.chambagri.fr

Tél : 02 98 52 48 54

8. Références bibliographiques

Dabert P., Béline F., Lendormi T., 2015. Optimisation de la méthanisation des lisiers porcins à basse température. Aspects microbiologiques. Rapport final Ademe Projet Prométhis. 90p.

King S., Barrington S., Guiot S.R., 2011. In storage psychrophilic anaerobic digestion of swine manure: Acclimation of microbial community. *Biomass and Bioenergy*, 35, 3719-3726.

IFIP, Chambres d'agriculture de Bretagne et Pays de la Loire, 2008. Consommations d'énergie des bâtiments porcins : comment les réduire ? Edition IFIP, 20p.

Ifip, Idele, Itavi, 2010. Guide des Bonnes Pratiques Environnementales d'Élevage. Edition Ifip, 305p.

Levasseur P., Coorevits T., Espagnol E., Quideau P., 2013. Emissions de gaz à effet de serre et bilan économique de la petite méthanisation à la ferme et du raclage des déjections en élevage porcin. *Journées Recherche Porcine*, 45. pp135-136.

Les résultats du présent travail ont été présentés : *Quoi de Neuf 2018, Journées de la Recherche Porcine 2018, Journées Recherche et Innovation biogaz 2017, Journées Internationales de la Production Porcine 2018, Forum Grand Ouest ENERGIE-Climat 2018.*

Comment citer ce document ?

Toudic A., Langlois A.S., Lavenan K., Kergourlay F., Carré J.Y., Dabert P. Lendormi T., 2018. Méthanisation passive à température ambiante - Validation de la couverture flottante Nénufar à Guernévez. Rapport d'étude. Chambres d'agriculture de Bretagne, 12 pages.

Mots-clés :

Méthanisation passive, capture méthane, fosse à lisier, couverture flottante, température ambiante, psychrophile.