



**HAL**  
open science

# Evaluation technico-économique de la couverture Nénufar

Émilie Bondoerffer

► **To cite this version:**

Émilie Bondoerffer. Evaluation technico-économique de la couverture Nénufar. Sciences du Vivant [q-bio]. 2017. dumas-01695529

**HAL Id: dumas-01695529**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01695529>**

Submitted on 29 Jan 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AGROCAMPUS  
OUEST

CFR Angers

CFR Rennes



NÉNUFAR

Année universitaire : 2016-2017

Spécialité :

Génie de l'Environnement

Spécialisation (et option éventuelle) :

Agricultures durables et développement territorial

### Mémoire de Fin d'Études

d'ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

d'un autre Établissement (Étudiant arrivé en M2)

# Evaluation technico-économique de la couverture Nénufar

Par : Emilie Bondoner



**Soutenu à Rennes, le 28 septembre 2017**

### Devant le jury composé de :

Président : Philippe Boudes

Maître de stage : Rémy Engel

Enseignant référent : Christian Mouchet

Autres membres du jury (Nom, Qualité) :

Thomas Lendormi, Université Bretagne Sud

*Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST*

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation  
«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»  
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>





## REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier toutes les personnes ayant contribué à la réussite de ce stage.

J'adresse, tout d'abord, mes remerciements à l'ensemble de l'équipe Nénufar, et particulièrement à MM. Rémy Engel et Geoffrey Moncorger, pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser mon stage de fin d'études au sein de leur entreprise et pour avoir partagé leur expertise.

Je tiens aussi à remercier mon enseignant référent, M. Christian Mouchet d'Agrocampus Ouest, pour son aide précieuse dans les moments délicats, ainsi que M. Pascal Peu, de l'IRSTEA.

Je remercie particulièrement Mme Aurore Toudic de la Chambre d'Agriculture de Bretagne, pour m'avoir fourni des données essentielles à ce mémoire, ainsi que pour ses conseils.

## TABLE DES MATIÈRES

Remerciements

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des illustrations

Liste des tableaux

Liste des annexes

I.	Introduction	1
II.	La couverture Nénufar	3
	A) Le principe : un système de couverture flottante pour la récupération du biogaz et l'évacuation des eaux de pluies	3
	B) A priori : avantages et inconvénients	5
	1. Plan environnemental	5
	2. Plan agronomique	5
	3. Plan économique	6
	4. Plan sociétal	7
	C) Les différentes phases de la réalisation d'un projet nénufar	8
III.	Les exploitations étudiées	9
	A) La Ferme de Grignon	9
	B) Station expérimentale porcine de Guernévez - Projet Promethis	9
	C) La SARL Fertiwatt	10
	D) La SCEA de Neuville	10
	E) L'EARL de Quistillic	11
	F) L'EARL de l'Avenir	11
IV.	Un modèle pour la quantification de la production de méthane	11
	A) Les facteurs utilisés dans le modèle	12
	B) Vérification du modèle de production et sa version finale	14
	1. L'équation de température	14
	2. Comparaison des productions de méthane théorique et réelle	17
	C) Conclusions et limites	23
V.	L'impact d'une couverture Nénufar	24
	A) Impact environnemental d'une couverture Nénufar	24
	B) Impact d'une couverture sur la gestion d'une exploitation	27
	1. Hypothèses	28
	2. Méthode	29
	3. Résultats et discussion	29
	4. Conclusion	34
VI.	Dans quelle mesure les projets Nénufar sont-ils rentables ?	35
	A) Hypothèses de travail et recueil des données	35

B) La méthode du « Taux d'Enrichissement en Capital » pour l'analyse de la rentabilité économique	36
1. Les objectifs de rentabilité	36
2. Les hypothèses de calcul	37
3. La rentabilité économique des projets Nénufar	39
4. Conclusion	50
VII. Conclusion et limites : les avantages et inconvénients de la couverture Nénufar	53
Références bibliographiques	56

Annexe I : La réaction de méthanisation

Annexe II : Différents modèles pour l'estimation de la production de méthane

Annexe III : Calculs utilisés pour estimer la production de méthane

Annexe IV : Guides d'entretien

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

AGV : acide gras volatil

CH<sub>4</sub> : méthane

CO<sub>2</sub> : dioxyde de carbone

E<sub>a</sub> : énergie d'activation

FCM : facteur de conversion du méthane

GES : gaz à effet de serre

H<sub>2</sub>S : hydrogène sulfuré

MO : matière organique

MO<sub>d</sub> : matière organique dégradable

MO<sub>nd</sub> : matière organique réfractaire

MS : matière sèche

N<sub>2</sub>O : protoxyde d'azote

TEC : taux d'enrichissement en capital

## LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Coupe transversale d'une fosse équipée d'un Nénufar montrant la structure de la couverture _____	3
Figure 2 : Schéma de fonctionnement d'une unité Nénufar _____	4
Figure 3 : Evolution des températures journalières du lisier et de l'air en fonction du temps _____	14
Figure 4 : Température moyenne du lisier calculée par décade en fonction de la température moyenne extérieure calculée par décade mesurée à la station de Quimper-Pluguffan _____	16
Figure 5 : Comparaison n°1 des productions de méthane théoriques et réelles et écarts relatifs associés _____	18
Figure 6 : Comparaison n°2 des productions de méthane théoriques et réelles et écarts relatifs associés _____	21
Figure 7 : Comparaison n°3 des productions de méthane théoriques et réelles et écarts relatifs associés _____	22
Figure I.1 : Représentation schématique de la dégradation anaérobie de la matière organique (d'après Dabert et al., 2015) _____	5
Figure I.2 : Représentation schématique des différents types d'écosystèmes méthanogènes naturels (Garcia et al., 2000) _____	6
Figure II.1 : Equation de calcul du FE CH <sub>4</sub> (GIEC, 2006) _____	1
Figure II.2 : Loi de van't Hoff-Arrhenius (d'après Safley & Westerman, 1990) _____	2
Figure III.1 : Aperçu de la feuille de calcul permettant de calculer le potentiel méthanogène de l'effluent _____	6
Figure III.2 : Aperçu de la feuille de calcul permettant de déterminer le taux de dégradation de la matière organique _____	7
Figure III.3 : Aperçu de la feuille de calcul permettant de calculer la production annuelle potentielle de méthane _____	8

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Investissement selon la modalité de couverture de fosse (d'après Chambre d'agriculture des Landes, 2006 ; Nénufar, communication personnelle) _____	7
Tableau 2 : Caractéristiques du lisier porcin produit par la station expérimentale porcine de Guernévez _____	17
Tableau 3 : Ratio de sensibilité calculés pour les paramètres du modèle (d'après Petersen et al., 2016) _____	19
Tableau 4 : Valeurs de $\ln(A)$ pour le lisier de la station expérimentale porcine de Guernévez _____	21
Tableau 5 : Impact environnemental de projets Nénufar sur 10 ans pour $k = 0,01$ _____	26
Tableau 6 : Impact environnemental de projets Nénufar sur 10 ans pour $k = 0,7$ _____	27
Tableau 7 : Caractéristiques des différents projets considérés _____	36
Tableau 8 : Hypothèses communes à tous les projets _____	38
Tableau 9 : Hypothèses d'annuités, charges et produits selon le mode de valorisation du biogaz _____	39
Tableau 10 : Coût de l'investissement pour différents types de projets _____	53
Tableau I.1 : Familles méthanogènes selon les substrats utilisés pour la méthanogenèse et les niches écologiques occupées (d'après Dabert et al., 2015) _____	4
Tableau II.1 : Valeurs de $MOd$ pour différents lisiers _____	6
Tableau II.2 : Valeurs de $\ln(A)$ (en $gCH_4/kgMO/h$ ) pour différents substrats _____	7

## LISTE DES ANNEXES

Annexe I : La réaction de méthanisation

Annexe II : Différents modèles pour l'estimation de la production de méthane

Annexe III : Calculs utilisés pour estimer la production de méthane

Annexe IV : Guides d'entretien



## I. INTRODUCTION

Le XXI<sup>ème</sup> siècle fait face à de nombreux enjeux environnementaux : changement climatique, diminution de la biodiversité, besoins énergétiques croissants, raréfaction des ressources, etc.

Du fait de ses différentes fonctions, allant de la production alimentaire au maintien des paysages, l'agriculture est fortement liée à ces problématiques. Ce secteur est, en France, le premier émetteur de méthane (CH<sub>4</sub>) et de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), deux gaz à effet de serre (GES), représentant respectivement 67% et 86% des émissions françaises. Ces émissions ont un impact significatif, puisque le méthane et le protoxyde d'azote ont un pouvoir de réchauffement global respectivement 25 et 298 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) (CITEPA, 2016).

De plus, l'agriculture nécessite une grande quantité d'énergie, quelle que soit l'activité (élevage, cultures, etc). En 2014, la consommation énergétique du secteur agricole était de 4,7 Mtep, soit 3% de la consommation finale d'énergie française, ces valeurs étant stables sur la période 1973-2014. Le mix énergétique agricole est assuré principalement par le pétrole, représentant 74% de la consommation en 2014, ainsi que par 7% de gaz et 3% d'énergies renouvelables (Commissariat général au développement durable, 2016).

Les émissions agricoles de GES sont réparties sur différents postes, tels que l'épandage d'urée minérale sur les sols, la fermentation entérique ou encore la gestion des déjections d'animaux d'élevage. En 2014, ce dernier poste représentait 15% des émissions de CH<sub>4</sub> liées à l'agriculture (CITEPA, 2016). Ces émissions sont liées à la digestion anaérobie, aussi appelée réaction de méthanisation, un processus biologique naturel provoquant la dégradation de la matière organique et aboutissant à la formation d'un gaz appelé « biogaz », composé principalement de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub>. Ce biogaz peut être capté et valorisé sous différentes formes.

La méthanisation peut être mise en oeuvre volontairement au sein d'un digesteur, c'est-à-dire une fosse chauffée et isolée thermiquement, à partir de matières organiques, telles que les effluents d'élevage ou les résidus de cultures (Risberg *et al.*, 2017). Il est également possible de capter le biogaz produit naturellement au sein des fosses de stockage d'effluents, présentes sur toutes les exploitations agricoles ayant une activité d'élevage.

Après une première phase de développement dans les années 1970-1980, le secteur de la méthanisation est à nouveau en forte progression depuis les années 2000. Fin décembre 2016, la France comptait 490 installations de méthanisation, pour une puissance totale installée de 393 MW,

avec une progression de 9% par rapport à 2015. En complément, la quantité de biométhane injectée en 2016 dans un réseau de gaz naturel est 2,5 fois plus élevée qu'en 2015. L'énergie produite à partir de biogaz représente 0,4% de la consommation énergétique nationale (Commissariat général au développement durable, 2017).

Il est possible de distinguer trois types d'installation de méthanisation (Commissariat général au développement durable, 2017) :

1. Les « méthaniseurs produisant du biogaz essentiellement à partir de résidus agricoles, mais aussi à partir de biodéchets, notamment d'industries ou de collectivités » représentant 65% des installations de production d'électricité et appelés « installations agricoles » ;
2. Les unités valorisant le biogaz issu « d'installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND) », qui représentent 30% des installations de production d'électricité ;
3. Les step, qui sont des « installations valorisant le biogaz issu de stations d'épuration urbaines ou industrielles », qui représentent 5% des installations de production d'électricité.

La présente étude concerne uniquement le secteur agricole, et plus particulièrement la filière élevage.

L'installation d'une unité de méthanisation en lien avec une exploitation agricole présente de nombreux avantages, tels qu'un revenu supplémentaire, la production d'énergie, la valorisation des déchets agricoles, mais également de nombreux inconvénients, avec notamment un temps de travail supplémentaire, un besoin en fonds propres conséquent et une certaine complexité technique (Charpiot & Dupré, 2012). La couverture Nénufar, développée et brevetée par l'entreprise du même nom, se présente comme étant une alternative à l'unité de méthanisation « classique ».

Cette couverture est un système flottant, capable de capter et stocker le biogaz produit naturellement dans les fosses de stockage d'effluents. Ce gaz peut ensuite être valorisé pour la production d'énergie sur l'exploitation agricole.

Dès lors, **dans quelle mesure une unité Nénufar crée-t-elle de la valeur ajoutée pour une exploitation agricole ?**

La notion de « valeur ajoutée » sous-entend des avantages conséquents pour l'exploitant, pouvant être :

- économiques : création d'un revenu supplémentaire ou la réalisation d'économies ;
- environnementaux : réduction de l'impact environnemental de l'exploitation agricole ;

- sociétaux : amélioration des relations des voisinages ou de l'image de l'exploitation auprès des riverains et impact positif sur la gestion de l'exploitation.

Ces trois aspects correspondent aux piliers de la durabilité, et sont ici considérés pour différents projets d'installation de couvertures Nénufar.

Dans un premier temps, les aspects techniques de la couverture Nénufar seront présentés, de même que les avantages et inconvénients connus *a priori*.

Dans un second temps, les exploitations étudiées dans ce projet seront introduites.

Dans un troisième temps, la problématique de la production de méthane sera abordée.

Dans un quatrième temps, l'impact de la couverture Nénufar sur la gestion de l'exploitation sera considéré.

Dans un cinquième temps, la rentabilité économique des projets sera analysée, grâce à la méthode du Taux d'Enrichissement en Capital (TEC).

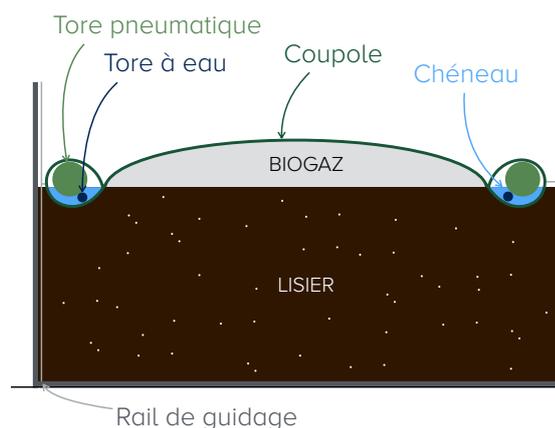
## II. LA COUVERTURE NÉNUFAR

### A) LE PRINCIPE : UN SYSTÈME DE COUVERTURE FLOTTANTE POUR LA RÉCUPÉRATION DU BIOGAZ ET L'ÉVACUATION DES EAUX DE PLUIES

La couverture « Nénufar » est un système flottant permettant la récupération du biogaz produit naturellement au sein des fosses de stockage d'effluent. Ce dispositif permet également l'évacuation des eaux pluviales.

La couverture est composée de trois éléments (figure 1) :

- un tore pneumatique, assurant la flottaison de la couverture sur l'effluent ;
- un tore d'eau, qui permet au dispositif de s'enfoncer légèrement dans l'effluent et garantit ainsi l'étanchéité au biogaz ;
- une coupole, constituant un volume de stockage pour le biogaz entre le lisier et la couverture.



**FIGURE 1** : COUPE TRANSVERSALE D'UNE FOSSE ÉQUIPÉE D'UN NÉNUFAR MONTRANT LA STRUCTURE DE LA COUVERTURE

Le rail de guidage indiqué dans la figure 1 permet d'amarrer la couverture à la structure de fosse.

La couverture a toujours un diamètre légèrement inférieur à celui de la fosse, permettant à l'exploitant de réaliser les opérations usuelles de maintenance, telles que l'entretien d'un agitateur et l'incorporation/reprise de l'effluent. Cela limite également le frottement entre le béton et la couverture.

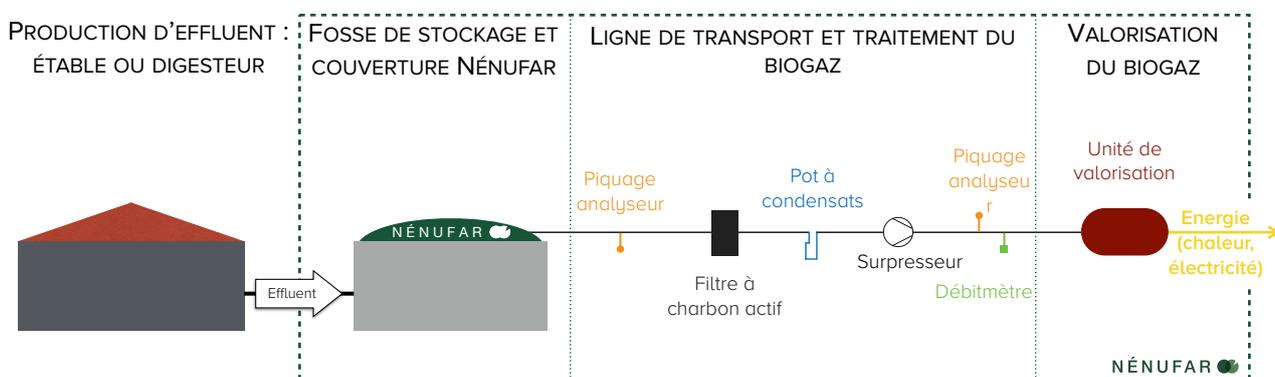
En cas de précipitations, celles-ci s'écoulent depuis la coupole vers le chéneau, où une pompe est installée.

La couverture joue également le rôle de soupape de surpression : en cas d'une production excédentaire de gaz, le biogaz s'échappera par l'interstice entre le mur de la fosse et la couverture.

Depuis le dôme, où il est stocké, le biogaz est envoyé vers l'unité de valorisation : chaudière biogaz, moteur de cogénération, etc. Le transport est effectué par des canalisations souterraines, en PEHD, et/ou aériennes, en inox.

Le traitement du biogaz est réalisé pendant le stockage et le transport. Dans un premier temps, de l'air est injecté au sein du dôme afin de diminuer la concentration d'hydrogène sulfuré ( $H_2S$ ), une molécule fortement toxique et corrosive. Un filtre à charbon actif est placé en aval de la couverture pour absorber les derniers pics de  $H_2S$ . Dans un deuxième temps, les condensats sont évacués. En effet, le biogaz contient un certain taux d'humidité et lors du transport, la différence de température entre le gaz et les parois de la canalisation induit la condensation de cette eau. Les canalisations sont légèrement inclinées, afin que les condensats s'écoulent vers un point bas, permettant leur évacuation.

La figure 2 présente un schéma de fonctionnement d'une unité Nénufar.



*FIGURE 2 : SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT D'UNE UNITÉ NÉNUFAR*

## B) A PRIORI : AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

Les avantages et inconvénients *a priori* de la couverture Nénufar peuvent être considérés sur quatre plans : environnemental, agronomique, économique et sociétal.

### 1. PLAN ENVIRONNEMENTAL

La réaction de méthanisation a lieu naturellement dans les fosses de stockage d'effluent, aboutissant à la production de biogaz, composé principalement de dioxyde de carbone et de méthane. Ce gaz est une énergie renouvelable, pouvant être collectée et valorisée, permettant de réduire les émissions directes de GES et la consommation d'énergies fossiles (Pigeon, 2010 ; Béline *et al.*, 2013 ; Dabert *et al.*, 2015).

Ces émissions doivent être considérées au niveau du système de production dans son ensemble. En effet, des réductions sur un poste, comme la gestion des effluents, peuvent mener à une augmentation sur le poste suivant, comme l'épandage, si la technique n'est pas adaptée (Dux *et al.*, 2005 ; Petersen *et al.*, 2007 ; Quideau *et al.*, 2013).

La valorisation du biogaz peut réduire les émissions de GES d'une exploitation agricole jusqu'à 96%, grâce à la modification des émissions directes de méthane, mais également grâce à la substitution d'énergies fossiles par du biogaz, permettant la réduction des émissions de dioxyde de carbone (Weiske *et al.*, 2006). Il sera donc intéressant de calculer l'impact de l'installation d'une couverture Nénufar sur les émissions de GES d'une exploitation.

L'installation d'une couverture Nénufar permettrait donc, comme une unité de méthanisation classique, de valoriser des effluents agricoles, ici des lisiers, ou des digestats issus d'unités de méthanisation, pour la production d'énergie.

### 2. PLAN AGRONOMIQUE

Le traitement anaérobie des lisiers, c'est-à-dire la méthanisation, en modifie la composition. Une minéralisation de certains éléments est notamment observée, ainsi qu'un taux de matière organique plus faible, celle-ci étant utilisée pour la production de méthane (Quideau *et al.*, 2013).

La mise en conditions anaérobies permettrait d'augmenter la biodisponibilité de certains nutriments (Pigeon, 2010), comme l'azote et le phosphore, sans pour autant changer les quantités présentes, et ainsi améliorer la valeur fertilisante de l'effluent (Weiske *et al.*, 2006 ; Fédération des

producteurs de porc, 2007 ; Petersen *et al.*, 2007 ; Béline *et al.*, 2013 ; Quideau *et al.*, 2013 ; Dabert *et al.*, 2015).

Cependant, dans le cas des unités de méthanisation classiques, les effluents d'élevage sont associés à d'autres substrats, tels que des résidus de culture ou des déchets alimentaires, qui apportent une certaine quantité d'azote dans la ration. Dans le cas d'une unité Nénufar, l'effluent est le seul substrat traité, donc la seule source d'azote. Il est donc possible que la valeur fertilisante de l'effluent ne soit pas améliorée.

Un autre avantage de la couverture est le fait qu'elle permette l'évacuation des eaux de pluie, ce qui pourrait permettre une gestion plus souple de l'effluent, le volume à traiter étant réduit. En effet, les éleveurs ont l'obligation de posséder une capacité de stockage équivalente à 50% de leur production annuelle d'effluent (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, 2011). Dans le cas d'une fosse non couverte, ce volume doit prendre en compte les précipitations, et il faut alors prévoir une hauteur de garde ainsi qu'une hauteur proportionnelle à la pluviométrie du secteur, ce qui n'est pas le cas pour une fosse couverte (Fédération des producteurs de porcs du Québec, 2007 ; GIE Elevages de Bretagne, 2014 ; Briand, 2014).

Les volumes d'effluents traités étant diminués, la couverture Nénufar ne devrait pas modifier la gestion des effluents, et devrait même la simplifier, notamment lors de l'épandage.

### 3. [PLAN ÉCONOMIQUE](#)

Premièrement, il est certain que la valorisation du biogaz produit permettra à l'exploitation d'acquérir une certaine autonomie énergétique. Cela implique une moindre dépendance aux énergies fossiles (Dabert *et al.*, 2015), dont la fluctuation des prix peut fragiliser une exploitation.

Deuxièmement, l'évacuation des précipitations par la couverture permet de réduire les volumes d'effluents à gérer et à épandre. Les coûts d'épandage pourraient donc être réduits (Dux *et al.*, 2005 ; GIE Elevages de Bretagne, 2014). Cependant, il a été montré que cette économie n'était pas toujours significative. La significativité dépendrait du coût d'épandage (en €/m<sup>3</sup>), de la pluviométrie du secteur, de la dimension de la fosse et de l'organisation du parcellaire. Plus celui-ci est éloigné, plus l'économie est substantielle. L'économie des frais d'épandage ne permettra probablement pas de rentabiliser la couverture, mais elle améliorera tout de même la rentabilité du projet. Ce poste devra donc être pris en compte l'analyse de rentabilité économique des projets.

Enfin, la couverture Nénufar représente un investissement (en €/m<sup>2</sup> de surface couverte) globalement supérieur aux autres modalités de couvertures de fosse. Les coûts des différents types de couverture sont détaillés dans le tableau 1.

TYPE DE COUVERTURE		COÛT EN €HT/M <sup>2</sup>
Couverture non flottante	Toit conique avec mât central	entre 40 et 60
	Toile tendue autoportante	entre 70 et 115
Couverture flottante		entre 35 et 60
Couverture Nénufar		entre 90 et 190

*TABLEAU 1 : INVESTISSEMENT SELON LA MODALITÉ DE COUVERTURE DE FOSSE (D'APRÈS CHAMBRE D'AGRICULTURE DES LANDES, 2006 ; NÉNUFAR, COMMUNICATION PERSONNELLE)*

Il est alors essentiel d'avoir un mode de valorisation du biogaz suffisamment efficace pour assurer la rentabilité du projet.

L'hypothèse est donc que même si aucun revenu à proprement dit n'est dégagé, l'installation d'une couverture Nénufar et la valorisation du biogaz produit pourraient permettre des économies substantielles pour l'exploitation.

#### 4. [PLAN SOCIÉTAL](#)

La mise en place d'une couverture Nénufar pourrait également avoir des avantages sur le plan sociétal, comme la réduction des nuisances olfactives, liées à l'ammoniac formé lorsque l'effluent entre en contact avec l'air, donc au niveau de la surface. La mise en place d'une couverture de fosse réduit de manière significative le volume d'air en contact avec le lisier et permet donc une réduction des odeurs (Nohra *et al.*, 2003 ; Dux *et al.*, 2005 ; Chambre d'agriculture des Landes, 2006 ; Fédération des producteurs de porcs de Québec, 2007 ; GIE Elevages de Bretagne, 2014 ; Briand, 2014).

L'installation pourrait donc avoir un impact positif sur l'exploitation, notamment dans le cadre de ses relations avec les riverains.

Cependant, en assimilant la couverture Nénufar à un « méthaniseur simplifié », il est possible que l'installation ait les mêmes inconvénients que ceux d'une unité de méthanisation classique,

comme un temps de travail supplémentaire, provoquant une ré-organisation de la gestion de l'exploitation, ainsi qu'une certaine complexité technique (Charpiot & Dupré, 2012).

Il conviendra donc d'évaluer l'impact d'une couverture Nénufar sur la gestion de l'exploitation, notamment en termes de temps de travail et de complexité technique.

### C) LES DIFFÉRENTES PHASES DE LA RÉALISATION D'UN PROJET NÉNUFAR

Un projet Nénufar comporte différentes phases :

1. Premier contact avec l'exploitant ;
2. Questions préliminaires pour l'élaboration d'un premier budget ;
3. Analyse en laboratoire du substrat ou quantification de la production de méthane par un prototype : l'entreprise Nénufar a la possibilité d'installer une couverture de 3 mètres de diamètre permettant de mesurer la production de méthane sur une durée donnée ;
4. Précision du business plan ;
5. Visite du responsable du projet sur le site d'exploitation et/ou du porteur de projet sur une installation Nénufar ;
6. Première offre commerciale ;
7. Négociations et différentes offres ;
8. Démarches financières : prêts, subventions ;
9. Offre commerciale finale ;
10. Signature de l'offre par l'exploitant ;
11. Versement de l'acompte ;
12. Commande de la couverture ;
13. Chantier de préparation pour l'installation de la couverture ;
14. Rédaction des documents relatifs au projet : déclaration ICPE, guide d'exploitation ;
15. Installation de la couverture ;
16. Mise en route.

Concernant la gestion du projet et sa réalisation, la démarche est simplifiée par rapport à un projet de méthanisation classique, puisque l'installation ne requiert aucun permis de construire et peu de démarches administratives, avec uniquement un dossier de déclaration à la Préfecture, l'unité relevant de la réglementation relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE). Des subventions peuvent également être demandées.

### III. LES EXPLOITATIONS ÉTUDIÉES

Cette étude est basée sur des projets étudiés par l'entreprise Nénufar.

Dans le cadre de l'installation d'une couverture, l'entreprise est amenée à réaliser une étude de faisabilité, en considérant divers éléments : la capacité de la fosse de stockage, la quantité d'effluents, leurs caractéristiques physico-chimiques et leur gestion. Du fait de l'immense diversité des exploitations agricoles françaises, et sachant que les projets traités par Nénufar sont d'ores et déjà variés, il a semblé plus cohérent de se baser sur des cas concrets.

Des projets aboutis et non aboutis ont été étudiés. D'autres exploitations agricoles ont également été rencontrées, les gérants ayant une réflexion de longue date sur la méthanisation qu'il paraissait intéressant de valoriser. Ne sont décrites dans cette partie que les exploitations pour lesquelles une analyse complète a été réalisée : impact sur l'environnement et la gestion de l'exploitation (partie V), rentabilité économique (partie VI).

#### A) LA FERME DE GRIGNON

La Ferme de Grignon est une exploitation agricole rattachée au site de Grignon de l'école d'ingénieur AgroParisTech, située dans les Yvelines, au coeur de la plaine de Versailles.

Cette exploitation de polyculture-élevage possède 400 ha de cultures pour 180 vaches laitières et 500 brebis, dont le lait est transformé et valorisé sur place.

Une couverture Nénufar de 25 m de diamètre a été installée sur une fosse de stockage de 1 500 m<sup>3</sup>, l'exploitant produisant 5 500 m<sup>3</sup> de lisiers bovins chaque année. Le biogaz produit est valorisé sur une chaudière de 240 kW pour la pasteurisation du lait destiné à la transformation.

Cette installation est la première unité commerciale de l'entreprise, installée en 2014.

#### B) STATION EXPÉRIMENTALE PORCINE DE GUERNÉVEZ - PROJET PROMETHIS

Une couverture Nénufar a été installée sur une fosse de stockage de lisiers de porc de la station porcine de Guernévez, dans le cadre du projet PROMETHIS, porté par la Chambre d'agriculture de Bretagne et par l'IRSTEA. L'objectif du projet est « d'évaluer la faisabilité technico-économique d'une technologie 'rustique et bon marché' de méthanisation à la ferme » (Dabert *et al.*, 2015).

La station expérimentale porcine de Guernévez, considérée dans son ensemble, est un élevage porcin type naisseur-engraisseur de 147 truies productives (Chambres d'agriculture de Bretagne,

2017). Cependant, le projet Nénufar concerne uniquement une fosse de stockage de 300 m<sup>3</sup>, soit une exploitation porcine de type naisseur-engraisseur de 30 truies productives produisant environ 500 m<sup>3</sup> de lisiers mixtes chaque année.

La couverture de 9,5 m de diamètre a été installée au printemps 2016. Le biogaz produit est valorisé sur une chaudière existante, pour le chauffage des bâtiments d'élevage.

Dans le cadre du projet PROMETHIS, un protocole de suivi de l'installation a été mis en place par la Chambre d'agriculture de Bretagne. La station de Guernévez est le seul site pour lequel des données de température dans la fosse et de production méthanogène existe.

### C) [LA SARL FERTIWATT](#)

La SARL Fertiwatt exploite une unité de méthanisation traitant environ 5 000 t de fumiers bovins, 3 000 t de lisiers bovins, des déchets d'une distillerie et d'une laiterie voisine ainsi que des tontes de pelouses et de bords de route.

Cette unité produit environ 11 000 m<sup>3</sup> de digestat brut par an, dont 1 600 t de digestat solide.

Le biogaz produit est valorisé par un moteur de 330 kW électrique. L'électricité est injectée sur le réseau et l'énergie thermique est utilisée pour le chauffage d'un poulailler et le fonctionnement d'un séchoir utilisé par 11 agriculteurs.

L'unité de méthanisation est en fonctionnement depuis le 12 juillet 2016. La couverture Nénufar, d'un diamètre de 35 mètres, a été installée en mai 2017 sur une fosse de stockage de digestat de 8 000 m<sup>3</sup>.

### D) [LA SCEA DE NEUVILLE](#)

La SCEA de Neuville est un élevage porcin type naisseur-engraisseur possédant deux fosses de 18 m de diamètre, pour une capacité totale de stockage de 3 400 m<sup>3</sup>. Ces fosses permettent de stocker les 5 500 m<sup>3</sup> de lisiers de maternité et de porcelets post-sevrage produits chaque année.

Une couverture Nénufar de 17m de diamètre a été installé sur chacune des fosses. Le biogaz produit est envoyé vers une chaudière de 70 kW, la chaleur étant destinée aux bâtiments d'élevage.

#### E) L'EARL DE QUISTILLIC

L'EARL de Quistillic est une exploitation agricole élevant des veaux de boucherie, produisant 1 700 m<sup>3</sup> de lisier par an, actuellement stockés dans deux fosses de respectivement 500 et 1000 m<sup>3</sup>. Ces fosses sont équipées d'une charpente en bois et de tôles métalliques, donc les eaux pluviales sont d'ores et déjà évacuées.

La fosse de 500 m<sup>3</sup> est équipée d'une couverture Nénufar de 21x7 m depuis août 2017. Le biogaz capté est valorisé sur un ballon de production d'eau chaude de 4 000 litres, équipé d'un tube immergé compact de 40 kW. L'eau chaude produite est utilisée pour l'alimentation des veaux. Des panneaux solaires thermiques installés en 2011 subviennent à une partie des besoins en chaleur de l'exploitation. L'installation de la couverture devrait permettre de fournir l'énergie manquante et de rendre l'exploitation autonome en énergie.

#### F) L'EARL DE L'AVENIR

L'EARL de l'Avenir exploite une unité de méthanisation traitant du lisier de canard, du fumier bovin et de l'ensilage d'herbe. L'unité est en fonctionnement depuis juillet 2017.

Une couverture Nénufar de 21 m de diamètre a été installée au printemps 2017 sur une fosse de stockage de digestat de 2 300 m<sup>3</sup>, l'unité produisant environ 5 200 m<sup>3</sup> de digestat brut par an.

Le biogaz produit est valorisé grâce à un moteur de cogénération de 80 kW. L'électricité est injectée sur le réseau et la chaleur est utilisée pour le chauffage des poulaillers.

#### IV. UN MODÈLE POUR LA QUANTIFICATION DE LA PRODUCTION DE MÉTHANE

Un des objectifs de cette étude est d'évaluer la quantité de méthane pouvant être produite à température ambiante dans une fosse de stockage d'effluents, tels que des lisiers ou du digestat provenant d'une unité de méthanisation. Pour cela, un modèle de production de méthane décrit dans la littérature a été utilisé.

Cette étude considère que la réaction de méthanisation a lieu dans des lisiers et digestats stockés au sein de fosses qui ne sont pas chauffées ou isolées, donc en conditions psychrophiles,

c'est-à-dire à une température généralement inférieure à 20°C. Une description détaillée de la réaction de méthanisation est en Annexe I.

Plusieurs études ont abordé la modélisation de la production de biogaz dans des conditions de températures psychrophiles, à partir de fosses de stockage d'effluents.

Il en ressort la difficulté d'établir un modèle mathématique, principalement du fait du nombre de facteurs ayant une influence sur la production de biogaz (Cullimore *et al.*, 1985 ; Llabrés-Luengo & Mata-Alvarez, 1987 ; Safley & Westerman, 1990 ; Sommer *et al.*, 2004 ; Park *et al.*, 2006 ; EDEN & Ecoserveis, 2000 ; Lübken *et al.*, 2010 ; King, 2011 ; Elsgaard *et al.*, 2016 ; Petersen *et al.*, 2016) :

- la température extérieure et son influence sur la température du lisier ;
- le temps de rétention hydraulique ;
- le pH ;
- le potentiel oxydoréducteur ;
- le vent ;
- la composition du lisier ;
- la gestion du lisier : agitation, pompage.

La mise en place d'un modèle mathématique facilement utilisable nécessite donc une certaine simplification, ce qui signifie que certains aspects des processus biologiques, chimiques et physiques à l'oeuvre ne pourront pas être pris en compte (Lübken *et al.*, 2010).

Il existe différents types de modèles, chacun ayant une approche particulière (Annexe II). Le modèle utilisé dans cette étude considère que la variable « principale » pour la production de méthane est la matière organique : l'objectif est donc de déterminer la quantité de matière organique disponible pour la production de méthane, selon les quantités introduites, reprises et restantes des mois précédents.

#### A) LES FACTEURS UTILISÉS DANS LE MODÈLE

Le modèle est basé sur divers facteurs, certains (\*) étant connus grâce à une analyse du lisier :

- la température du lisier ;
- la composition du lisier : ce paramètre est extrêmement variable, selon le type d'animal, le sexe, l'espèce, l'âge, le régime alimentaire et les conditions géoclimatiques (Risberg *et al.*, 2017) ;
  - la matière sèche\* (MS)
  - la matière organique\* (MO)

- le taux de MO dégradable ( $MO_d$ ) et réfractaire ( $MO_{nd}$ ), des valeurs étant présentes dans la littérature (tableau II.1 en Annexe II) ;
  - ➔ Dans l'étude de Sommer *et al.* (2004), les taux ont été déterminés pour des lisiers frais ;
  - ➔ Dans Petersen *et al.* (2016), les taux ont été déterminés pour des lisiers ayant déjà été stockés. Les valeurs, comparées à celles de Sommer *et al.* (2004), montrent que le lisier a déjà subi une certaine dégradation. Le temps écoulé entre l'excrétion par l'animal et le passage du lisier en fosse, indiquant le taux de dégradation de l'effluent, n'étant pas connu, les valeurs déterminées dans Petersen *et al.* (2016) seront utilisées ;
  - ➔ A notre connaissance, aucune valeur du taux de  $MO_d$  n'existe pour du digestat. Toutefois, il est considéré que la teneur en matière organique, et notamment la teneur en carbone, est significativement inférieure dans les digestats par rapport aux lisiers, puisque du  $CH_4$  et  $CO_2$  ont été produits dans le(s) digesteur(s) (Risberg *et al.*, 2017). D'après Doublet *et al.* (2004), les  $2/3$  de la matière organique dégradable sont transformés en  $CH_4$  et  $CO_2$  lors de la digestion anaérobie. Pour des digestat issus de lisier bovin et porcins, le coefficient serait donc respectivement de 0,34 et 0,22. Cependant, du fait de la diversité des rations méthanisées, donc de la diversité des digestats, qui ne sont pas nécessairement issus uniquement de lisiers ou autres effluents, la moyenne des deux coefficients, c'est-à-dire 0,28, est considérée dans la suite de cette étude.
- Le taux de carbone dans la matière organique : une valeur de 0,51 a été choisie (Giroux & Audesse, 2004).
- le volume de lisier initial, ajouté et épandu chaque mois en  $m^3$  ;
- le paramètre d'Arrhénius,  $\ln(A)$ , qui reflète l'influence des paramètres biologiques et chimiques du lisier, tels que le type d'animal, l'âge du lisier, le niveau d'adaptation de la communauté méthanogène à son environnement, sur le potentiel de production de méthane (Petersen *et al.*, 2016). Les études de Petersen *et al.* (2016) et de Elsgaard *et al.* (2016) ont montré que la valeur de  $\ln(A)$  est spécifique au lisier considéré. Il devrait donc être déterminé expérimentalement pour chaque lisier, mais la procédure étant complexe, il est possible d'utiliser les valeurs de la littérature (tableau II.2) (Petersen, communication personnelle).

Les calculs du modèle utilisé dans cette étude sont présentés en Annexe III.

## B) VÉRIFICATION DU MODÈLE DE PRODUCTION ET SA VERSION FINALE

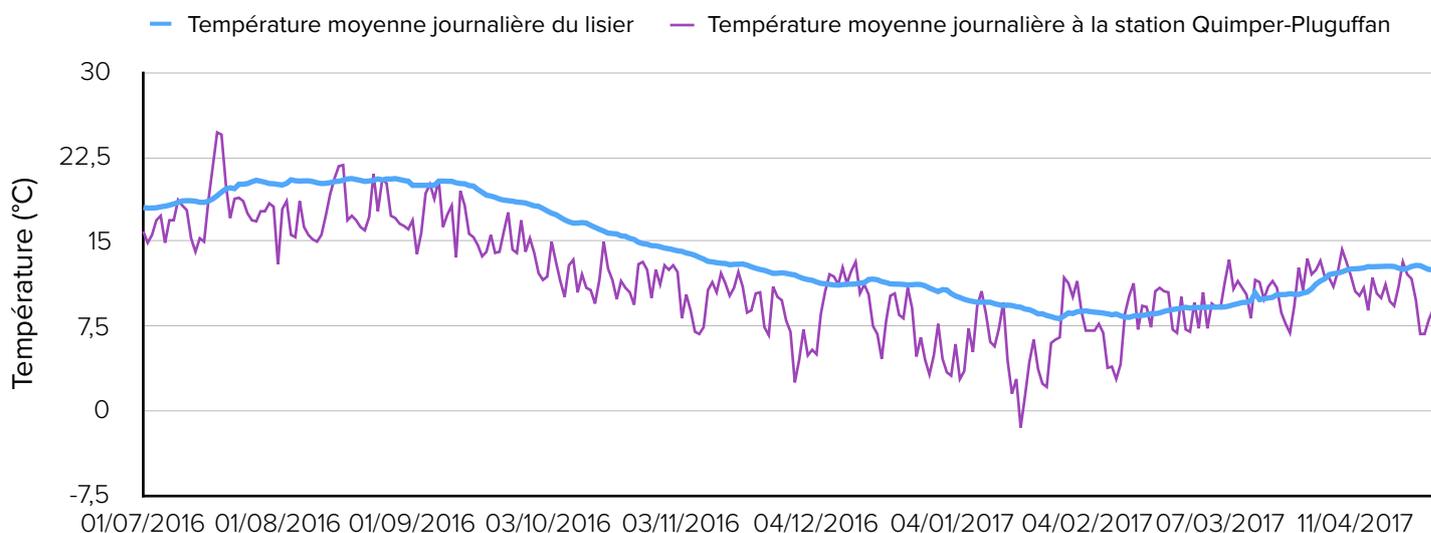
Si le modèle semble théoriquement cohérent, il est important de le comparer à une situation réelle afin d'évaluer sa précision. Pour cela, des données de production de la couverture Nénufar installée à la station expérimentale porcine de Guernévez ont été fournies par la Chambre d'agriculture de Bretagne. Ces mesures ont été obtenues dans le cadre du projet PROMETHIS, porté par le bureau d'études Utilities Performance. L'objectif de ce projet est « d'évaluer la faisabilité technico-économique d'une technologie 'rustique et bon marché' de méthanisation à la ferme » (Dabert *et al.*, 2015).

Deux vérifications paraissaient essentielles :

1. L'évaluation de l'équation présente dans la littérature, liant température extérieure et température du lisier ;
2. La comparaison des quantités de méthane estimées et réellement produites au sein de la fosse. Il est presque certain qu'il existe des différences entre les quantités calculées et réelles. Il convient donc d'estimer l'importance de ces écarts et d'étudier les possibilités d'amélioration du modèle.

### 1. L'ÉQUATION DE TEMPÉRATURE

La littérature scientifique montre que la quantité de méthane émise par un effluent est fortement dépendante de sa température. Or, la température du lisier et celle de l'air extérieur sont fortement liées, mais n'évoluent pas de la même manière (Park *et al.*, 2006) (figure 3).



**FIGURE 3 : ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES JOURNALIÈRES DU LISIER ET DE L'AIR EN FONCTION DU TEMPS**

Il serait donc utile de posséder une formule faisant le lien entre la température extérieure et celle du lisier. Park *et al.* (2006) ont obtenu une telle formule :

$$T_{\text{lisier}} = 0,879 \times T_{\text{extérieure}} + 4,24 \quad (1)$$

Cette équation a été obtenue à partir de 10 valeurs, avec un coefficient de détermination  $R^2$  de 0,95 mais un contexte climatique particulier. En effet, les températures utilisées dans la publication correspondent à deux exploitations porcines situées dans l'Ontario, au Canada. Les fosses étaient de 16,9 et 34,4 m de diamètre, pour une profondeur respectivement de 3,0 et 2,4 m. L'article ne précise pas si ces fosses sont enterrées ou aériennes. La température du lisier a été mesurée à 60 cm de profondeur (Park *et al.*, 2006). L'équation (1) doit donc être vérifiée pour le contexte français.

La fosse considérée sur la station expérimentale porcine de Guernévez a un diamètre de 10 m pour une profondeur d'environ 4 m, soit une capacité de 300 m<sup>3</sup>, la fosse étant en partie enterrée.

La Chambre d'agriculture de Bretagne possède des relevés de températures dans la fosse du 1<sup>er</sup> juillet 2016 au 30 avril 2017. Afin de tester l'équation (1), une équation liant température extérieure et température du lisier a été établie pour deux périodes :

1. En considérant les températures journalières, afin d'avoir un maximum de valeurs ;
2. En considérant les moyennes des températures sur une décade, dans le but d'avoir une échelle de temps plus cohérente avec celle du modèle, les productions potentielles de méthane étant calculées par mois.

Les valeurs de température extérieure utilisées proviennent de la station météo de Quimper-Pluguffan (Météo-Bretagne, 2017), proche de Saint-Goazec. Les données montrent que le lisier a, en moyenne, une température supérieure de 2,4°C à celle de l'air sur la période considérée.

Dans le cas n°1, l'équation suivante a été obtenue à partir de 299 valeurs :

$$T_{\text{lisier}} = 0,756 \times T_{\text{extérieure}} + 5,26 \quad (2)$$

Le coefficient de détermination  $R^2$  associé est de 0,67. Le test de Fisher affiche une *p-value* inférieure à  $2,2 \cdot 10^{-16}$ , ce qui signifie que la température du lisier est bien dépendante de la température de l'air.

Cependant, le test de Shapiro-Wilk réalisé sur les résidus affiche une  $p$ -value de  $5,048.10^{-5}$ , ce qui signifie que le postulat de normalité des résidus n'est pas vérifié. Le modèle n'est donc pas valable.

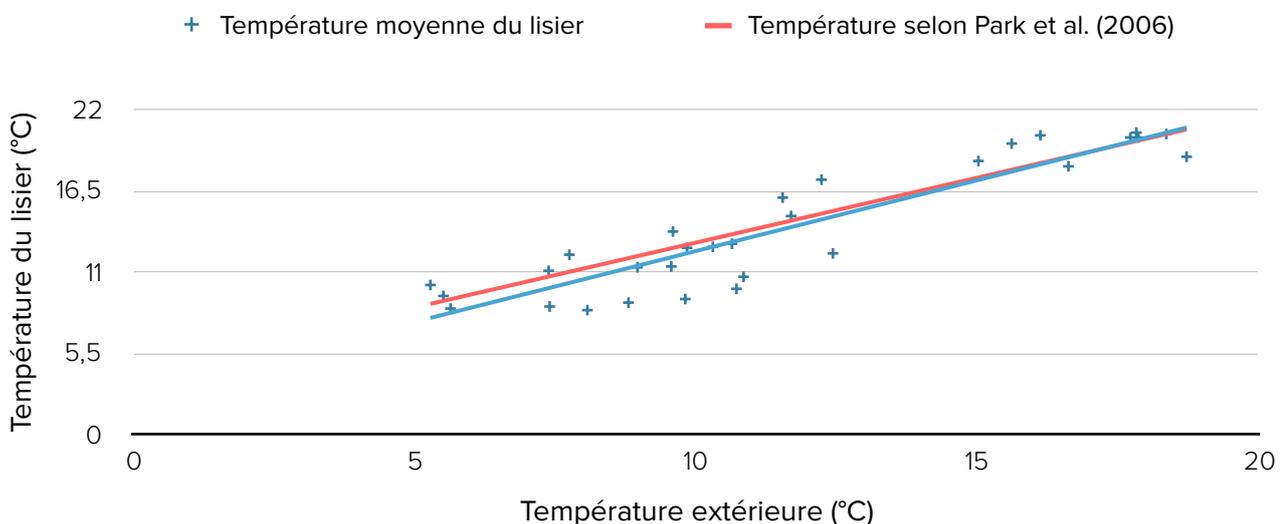
Cela pourrait être dû à l'inertie thermique de l'effluent. En effet, l'évolution des températures extérieure et du lisier montre que si les deux courbes ont la même tendance, la température du lisier est moins variable que la température extérieure (figure 3). Donc la variation de la température de l'air n'aura pas un impact sur celle sur lisier le même jour, mais plutôt au bout de quelques jours.

Dans le cas n°2, l'équation suivante a été obtenue à partir de 30 valeurs :

$$T_{\text{lisier}} = 0,959 \times T_{\text{extérieure}} + 2,87 \quad (3)$$

Le coefficient de détermination  $R^2$  associé est de 0,84. Le test de Fisher affiche une  $p$ -value de  $1,022.10^{-12}$ , ce qui signifie que la température du lisier est bien dépendante de la température extérieure.

De plus, le test de Shapiro-Wilk réalisé sur les résidus affiche une  $p$ -value de 0,1039. Cette valeur étant supérieure à 0,05, le postulat de la normalité des résidus est vérifié. Le modèle est donc valable.



**FIGURE 4 : TEMPÉRATURE MOYENNE DU LISIER CALCULÉE PAR DÉCADE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE EXTÉRIEURE CALCULÉE PAR DÉCADE MESURÉE À LA STATION DE QUIMPER-PLUGUFFAN**

La figure 4 montre que l'équation obtenue pour la station expérimentale porcine de Guernévez est relativement proche de celle publiée par Park *et al.* (2006). Ces formules seraient donc généralisables. Cependant, il convient de remarquer que dans les deux cas, ces équations ont

été obtenues pour des lisiers porcins. Il est donc important de vérifier ces équations pour d'autres types d'effluents, tels que des lisiers bovins ou des digestats issus d'unités de méthanisation.

La démarche a été réitérée en utilisant les températures du site de Guernévez. Cependant, les résultats n'étaient pas significatifs. Pour la suite du projet, l'équation (3) est donc utilisée.

## 2. COMPARAISON DES PRODUCTIONS DE MÉTHANE THÉORIQUE ET RÉELLE

Dans cette partie, l'évolution des volumes de lisier dans la fosse de stockage est considérée du mois de mai 2016 au mois d'avril 2017, avec un volume initial de 60 m<sup>3</sup>. La production estimée de méthane est étudiée du mois d'août 2016 au mois d'avril 2017, afin de pouvoir comparer les résultats théoriques avec les données expérimentales.

### a) *Premières comparaisons des productions théoriques aux productions réelles*

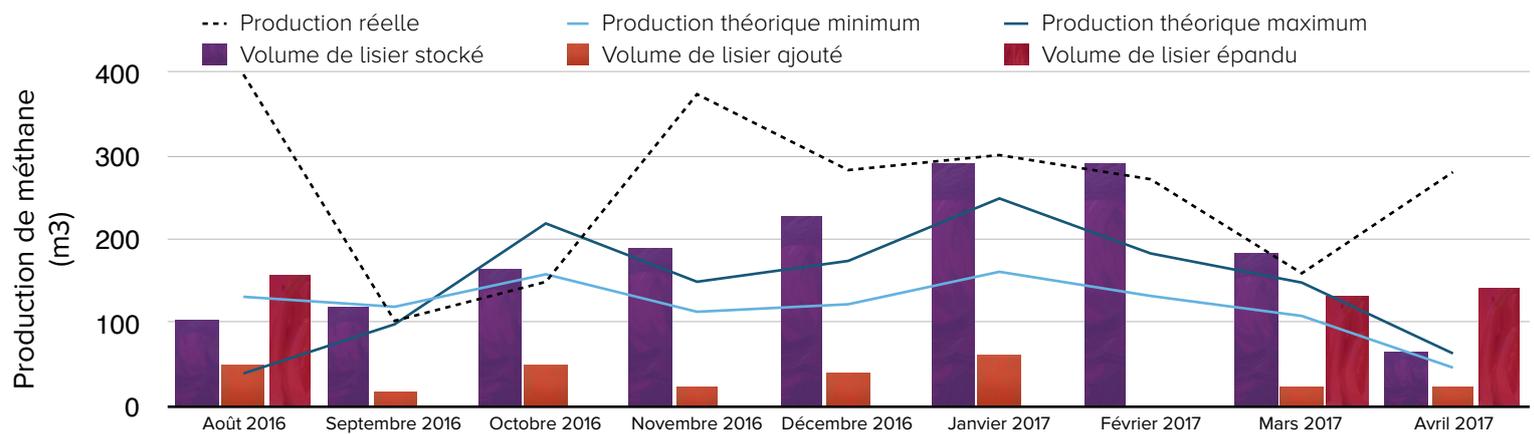
Il s'agit de comparer les productions de méthane réelles et théoriques. D'après les données provenant de la station expérimentale de Guernévez, la production de méthane cumulée sur la période de août 2016 à avril 2017 est de 2 319 m<sup>3</sup>. Les quantités de lisier introduites et épandues sont également connues, de même que le taux de matière sèche, de matière organique et le potentiel méthanogène du lisier (tableau 2). Le lisier présent dans la fosse est un mélange de lisiers de truies gestantes, de maternités, de porcelets post-sevrage et de porcs à l'engraissement.

CARACTÉRISTIQUES DU LISIER PORCIN DE GUERNÉVEZ	
Taux de matière sèche (% MB)	6,77 %
Taux de matière organique (% MS)	82,4 %
Potentiel méthanogène (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / t MO)	233

**TABLEAU 2 : CARACTÉRISTIQUES DU LISIER PORCIN PRODUIT PAR LA STATION EXPÉRIMENTALE PORCINE DE GUERNÉVEZ**

En utilisant le modèle tel qu'il est décrit dans l'Annexe III, l'intervalle de production obtenu est compris entre 1 090 m<sup>3</sup>, soit un écart relatif de 113%, et 1 399 m<sup>3</sup>, soit un écart relatif de 75%. Les écarts relatifs mensuels sont compris entre 4% et 920%, avec une moyenne de 163%. Les prédictions sont donc très éloignées de la réalité.

La figure 5 montre l'évolution de la production réelle et estimée entre août 2016 et avril 2017, de même que les quantités de lisier ajoutées, épandues et stockées au sein de la fosse.



**FIGURE 5 : COMPARAISON N°1 DES PRODUCTIONS DE MÉTHANE THÉORIQUES ET RÉELLES ET ÉCARTS RELATIFS ASSOCIÉS**

De manière générale, le modèle sous-estime la production méthanogène, sauf pendant les mois de septembre 2016, octobre 2016 et mars 2017. La comparaison des quantités de méthane théoriquement produites avec les variations de la quantité de lisier disponible montre une certaine correspondance entre la production estimée et les quantités de lisier épandues. En effet, en août 2016 et avril 2017, des volumes épandus significatifs correspondent à une baisse de la production théorique. Or, la littérature montre que la quantité de méthane produite est effectivement liée au volume d'effluent présent (Park *et al.*, 2006), ce qui est confirmé par la figure 5. Cependant, le modèle semble, selon les mois, surestimer ou sous-estimer l'impact des différents volumes de lisier considérés sur la production de méthane.

Le fait que la production théorique maximum soit inférieure au minimum de production en août et en septembre peut être expliqué par le fait que le modèle affiche une production méthanogène très importante en juillet, diminuant considérablement le stock de matière organique. Or, les apports en matière organique sont relativement faibles à cette période, qui est également une période d'épandage.

Les résultats du modèle pourraient être améliorés en utilisant des paramètres spécifiques du lisier de Guernévez : la température du lisier, le taux de biodégradabilité de la matière organique et le  $\ln(A)$ .

Pour rappel, l'équation permettant l'estimation de la production méthanogène comporte trois paramètres : la température du lisier, la quantité de matière organique disponible pour la production de méthane et le paramètre  $\ln(A)$ , qui reflète le potentiel de production méthanogène d'un effluent, influencé par les caractéristiques physico-chimiques du substrat. Dans l'étude de Petersen *et al.*

(2016), les auteurs ont réalisé une analyse de sensibilité, en calculant un « ratio de sensibilité » (SR), qui est un rapport entre deux changements relatifs (Clavreul *et al.*, 2012) :

$$SR = \frac{\frac{\Delta \text{result}}{\text{initial\_result}}}{\frac{\Delta \text{parameter}}{\text{initial\_parameter}}}$$

Ce ratio permet d'estimer l'impact que la variation d'un paramètre aura sur les résultats du modèle. Par exemple, si le ratio de sensibilité d'un paramètre est égal à 2, lorsque la valeur de ce paramètre augmente de 10%, le résultat final augmente de 20% (Clavreul *et al.*, 2012). Les résultats de l'analyse de sensibilité réalisée par Petersen *et al.* (2016) (tableau 3) montre que si la température et le taux de biodégradabilité sont des paramètres relativement sensibles, le paramètre ln(A) est le paramètre ayant l'influence la plus significative sur les valeurs en sortie du modèle.

TYPE D'EFFLUENT	LN(A)	BIODÉGRADABILITÉ (MOD)	TEMPÉRATURE
Lisier de porc	33,45	0,98	2,26
Lisier bovin	41,06	1,11	2,31

*TABLEAU 3 : RATIO DE SENSIBILITÉ CALCULÉS POUR LES PARAMÈTRES DU MODÈLE (D'APRÈS PETERSEN ET AL., 2016)*

- Le taux de biodégradabilité

La méthode décrite dans Petersen *et al.* (2016) a été utilisée pour le calcul du taux de biodégradabilité.

Les lisiers de Guernévez ont un potentiel méthanogène de 233 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t MO, soit 0,233 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg MO (Quideau, 2012). Dans des conditions normales de température et de pression, 1 m<sup>3</sup> de méthane est équivalent à 0,503 kg de carbone sous forme de CH<sub>4</sub>. En considérant que 60% du carbone est utilisé pour la production de méthane et 40% pour la production de dioxyde carbone, la quantité de carbone utilisée est de 0,838 kg par m<sup>3</sup> de biogaz. Enfin, la quantité de carbone dans du lisier de porc est de 0,44 kg C/kg MO (Petersen *et al.*, 2016).

Ces données permettent d'obtenir un taux de biodégradabilité de la matière organique de 44,4%. Ce résultat est ensuite utilisé pour calculer les quantités de MO<sub>d</sub> et MO<sub>nd</sub> disponibles pour la production de méthane.

Cette valeur étant inférieure de 50% au résultat de Sommer *et al.* (2004) et de 13% au résultat de Petersen *et al.* (2016) (voir tableau II.1), cela montre que le lisier a bien subi une dégradation significative entre son excrétion et son transfert dans la fosse.

- Le paramètre ln(A)

Les valeurs de ln(A) utilisées dans cette étude correspondent à celles déterminées pour du digestat frais ou stocké (Elsgaard *et al.*, 2016) et aux intervalles de confiance à 95% pour des lisiers bovins et porcins préalablement stockés (Petersen *et al.*, 2016). Dans l'idéal, la valeur de ln(A) devrait être déterminée pour chaque effluent considéré. Cependant, cela implique d'avoir des données de production.

Dans certains cas, l'entreprise Nénufar a accès à ces données, puisque l'exploitant a la possibilité d'installer une couverture Nénufar de 3 m de diamètre sur sa fosse. Selon le volume récupéré après un temps donné, la production peut être extrapolée à l'intégralité de la surface de la fosse. Grâce à ces données et à l'analyse de l'effluent en laboratoire, il est alors possible de déterminer le paramètre ln(A). Cependant, cette opération n'est pas réalisée sur tous les projets, probablement à cause du coût de l'utilisation du prototype (500 € HT).

Dans le cas de la station expérimentale porcine de Guernévez, il est possible de déterminer le ln(A) des lisiers. En effet, possédant des données de production et connaissant la température et le potentiel méthanogène du lisier, le taux de biodégradabilité du lisier et le paramètre ln(A) associé peuvent être calculés. Cela pourrait permettre d'affiner l'estimation de la production, puisque des écarts relatifs importants subsistent.

Le paramètre ln(A) a été calculé grâce à la formule suivante :

$$\ln(A) = \ln[ F_t \div (MO_d + 0,01*MO_{nd}) ] + (E_a \div R*T)$$

avec :

- $F_t$  : la production de méthane sur la durée considérée (en  $m^3$ ) ;
- $MO_d$  : la quantité de matière organique dégradable disponible (en kg) ;
- $MO_{nd}$  : la quantité de matière organique réfractaire disponible (en kg) ;
- $E_a$  : l'énergie d'activation, valant 81 kJ/mol ;
- $R$  : la constante des gaz parfaits, valant 8,314 J/K/mol ;
- $T$  : la température (en Kelvin).

Afin de minimiser l'incertitude de  $\ln(A)$ , le paramètre a été calculé pour les mois de novembre 2016 à février 2017 (tableau 4).

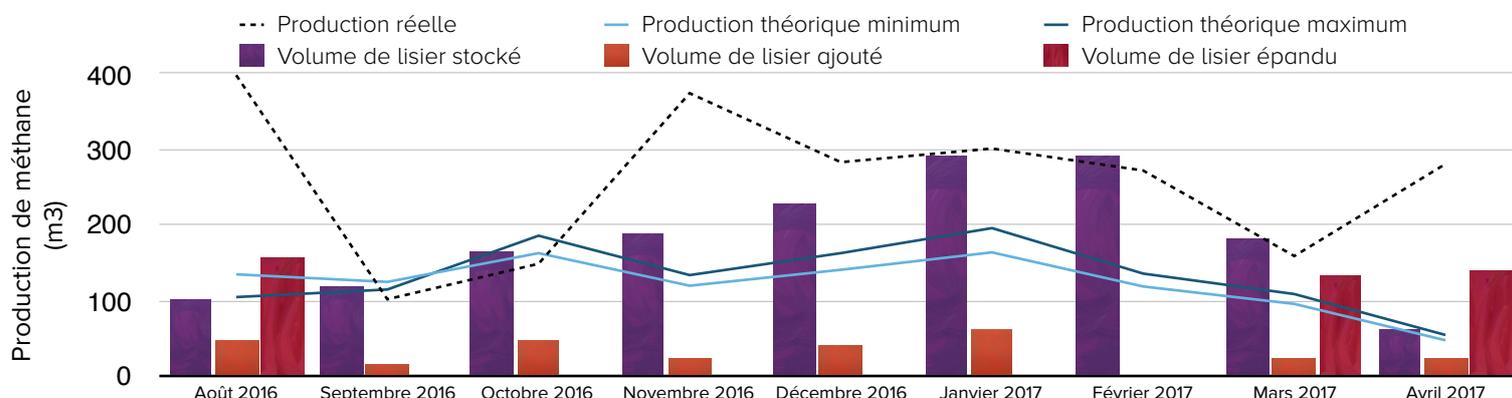
Mois	LN(A)
Novembre 2016	31,5
Décembre 2016	31,2
Janvier 2017	31,3
Février 2018	31,3

**TABLEAU 4 : VALEURS DE LN(A) POUR LE LISIER DE LA STATION EXPÉRIMENTALE PORCINE DE GUERNÉVEZ**

L'intervalle 31,2-31,5 est considéré dans la suite de cette étude.

En utilisant ces valeurs, l'intervalle de production obtenu est compris entre 1 111 m<sup>3</sup>, soit un écart relatif de 109% et 1 199 m<sup>3</sup>, soit un écart relatif de 93%. Les écarts relatifs mensuels sont compris entre 9% et 485%, avec une moyenne de 137%.

La figure 6 montre l'évolution de la production réelle et estimée entre août 2016 et avril 2017, de même que les quantités de lisier ajoutées, épandues et stockées au sein de la fosse.



**FIGURE 6 : COMPARAISON N°2 DES PRODUCTIONS DE MÉTHANE THÉORIQUES ET RÉELLES ET ÉCARTS RELATIFS ASSOCIÉS**

Lorsque la période est considérée dans son ensemble, la précision du modèle n'est pas améliorée. Cependant, les écarts mensuels entre productions théorique et réelle sont réduits.

Comme précédemment, une similitude entre l'évolution de la production méthanogène estimée et les quantités de lisiers épandues peut être remarquée. Une hypothèse est que le modèle sous-estime la quantité de matière organique disponible pour la production de biogaz.

Or, la littérature indique que la matière organique peut être divisée en deux catégories : la matière organique dégradable, MO<sub>d</sub>, et la matière organique réfractaire, MO<sub>nd</sub>. Sommer *et al.*

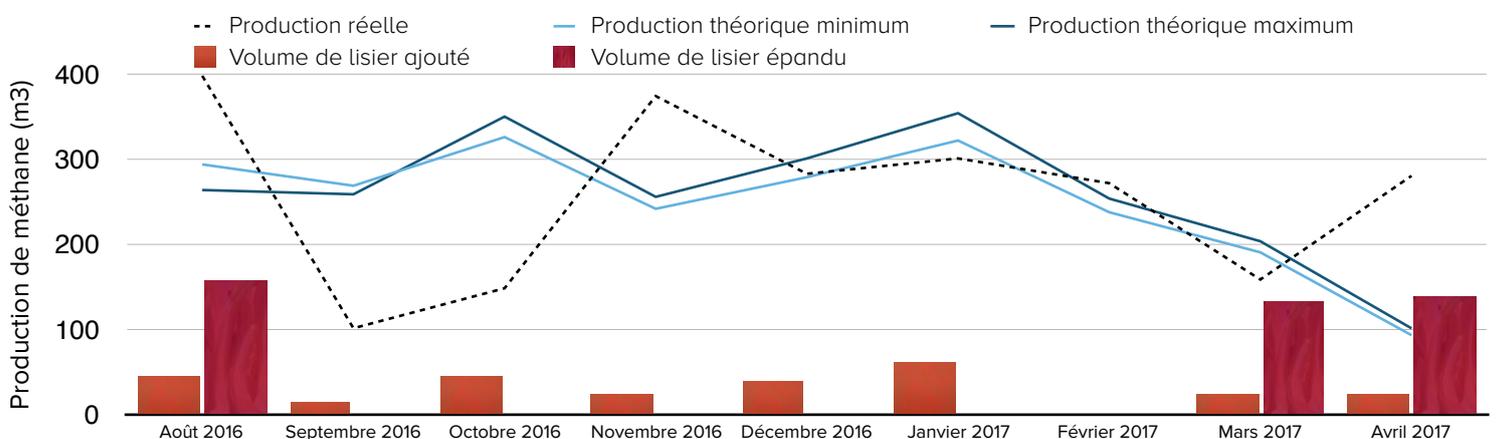
(2004) avaient associé un coefficient de 0,01 à la  $MO_{nd}$  pour rendre compte de la vitesse de dégradation de ce type de matière organique, considérée 100 fois plus lente que celle de la  $MO_d$ . Les auteurs s'étaient basés sur l'article de Tong *et al.* (1990).

Cet article explique que la biodégradabilité de la matière organique est liée au taux de lignine du substrat, l'objectif étant d'évaluer l'impact du taux de lignine sur la vitesse de dégradation de divers substrats (Tong *et al.*, 1990). En effet, la lignine formerait une structure tridimensionnelle autour d'autres molécules, telles que l'holocellulose, ce qui les rendrait inaccessibles aux bactéries et compliquerait ainsi le processus de dégradation (Tong *et al.*, 1990, Lübken *et al.*, 2010). D'autres paramètres pourraient avoir un impact, tels que les caractéristiques chimiques de la lignine et les types de liens entre la lignine et d'autres molécules.

L'article montre que le substrat ayant la vitesse de dégradation la plus faible est le sapin du Colorado, avec un taux de lignine dans la matière sèche d'environ 29% (Tong *et al.*, 1990).

Cependant, d'après la littérature, les lisiers ont un taux de lignine inférieur : environ 8% de la matière sèche pour les lisiers de porc (Hjorth *et al.*, 2015) et environ 15% de la matière sèche pour les lisiers bovins (Amon *et al.*, 2007). Les teneurs en lignine des lisiers étant inférieures à celles des substrats considérés dans Tong *et al.* (1990), il est donc envisageable que la dégradation de la  $MO_{nd}$  soit plus rapide.

Plusieurs coefficients ont été testés. Les résultats les plus proches de la réalité ont été obtenus pour un coefficient de 0,7, donc en considérant que la dégradation de la  $MO_{nd}$  est 1,4 fois plus lente que celle de la  $MO_d$ . Dans ce cas, l'intervalle de production est compris entre 2 255  $m^3$ , soit un écart relatif de 3% et 2 344  $m^3$ , soit un écart relatif de 1%. Les écarts relatifs mensuels sont compris entre 1% et 199%, avec une moyenne de 49% (figure 7).



**FIGURE 7 : COMPARAISON N°3 DES PRODUCTIONS DE MÉTHANE THÉORIQUES ET RÉELLES ET ÉCARTS RELATIFS ASSOCIÉS**

Les résultats obtenus sont donc proches de la réalité sur la période d'août 2016 à avril 2017. Une variabilité mensuelle subsiste, mais peut être expliquée par le fait que le modèle considère un mélange de lisiers d'engraissement, de post-sevrage, de truies gestantes et allaitantes. Or, en réalité, les types de lisiers incorporés varient selon les mois. Par exemple, en septembre et octobre 2016, des lisiers de post-sevrage et de truies ont été apportés. Ces lisiers possèdent de faibles taux de matière organique par rapport au lisier mixte considéré dans le modèle. Cela pourrait donc expliquer l'optimisme du modèle. En novembre, le volume apporté est moindre, mais il s'agit ici d'un lisier réellement mixte. Un apport considérable de MO aurait donc pu relancer l'activité microbiologique. Les apports de décembre et janvier correspondent également à des lisiers mixtes, et dans ce cas, les prédictions du modèle sont en accord avec la réalité.

Des écarts demeurent en août et en avril, qui correspondent aux périodes d'épandage des lisiers. Le modèle semble surestimer l'impact de l'épandage sur la quantité de MO présente dans la fosse de stockage.

Une fois ces corrections apportées, le modèle permet d'obtenir des résultats très satisfaisants.

### C) CONCLUSIONS ET LIMITES

La littérature montre que la méthode employée, basée sur la quantité de matière organique disponible pour la production de biogaz et plébiscitée notamment par le GIEC pour la quantification des émissions de GES, mène à des résultats éloignés de la réalité. En effet, ce modèle aurait tendance, selon le moment de l'année, à surestimer ou sous-estimer les quantités de GES issues du stockage d'effluents d'élevage (Park *et al.*, 2005 ; Miller *et al.*, 2013 ; Baldé *et al.*, 2016)

Dans le cas de l'installation Nénufar présente sur la station expérimentale de Guernévez, le modèle semble cohérent avec la réalité, une fois le coefficient rendant compte de la vitesse de dégradation de la  $MO_{nd}$  modifié. En effet, lorsqu'un coefficient de 0,7 est utilisé, le modèle fournit un intervalle de production très proche de la réalité, avec un écart relatif de 3% pour la limite inférieure et de 1% pour la limite supérieure. Lorsque les productions mensuelles sont considérées, des différences demeurent entre les estimations et les données expérimentales, avec un écart relatif moyen de 49%.

Peu de données expérimentales étant disponibles à l'heure actuelle, la valeur du coefficient affecté à la  $MO_{nd}$  n'a pas pu être vérifiée pour d'autres projets. Du fait de la différence significative

entre la valeur de 0,01 indiquée dans la littérature et celle du projet présenté ci-dessus, et compte tenu de l'impact de ce coefficient sur la précision du modèle, les deux valeurs seront pris en compte dans la suite de cette étude. Par soucis de simplicité, le coefficient sera appelé « coefficient  $k$  ».

Il est donc essentiel de poursuivre la vérification de ce modèle. Dans un premier temps, les données les plus récentes de la station expérimentale porcine de Guernévez peuvent être utilisées, afin d'évaluer la précision du modèle sur un temps plus long. Dans un deuxième temps, d'autres projets devraient être étudiés, notamment ceux traitant des lisiers bovins et des digestats issus de méthanisation. Avec un nombre suffisant de projet, des valeurs moyennes de  $\ln(A)$ , de biodégradabilité et du coefficient affecté à la  $MO_{nd}$  pourraient être obtenues. Cependant, à l'heure actuelle, les données expérimentales ne sont pas suffisantes pour réaliser ces vérifications.

Le modèle permet tout de même d'estimer la production de méthane dans une fosse de stockage d'effluent. Il convient de rappeler que l'objectif de ce modèle n'est pas de décrire de manière précise les processus biochimiques ayant lieu au sein du lisier, mais bien de fournir une estimation de la production de méthane.

Pour la suite de cette étude, les quantités de méthane considérées correspondront à la production annuelle, et non mensuelle.

## V. L'IMPACT D'UNE COUVERTURE NÉNUFAR

Un des objectifs de cette étude est de déterminer l'impact d'une couverture Nénufar, tant sur l'environnement que sur la gestion d'une exploitation agricole ou d'une unité de méthanisation.

Dans un premier temps, l'impact environnemental des projets Nénufar sera évalué grâce au modèle décrit dans la partie IV.

Dans un deuxième temps, l'impact d'une couverture Nénufar sur une exploitation sera étudié, grâce à des entretiens menés avec des porteurs de projets.

### A) IMPACT ENVIRONNEMENTAL D'UNE COUVERTURE NÉNUFAR

L'agriculture est le premier secteur émetteur de méthane en France, avec 67% des émissions françaises. En 2014, la gestion des déjections d'animaux d'élevage représentait 15% des émissions de méthane liées à l'agriculture (CITEPA, 2016).

En 2008, les Etats Membres de l'Union Européenne ont adopté le « paquet sur le climat et l'énergie à l'horizon 2020 », fixant trois objectifs (Commission européenne, 2017) :

1. réduire de 20% les émissions de GES par rapport à 1990 ;
2. porter à 20% la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique ;
3. améliorer de 20% l'efficacité énergétique.

Du fait de sa capacité à capter et stocker le méthane produit naturellement par les effluents d'élevage, la couverture Nénufar pourrait participer aux deux premiers objectifs :

- en récupérant le méthane produit, la couverture réduit les émissions atmosphériques de méthane, celui-ci ayant un pouvoir de réchauffement global 25 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone (CITEPA, 2016) ;
- en valorisant le biogaz, la couverture augmente la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique français ;
- en substituant le méthane à une énergie fossile, la couverture permet de réduire les émissions liées à la production de cette énergie.

Il est donc important d'évaluer l'impact environnemental d'une couverture Nénufar, l'hypothèse étant que ce dispositif réduit de manière significative les émissions de GES d'une exploitation agricole.

Différents éléments doivent être pris en compte pour l'évaluation environnementale d'une couverture Nénufar :

1. Les émissions de gaz à effet de serre liées à :
  - a. la fabrication de la couverture ;
  - b. son transport jusqu'au site ainsi que son installation ;
  - c. son fonctionnement.
2. La réduction des émissions de GES liée à la récupération du biogaz émis par l'effluent, ainsi que sa substitution à l'énergie fossile utilisée ;
3. La durée de fonctionnement de l'installation ;
4. Le devenir de la couverture une fois que l'installation est hors fonctionnement.

A notre connaissance, il n'existe pas de données relatives aux points 1 et 4.

Concernant le point 3, le matériau utilisé pour la couverture dispose d'une garantie de 10 ans, ce qui sous-entend qu'elle pourrait fonctionner pendant minimum 10 ans, mais très certainement plus longtemps. Ce point est particulièrement important car plus la durée de vie de l'installation

augmente, et plus les émissions de GES liées à la construction, au transport, à l'installation, au fonctionnement et au recyclage de la couverture seront compensées.

Concernant le point 2, le modèle décrit dans la partie IV permet d'estimer la quantité de méthane pouvant être potentiellement produite chaque année par un effluent. Il est donc possible de quantifier l'ampleur des émissions atmosphériques de méthane évitées ainsi que l'impact environnemental lié à la substitution d'une énergie fossile. Pour cela, deux cas sont considérés, correspondant à deux valeurs du coefficient  $k$ , affecté à la matière organique réfractaire : 0,01 et 0,7. La seule exception est la station expérimentale de Guernévez, pour qui  $k = 0,7$  est vérifié. L'intervalle de production méthanogène obtenu est relativement large. Le méthane sera considéré comme étant valorisé dans son intégralité, ce qui, dans la réalité, n'est pas forcément le cas.

Les tableaux 5 et 6 présentent la réduction des émissions de GES pour les différentes exploitations présentées dans la partie III. Les quantités moyennes de méthane produites par chaque projet sur 10 ans sont traduites en « tonne équivalent CO<sub>2</sub> », une unité créée par le GIEC (International Panel on Climate Change, 1990). La réduction des émissions de GES liée à la substitution d'une énergie fossile par du méthane est calculée en considérant que le facteur d'émission de l'électricité, utilisée par l'EARL de Quistillic, est en moyenne de 0,539 CO<sub>2</sub> eq/kWh du et que celui du gaz propane, utilisé par les autres exploitations, est de 0,270 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh (ADEME, 2017).

PROJET	QUANTITÉ DE MÉTHANE PRODUITE EN 10 ANS POUR $k = 0,01$ (m <sup>3</sup> )	QUANTITÉ DE CO <sub>2</sub> ATMOSPHÉRIQUE ÉVITÉE SUR 10 ANS (en t eq CO <sub>2</sub> )	RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GES LIÉE À LA SUBSTITUTION D'UNE ÉNERGIE FOSSILE (en t eq CO <sub>2</sub> )	TOTAL (en t eq CO <sub>2</sub> )
Ferme de Grignon	163 550	2 682	437	3 119
SARL Fertiwatt	183 650	3 012		3 012
SCEA de Neuville	99 150	1 626	265	1 891
EARL de Quistillic	7 150	117	38	155
EARL de l'Avenir	94 100	1 543		1 543

***TABLEAU 5 : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE PROJETS NÉNUFAR SUR 10 ANS POUR  $k = 0,01$***

PROJET	QUANTITÉ DE MÉTHANE PRODUITE SUR 10 ANS POUR $k = 0,7$ (m <sup>3</sup> )	QUANTITÉ DE CO <sub>2</sub> ATMOSPHÉRIQUE ÉVITÉE SUR 10 ANS (en t eq CO <sub>2</sub> )	RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GES LIÉE À LA SUBSTITUTION D'UNE ÉNERGIE FOSSILE (en t eq CO <sub>2</sub> )	TOTAL (en t eq CO <sub>2</sub> )
Ferme de Grignon	312 300	5 122	835	5 956
Station de Guernévez	39 250	644	105	749
SARL Fertiwatt	473 800	7 770		7 770
SCEA de Neuville	160 150	2 626	428	3 055
EARL de Quistillic	14 480	237	77	315
EARL de l'Avenir	230 550	3 781		3 781

*TABLEAU 6 : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE PROJETS NÉNUFAR SUR 10 ANS POUR  $k = 0,7$*

La réduction des émissions de GES est donc significative.

En considérant une durée de fonctionnement de 10 ans, il semble certain que la récupération et la valorisation du biogaz produit aille au-delà de la simple compensation des émissions liées à une couverture Nénufar, en permettant de réduire de manière significative l'empreinte environnementale d'une exploitation agricole.

Il serait intéressant de calculer la quantité de GES émise pour la construction, la mise en place et le fonctionnement de la couverture, afin d'évaluer plus précisément l'ampleur de la réduction des émissions de GES.

## B) IMPACT D'UNE COUVERTURE SUR LA GESTION D'UNE EXPLOITATION

Il s'agit, dans cette partie, d'évaluer l'impact d'une couverture Nénufar sur la gestion d'une exploitation agricole.

Le système Nénufar étant présenté comme une unité de méthanisation simplifiée, les avantages et inconvénients de ce système peuvent être donc comparés à ceux d'une unité classique (Charpiot & Dupré, 2012) :

- Les avantages d'une unité de méthanisation pour un agriculteur sont :
  - La création d'un revenu supplémentaire ;
  - La valeur fertilisante du digestat, possédant un taux d'azote ammoniacal plus élevé que les substrats en entrée du digestat, ce qui signifie que l'azote est plus facilement assimilable par les plantes ;

- L'amélioration de l'image environnementale de l'exploitation ;
  - La production d'une énergie renouvelable ;
  - La valorisation de déchets agricoles.
- Les inconvénients sont :
- Le temps de travail supplémentaire ;
  - La complexité technique ;
  - Le besoin en fonds propres pour la réalisation d'un projet ;
  - La valorisation du digestat, qui peut être problématique.

## 1. HYPOTHÈSES

L'impact d'une couverture Nénufar sur une exploitation a donc été analysé par rapport aux avantages et inconvénients connus d'une unité de méthanisation classique. Les hypothèses sont les suivantes :

1. Une unité Nénufar présente des avantages similaires à une unité de méthanisation, en termes de :
  - a) Valorisation des effluents d'élevage ;
  - b) Production d'énergie ;
  - c) Création d'un revenu supplémentaire ;
  - d) Amélioration de la valeur fertilisante de l'effluent, grâce à une augmentation du taux d'azote ammoniacal ;
  - e) Amélioration de l'image de l'exploitation ;
2. Une unité Nénufar présente d'autres avantages par rapport à une unité de méthanisation classique :
  - a) Simplicité technique de la couverture ;
  - b) Simplicité des démarches administratives ;
  - c) Peu de temps de travail supplémentaire ;
  - d) Pas de modification de la gestion des effluents ;
3. Le système Nénufar présenterait cependant d'autres limites : les modalités de valorisation de la chaleur sont limitées et peuvent ne pas convenir à toutes les exploitations ; la rentabilité des projets doit être confirmée.

Toute question liée à la rentabilité des projets sera traitée dans la partie VI.

## 2. MÉTHODE

Des entretiens de type « semi-directif » ont été menés avec 6 porteurs de projets Nénufar et :

- avec un éleveur porcin de la Marne dont le projet Nénufar n'a pas abouti ;
- avec deux agriculteurs de la Vienne, un éleveur laitier et un éleveur porcin, en réflexion depuis plusieurs années sur la méthanisation mais n'ayant pas été en contact avec Nénufar, afin de recueillir un avis externe sur le dispositif.

Un guide d'entretien a été mis au point, afin d'aborder différents thèmes (Annexe IV) :

- la présentation de l'exploitation agricole et le cas échéant, l'unité de méthanisation ;
- le projet Nénufar :
  - la motivation initiale ;
  - le déroulement du projet ;
  - les investissements liés au projets ;
- la production de biogaz :
  - les effluents et leur gestion ;
  - le type de fosse ;
  - la valorisation du biogaz produit ;
  - les dépenses liées au projet ;
- un retour d'expérience par rapport à l'impact de la couverture sur l'exploitation ;
- dans le cas du projet non abouti : l'étape et les raisons d'abandon du projet ;
- dans le cas des deux agriculteurs de la Vienne : des questions en rapport avec leur réflexion sur la méthanisation, sur les contraintes agricoles actuelles et sur l'entreprise Nénufar.
- les objectifs de développement de l'exploitation.

Ayant eu l'occasion de rencontrer un certain nombre porteurs de projet durant ce stage, des discussions informelles ont également permis d'avoir des retours sur la couverture Nénufar, sans qu'un entretien tel que celui décrit ci-dessus soit réalisé.

## 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les hypothèses présentées précédemment ont été confrontées aux propos des agriculteurs rencontrés.

- La motivation principale d'un projet Nénufar

- Valoriser des effluents d'élevage pour la production d'énergie

Pour trois éleveurs, la motivation première était bien de valoriser leurs effluents pour la production d'une énergie auto-consommée sur l'exploitation.

Pour certains, la couverture Nénufar est une alternative à une unité de méthanisation classique, un tel projet n'ayant pas pu aboutir. Pour d'autres, sans comparaison avec une unité classique, la couverture est un moyen d'améliorer leur autonomie énergétique. Le projet est alors similaire à l'installation de panneaux solaires, par exemple. En effet, pour deux éleveurs, ce projet constitue un « investissement pour l'avenir » en permettant à l'exploitation d'être plus autonome, donc plus résiliente face aux fluctuations du marché.

- Autres motivations

La production d'énergie n'est pas nécessairement l'unique motivation d'un projet, même si elle est indéniablement un avantage.

Pour les deux unités de méthanisation, la couverture de la fosse de stockage du digestat était obligatoire. Parmi les différents types de couverture, les exploitants ont choisi Nénufar pour plusieurs raisons : la couverture permet d'évacuer les eaux de pluies, donc de réduire les frais d'épandage, et de diminuer les pertes ammoniacales tout en récupérant le biogaz rémanent, c'est-à-dire le biogaz produit à partir du digestat. De plus, le fait que le système soit flottant et indépendant de la structure de la fosse permet d'isoler le béton du biogaz. En effet, le fort pouvoir corrosif du biogaz implique un traitement du béton, qui peut être très onéreux dans le cas d'une fosse de stockage : si les niveaux sont maintenus constants dans les digesteurs, où il est suffisant de ne traiter que la partie haute de la fosse, le niveau est extrêmement variable dans une fosse de stockage de digestat, ce qui signifie que le béton doit être traité sur toute la hauteur de la fosse.

Le cas de la station expérimentale de Guernévez est particulier. En effet, la couverture Nénufar a été installée dans le cadre du projet « PROMETHIS ». L'objectif de l'installation est bien de tester le produit en tant que tel, afin d'évaluer les avantages et inconvénients pour les élevages.

Enfin, pour un éleveur de vaches laitières, dont le projet n'est pas étudié dans ce rapport, la couverture Nénufar a été choisie particulièrement pour sa capacité d'évacuer les eaux de pluie. L'éleveur souhaitant augmenter la taille de son cheptel mais n'ayant pas une capacité de stockage suffisante avec une fosse ouverte, la couverture Nénufar devait lui permettre de réaliser son projet sans avoir à construire de stockage supplémentaire. La possibilité de récupérer et de valoriser le biogaz était un atout secondaire.

- La création d'un revenu supplémentaire

Dans cette étude, les seuls cas où l'installation d'une couverture Nénufar crée un revenu supplémentaire sont les projets sur des unités de méthanisation, où le biogaz est utilisé pour la production d'électricité, vendue et injectée sur le réseau.

Dans le cas des élevages, tous les porteurs de projet parlent d'économies. Elles sont liées à l'auto-consommation de la chaleur produite à partir du biogaz ainsi qu'à la diminution des frais d'épandage. En effet, si la fosse n'est pas déjà couverte, ce qui est le cas de l'EARL de Quistillic, la couverture évacue les eaux de pluies et réduit donc le volume d'effluent à épandre. Ces économies d'épandage sont également réalisées sur les unités de méthanisation.

La rentabilité des projets est étudié dans la partie VI.

Il convient de souligner que les tarifs de rachat de l'électricité produite à partir de biogaz ont évolués en janvier 2017. Ces nouveaux tarifs permettraient la réalisation de projets valorisant le biogaz sur un moteur de cogénération de faible puissance.

L'entreprise Nénufar étudie actuellement deux projets en élevage où un tel moteur serait installé, afin de produire de l'électricité, injectée sur le réseau, et de la chaleur. Celle-ci serait valorisée pour le chauffage de bâtiments d'élevages et de la maison des exploitants. Le surplus de chaleur sera envoyé vers la fosse de stockage des lisiers, permettant une augmentation de la température, donc de la productivité méthanogène des lisiers.

- Amélioration de la valeur fertilisante de l'effluent

Dans le cas des digestats issus des unités de méthanisation, la recherche montre que la valeur fertilisante des substrats est améliorée entre l'entrée dans le digesteur et la sortie dans la fosse de stockage (Weiske *et al.*, 2006 ; Fédération des producteurs de porcs du Québec, 2007 ; Petersen *et al.*, 2007 ; Pigeon, 2010 ; Béline *et al.*, 2013 ; Quideau *et al.*, 2013 ; Dabert *et al.*, 2015). Cependant, aucune analyse n'a été réalisée permettant la comparaison de la valeur fertilisante du digestat entre son entrée dans la fosse de stockage et sa sortie pour épandage.

Dans le cas des élevages, très peu de données sont disponibles. La Ferme de Grignon est le seul projet où des analyses ont été réalisées pour un lisier frais et juste avant épandage, donc après un long temps de séjour dans la fosse. Ces analyses montrent une augmentation de la teneur en azote ammoniacal des lisiers. L'hypothèse que la valeur fertilisante soit améliorée est donc plausible, mais doit être vérifiée pour d'autres projets.

- Amélioration de l'image de l'exploitation

La couverture Nénufar ne semble pas avoir eu un impact positif ou négatif sur l'image de l'exploitation pour les riverains.

Cependant, les porteurs de projet sont très satisfaits de la couverture par rapport à l'image de l'exploitation, particulièrement en termes d'odeurs. Des mesures réalisées à la Ferme de Grignon montrent une diminution significative des émissions d'azote ammoniacal, fortement liées aux nuisances olfactives.

- La simplicité de mise en place et d'utilisation de la couverture

Les projets ont été finalisés relativement rapidement par rapport à une unité de méthanisation classique : les durées mentionnées par les porteurs de projet sont comprises entre 1 et 3 ans. Les projets ont mis respectivement 2 et 3 ans pour la station expérimentale de Guernévez et pour la Ferme de Grignon, principalement parce que ces exploitations sont liées à un établissement public : la Chambre d'Agriculture dans le cas de Guernévez et AgroParisTech pour la Ferme de Grignon. De ce fait, les démarches étaient plus complexes que pour une exploitation classique.

Pour les autres projets, les démarches administratives sont simples, et le délai de réalisation est principalement lié au temps de réflexion du porteur de projet.

Pour un agriculteur de la Vienne, la simplicité des démarches représente un réel atout pour Nénufar. Plusieurs porteurs de projet ont en effet mentionné la lourdeur grandissante des démarches administratives pour les agriculteurs.

D'après les porteurs de projet, la couverture nécessite un temps de travail négligeable, et n'a donc pas d'impact sur l'organisation de l'exploitant.

Quatre agriculteurs trouvent le concept « intéressant » mais plusieurs mentionnent des erreurs de conception. La couverture Nénufar étant un produit relativement récent, il est normal que des difficultés techniques se présentent. Les porteurs de projet étaient conscients de cela lorsqu'ils ont choisi Nénufar, et restent compréhensifs, mais attendent tout de même de l'entreprise que le système soit robuste.

De plus, il semble que la couverture Nénufar ne soit pas adaptée à tous les types de fosses, notamment les lagunes. Une lagune est une fosse creusée, où le sol est recouvert d'une membrane afin d'éviter toute pollution. Les « murs » de la lagune sont en fait des talus, avec une pente de 45°. Le système Nénufar ne semble pas adapté à ce type de fosse car si le niveau de l'effluent varie dans

la lagune, la couverture risque de s'échouer sur le talus et ne pourra alors plus stocker le biogaz. Il est en effet impératif de maintenir l'étanchéité au biogaz entre la couverture et l'effluent. Deux possibilités se présentent alors :

- le porteur de projet peut garantir que les niveaux d'effluents seront maintenus constants, ce qui est rarement possible ;
- la couverture peut être sous-dimensionnée, mais une partie du biogaz s'échappera vers l'atmosphère.

Cette difficulté technique a provoqué l'abandon du projet sur un élevage porcin dans la Marne, celui-ci présentant une contrainte supplémentaire : la lagune est équipée d'une passerelle, allant du bord vers le centre de la fosse. Trois couvertures auraient été nécessaires pour couvrir l'intégralité de la fosse, avec pour conséquence un investissement bien trop important.

- L'impact sur la gestion des effluents

L'installation d'une couverture a peu d'impact sur la gestion des effluents.

Pour les unités de méthanisation, l'installation ne change rien puisque le process est de type « infiniment mélangé » : le digesteur est « nourri » quotidiennement, et la même quantité de digestat arrive tous les jours dans la fosse de stockage.

Pour les élevages, deux porteurs de projet indiquent une modification de la gestion des effluents. Pour un, la fréquence d'apport des lisiers a augmenté. Pour l'autre, la gestion du stockage des lisiers et de l'épandage a été modifiée, un agitateur au fond de la fosse nécessitant la présence de minimum 2 mètres de lisier, alors que la fosse pouvait être entièrement vidangée auparavant. Concernant les deux autres porteurs de projet : dans un cas, le lisier est déjà transféré quotidiennement, et dans l'autre, du lisier n'est apporté qu'une fois toutes les deux ou trois semaines, mais il est impossible d'augmenter la fréquence.

La fréquence d'apport varie donc énormément selon les projets, allant du jour au mois.

L'installation d'une couverture Nénufar devrait changer la manière dont l'exploitant gère ses effluents et sa fosse : celle-ci n'a plus seulement une fonction de stockage, mais également une fonction de production. Le modèle présenté dans la partie précédente montre que la fréquence d'apport et de vidange de la fosse peut avoir un impact significatif sur la production de méthane, ce qui signifie que la gestion des lisiers doit être pensée de telle sorte à maximiser les volumes de biogaz produits.

- La modalité de valorisation des effluents

Hormis les unités de méthanisation, qui ne sont pas concernées par cette problématique, les projets étudiés ont des besoins en chaleur *a priori* suffisants pour justifier l'installation d'une couverture Nénufar. Deux porteurs de projet signalent cependant une production supérieure aux besoins de l'exploitation en été et inférieure en hiver, ce qui peut affecter la rentabilité du projet.

En effet, les fosses de stockage n'étant pas isolées ou chauffées, la température du lisier, donc la production de méthane, varie au cours de l'année. Pour des raisons économiques et environnementales, l'objectif est de valoriser l'intégralité du biogaz produit. Or, pour une valorisation en chaleur, il est certain qu'il y aura, à un moment ou un autre, un décalage entre les besoins de l'exploitation et la production de méthane.

Différentes solutions techniques permettent la valorisation de l'intégralité de la production :

- Les moteurs de cogénération : l'inconvénient des moteurs est que plus la puissance installée est faible, plus le rendement électrique diminue. Or, les projets Nénufar ont des puissances installées relativement faibles, *a priori* inférieures à 40 kW. De plus, l'expérience montre que la puissance installée minimum d'un moteur robuste est de 30 kW. Cette option n'est donc adaptée qu'aux projets ayant un lisier suffisamment méthanogène et en quantité suffisamment importante pour rentabiliser un moteur ;
- L'épuration : peu de solutions existent aujourd'hui pour l'épuration de petits volumes de biogaz. De plus, à l'heure actuelle, cette option implique une auto-consommation sur le site. En effet, il est impossible pour des projets de si petite taille d'injecter du biométhane dans un réseau de gaz de ville, car les charges liées au poste d'injection seraient beaucoup trop élevées ;
- Le biogaz porté : cette technique consiste à avoir plusieurs sites de production pour un seul site d'injection, mais cette option n'en est encore qu'au stade de la recherche.

#### 4. CONCLUSION

Cette partie avait pour but d'étudier l'impact d'une couverture Nénufar, tant sur l'environnement que sur la gestion d'une exploitation agricole.

Le modèle présenté dans la partie IV permet d'estimer la quantité de méthane pouvant être produite par les différents projets étudiés. Si l'ampleur des émissions de gaz à effet de serre liées à la construction, à l'installation, au fonctionnement et au recyclage de la couverture n'est pas connue, il est pratiquement certain que la couverture réduit considérablement l'impact

environnemental d'une exploitation agricole, grâce à la diminution des émissions de méthane vers l'atmosphère et à la substitution d'une énergie fossile.

D'un point de vue agronomique, il est possible que la valeur fertilisante des lisiers soit améliorée, mais les données sont actuellement insuffisantes pour pouvoir confirmer cette hypothèse.

De plus, l'impact sur la gestion d'une exploitation agricole semble minimale : la réalisation des projets est rapide et simple, tant d'un point de vue technique, pour l'installation de la couverture, que par rapport aux démarches administratives. L'utilisation et l'entretien de la couverture sur une exploitation nécessitent peu de connaissances techniques et peu de travail, contrairement à une unité de méthanisation classique, ce qui est un réel atout de la couverture auprès des porteurs de projets.

Le point restant à vérifier est la rentabilité économique des projets. Il est en effet impératif que la couverture Nénufar apporte une réelle plus-value à l'exploitation. Cette question est traitée dans la partie suivante.

## VI. DANS QUELLE MESURE LES PROJETS NÉNUFAR SONT-ILS RENTABLES ?

Un des objectifs de cette étude est d'évaluer la rentabilité des projets Nénufar tout en déterminant des critères pouvant être utilisés lors de pré-études.

### A) HYPOTHÈSES DE TRAVAIL ET RECUEIL DES DONNÉES

Le nombre de projets Nénufar qu'il est possible d'étudier étant relativement faible, nous avons choisi d'étudier des cas « hypothétiques », basés sur les projets réels.

Dans un premier temps, ce sont effectivement les projets réels qui ont été étudiés, c'est-à-dire des exploitations existantes, présentées dans la partie III, qui ont contacté Nénufar pour une étude de faisabilité. Dans ce cas, les caractéristiques du projet, telles que l'investissement, la dimension des ouvrages, etc, correspondent aux informations transmises par l'exploitant.

Dans un deuxième temps, des projets « hypothétiques » ont été considérés, afin de pouvoir déterminer des critères de rentabilité et évaluer le degré de corrélation entre le volume de la fosse couverte et la rentabilité du projet. En effet, la littérature scientifique montre que pour produire du méthane de manière optimale, l'absence de chauffage peut être compensée par une augmentation du temps de séjour (Cullimore *et al.*, 1985 ; Stevens & Schulte cité dans Safley & Westerman, 1990

et King, 2011 ; Sutter & Wellington cité dans Safley & Westerman, 1990), qui ne peut être possible que si la fosse dispose d'une capacité suffisante par rapport au volume d'effluent traité chaque année. Il pourrait donc exister un volume de stockage minimum garantissant la rentabilité des projets. Pour l'étude de ces projets, certaines caractéristiques des exploitations ont été conservées, telles que la quantité annuelle produite ainsi que la gestion de l'effluent.

Pour l'étude de la corrélation entre la capacité de stockage et la rentabilité des projets, quatre types de projets ont été établis, avec différents volumes de stockage. Leurs caractéristiques sont détaillées dans le tableau 7. L'investissement lié à la couverture Nénufar n'est pas précisé, ces données étant confidentielles.

TYPE DE PROJET : VOLUME DE STOCKAGE	PROFONDEUR DE LA FOSSE	DIAMÈTRE DE LA FOSSE	DIAMÈTRE DE LA COUVERTURE
Projet « réel »	Données spécifiques au projet considéré		
500 m <sup>3</sup>	4 m	12,5 m	12 m
1 000 m <sup>3</sup>		18 m	17 m
1 500 m <sup>3</sup>		22 m	21 m
2 000 m <sup>3</sup>		25 m	24 m

*TABLEAU 7 : CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTS PROJETS CONSIDÉRÉS*

Il convient de souligner que les volumes de stockage considérés ci-dessus ne représentent pas nécessairement la capacité de stockage totale de l'exploitation. En effet, les exploitations agricoles, tout comme les unités de méthanisation, ont pour obligation de disposer d'une capacité de stockage suffisante pour une durée déterminée par la réglementation, variant selon les pratiques d'élevage, mais de minimum 4 mois (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, 2011 ; Sénat, 2017). Les volumes considérés ici correspondent donc uniquement à la capacité d'une fosse équipée d'une couverture Nénufar, en sachant que les exploitations agricoles disposent très souvent de plusieurs fosses de stockage.

## B) LA MÉTHODE DU « TAUX D'ENRICHISSEMENT EN CAPITAL » POUR L'ANALYSE DE LA RENTABILITÉ ÉCONOMIQUE

### 1. LES OBJECTIFS DE RENTABILITÉ

La méthode du « Taux d'Enrichissement en Capital » (TEC), est une méthode d'analyse de la rentabilité économique, particulièrement adaptée à l'étude de projets dans le domaine des énergies renouvelables (Chabot, 2002).

Cette méthode caractérise l'emploi des capitaux investis initialement dans un projet en considérant le « résultat dégagé chaque année par un investissement (avant fiscalité, partage du résultat et remboursement du principal de la dette) » (SOLAGRO *et al.*, 2010).

La méthode utilise différents indicateurs (Chabot, 2002 ; SOLAGRO *et al.*, 2010) :

- La durée d'observation économique, ici de 15 ans ;
- Le taux d'intérêt d'emprunt ;
- Le taux d'inflation, ici supposé constant sur la durée d'observation économique, permettant d'actualiser le taux d'intérêt d'emprunt ainsi que le taux de rémunération des fonds propres ;
- Le taux d'actualisation, correspondant au coût moyen pondéré du capital et rendant ainsi compte de la capacité du projet à valoriser l'investissement réalisé (Chabot, 2002) ;
- Le coefficient d'actualisation, qui permet de calculer les échéances de remboursement d'un prêt (Chabot, 2002) ;
- Le cash flow, ou flux annuel de trésorerie, considéré comme constant sur la durée d'observation ;
- La Valeur Actualisée Nette (VAN), qui correspond à la somme des cash-flows annuels actualisés ;
- Le TEC, égal au rapport de la valeur actualisée nette sur l'investissement. La valeur du TEC renseigne la rentabilité de l'investissement. Un projet est considéré rentable lorsque son TEC est supérieur à 0. Cependant, pour un projet dans le secteur des énergies renouvelables, la limite de rentabilité est fixée à 0,3, afin de prendre en compte les risques associés.

## 2. LES HYPOTHÈSES DE CALCUL

### *a) Les hypothèses communes à tous les projets*

Les hypothèses retenues communes à tous les projets sont indiquées dans le tableau 8.

Les hypothèses prises pour le taux d'inflation ont été choisies à partir des valeurs françaises depuis 2012, comprises entre 0 et 2% (INSEE, 2017).

Les hypothèses considérées pour le taux d'intérêt emprunt nominal ont été choisies en considérant le fait que depuis juin 2012, le taux d'intérêt à long terme en France est inférieur à 2,5% (OCDE, 2017).

INDICATEUR	VALEUR					
Durée d'observation économique	15 ans					
Taux d'inflation	1 %			2 %		
Taux d'intérêt d'emprunt nominal	1 %	2 %	3 %	1 %	2 %	3 %
Taux de rémunération des fonds propres nominal	5 %					
Part de fonds propres	20 %					
Part d'emprunt	80 %					
Taux d'actualisation réel	0,79 %	1,58 %	2,38 %	-0,20 %	0,59 %	1,37 %
Coefficient d'actualisation	0,0710	0,0754	0,0800	0,0656	0,0698	0,0742

*TABLEAU 8 : HYPOTHÈSES COMMUNES À TOUS LES PROJETS*

*b) Les hypothèses concernant la valorisation du biogaz*

Deux types de valorisation sont considérés dans cette étude :

- la conversion du biogaz produit en chaleur, grâce à une chaudière biogaz ayant un rendement de 85% ;
- *Remarque* : l'analyse de rentabilité considère que lorsque les besoins calorifiques de l'exploitation sont plus importants que la production de méthane, celle-ci est entièrement valorisé. De même, lorsque la quantité d'énergie produite est supérieure aux besoins de l'exploitation, celle-ci est considérée autonome en énergie. Dans la réalité, ce ne sera pas toujours le cas, selon la répartition annuelle de la production méthanogène et des besoins en chaleur.
- le renvoi du biogaz produit vers une unité de méthanisation existante, pour une valorisation en électricité et chaleur, avec des rendements respectivement de 44% et 35% (SOLAGRO *et al.*, 2010).

Seule la valorisation par une chaudière biogaz nécessite un investissent supplémentaire à la couverture. Les puissances installées des chaudières considérées dans les différents projets varient de 40 à 240 kW, selon les besoins.

Les hypothèses concernant les annuités, charges et produits pour les différents types de valorisation sont précisées dans le tableau 9.

MODE DE VALORISATION	ANNUITÉS	CHARGES	PRODUITS
Chaleur	Investissements liés : - à la couverture Nénufar ; - à une chaudière biogaz.	- Equipements : maintenance de la chaudière ; - Consommables : électricité, charbon actif ; - Personnel.	Economie liée à la réduction des frais de chauffage et d'épandage
Renvoi sur une unité de méthanisation existante	Investissement lié à la couverture Nénufar	- Consommables : électricité ; - Personnel	Vente d'électricité et économie liée à la réduction des frais d'épandage

*TABLEAU 9 : HYPOTHÈSES D'ANNUITÉS, CHARGES ET PRODUITS SELON LE MODE DE VALORISATION DU BIOGAZ*

### 3. LA RENTABILITÉ ÉCONOMIQUE DES PROJETS NÉNUFAR

L'objectif de rentabilité est fixé à un TEC de 0,5, comme dans le rapport de l'ADEME sur la rentabilité des projets de méthanisation rurale (SOLAGRO *et al.*, 2010). Cette valeur correspond à un temps de retour brut sur investissement de 7 ans, généralement considéré en méthanisation.

Dans un premier temps, la rentabilité des projets est considérée hors subvention. Dans un deuxième temps, des subventions sont prises en compte.

De manière générale, les projets Nénufar sont éligibles à différentes subventions :

- le Plan de Compétitivité et d'Adaptation des Exploitations Agricoles (PCAEA), dont l'objectif est de soutenir la modernisation des élevages, notamment en termes de performances environnementales et énergétiques. Les dépenses éligibles concernent les « investissements d'amélioration des performances énergétiques des exploitations ». Le taux de subvention est plafonné à 40% pour la couverture et le système de valorisation (Chambre d'agriculture des Hauts-de-France, 2017) ;
- l'aide aux investissements matériels en faveur de la qualité de l'air, provenant de fonds de financement pour la transition énergétique du Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer. Cette aide était réservée aux élevages de volailles ou de porcs en IED (FranceAgriMer, 2017), la dernière session ayant eu lieu au printemps 2017. Une exploitation exerçant une activité IED « Elevage intensif » possède plus de 40 000 places de volailles ou plus de 750 emplacements pour les truies ou plus de 2 000 emplacements pour les porcs de plus de 30 kg (INERIS, 2017). L'objectif de cette subvention était de soutenir des projets permettant la réduction des émissions d'ammoniac. Le taux d'aide était de maximum 40%, avec un plafond total des dépenses éligibles de 100 000 €HT par exploitation (FranceAgriMer, 2017) ;

- le Plan Biogaz, lorsque le projet est en Bretagne ou dans les Pays de la Loire et que le biogaz récupéré par la couverture Nénufar est valorisé par un moteur de cogénération. Un critère d'éligibilité est le coefficient de valorisation énergétique :

$$V = (E_{th} + E_{elec}) / (0,97 * E_p)$$

avec :

- $E_{th}$  : l'énergie thermique valorisée autrement que pour la production d'électricité, l'autoconsommation ou la transformation des intrants, exprimée en kWh ;
- $E_{elec}$  : l'énergie électrique produite nette, c'est-à-dire la production d'électricité totale à laquelle la consommation électrique des auxiliaires est retirée, exprimée en kWh ;
- $E_p$  : l'énergie primaire en entrée de centrale, exprimée en kWh.

Si ce coefficient est supérieur ou égal à 50%, le projet peut être subventionné par l'ADEME à hauteur de 30% et bénéficie d'un forfait d'aide de la Région de 60 000 € (AILE, 2017) ;

- l'appel à projet « micro-méthanisation », lancé en 2017 dans le cadre du Plan Biogaz breton. Il concerne les projets valorisant le biogaz grâce à un moteur de cogénération ou une chaudière et dont le coefficient de valorisation énergétique est inférieur à 50%. Si le projet présente d'autres avantages, comme une amélioration de l'autonomie énergétique et fourragère de l'exploitation, il peut bénéficier d'une subvention de maximum 20% pour une valorisation du biogaz par cogénération et 40% pour une valorisation par chaudière (AILE, 2017).

Le taux de subvention est donc généralement plafonné à 40%, même s'il a pu être plus élevé pour certains projets. Afin de pouvoir comparer objectivement les différents cas, un projet Nénufar sera considéré rentable avec subvention, dans la suite de cette étude, lorsque le taux nécessaire pour rentabiliser le projet sera inférieur ou égal à 40%.

Il convient de rappeler que les comparaisons entre les productions théoriques et réelles, réalisées grâce aux données expérimentales de la station de Guernévez, ont permis de déterminer un coefficient de dégradation de la matière organique réfractaire, ou coefficient  $k$ , valant 0,7. Cette valeur est différente du 0,01 indiqué dans la littérature. Cependant, la valeur de 0,7 n'ayant pu être vérifiée que pour un cas, il semble délicat de l'appliquer pour tous les projets.

L'analyse de rentabilité économique a donc été réalisée pour deux quantités de méthane pouvant être potentiellement produites, une obtenue avec un coefficient de 0,01 et l'autre obtenue avec un coefficient de 0,7. La seule exception est la station expérimentale porcine de Guernévez, où seule la valeur de 0,7 a été retenue, puisqu'elle a été vérifiée pour ce projet.

a) La Ferme de Grignon

Dans le cas de la Ferme de Grignon, le maximum de la production de méthane correspond à la fosse hypothétique de 2 000 m<sup>3</sup> et le minimum à celle de 500 m<sup>3</sup>. Pour un coefficient  $k$  valant 0,01, cette production est comprise entre 8 890 m<sup>3</sup> et 20 480 m<sup>3</sup>. Lorsque ce coefficient  $k$  vaut 0,7, elle est comprise entre 16 135 m<sup>3</sup> et 40 515 m<sup>3</sup>.

L'analyse de rentabilité économique affiche un TEC compris entre -0,32 et 1,05 lorsque  $k$  vaut 0,01 et entre 0,47 et 1,86 lorsqu'il est égal 0,7. Le TEC moyen est de 0,5.

Cette analyse montre que :

- dans le cas où le coefficient  $k$  est de 0,01 :
  - ▶ lorsque le taux d'inflation est de 1%, 33% des projets sont rentables sans subvention :
    - pour une capacité de 1 500 m<sup>3</sup> mais avec un taux d'intérêt d'emprunt inférieur à 3% ;
    - pour une capacité de 2 000 m<sup>3</sup> ;
  - ▶ lorsque le taux d'inflation est de 2%, 53% des projets sont rentables sans subvention :
    - pour une capacité de 1 000 m<sup>3</sup> avec un taux d'intérêt d'emprunt inférieur à 3% ;
    - pour les volumes supérieurs ;
      - ➔ Globalement, le projet le plus rentable correspond au cas où les taux d'inflation et d'intérêt d'emprunt valent respectivement 2% et 1%, pour une fosse de 2 000 m<sup>3</sup>. Le TEC est alors de 1,05.
      - Le projet le moins rentable, avec un TEC de -0,32, correspond au cas où les taux d'inflation et d'intérêt d'emprunt valent respectivement 1% et 3%, pour une fosse de 500 m<sup>3</sup>.
      - Le volume minimum de fosse permettant la rentabilité des projets sans subvention est de 1 000 ou 1 500 m<sup>3</sup>, selon les hypothèses de taux d'inflation et d'intérêt d'emprunt.
- dans le cas où le coefficient  $k$  est de 0,7 : tous les projets sont rentables sans subvention, sauf pour une fosse de 500 m<sup>3</sup>, dans le cas où les taux d'inflation et d'intérêt d'emprunt sont respectivement de 1% et 3%.
  - ➔ Globalement, le projet le plus rentable correspond au cas où les taux d'inflation et d'intérêt d'emprunt valent respectivement 2% et 1%, pour une fosse de 1 000 m<sup>3</sup>. Le TEC est alors de 1,86.
  - Le fait que le projet le plus rentable ne corresponde pas au volume de fosse le plus

important s'explique par le fait qu'à partir d'une capacité de stockage de 1 000 m<sup>3</sup>, la production de méthane est suffisante pour que l'exploitation soit autonome en énergie. Or, le biogaz étant valorisé en chaleur, le potentiel de valorisation du biogaz est limité par les besoins de la Ferme de Grignon, qui sont d'environ 220 000 kWh. L'exploitation étant autonome à partir d'une fosse de 1 000 m<sup>3</sup>, cela signifie qu'au delà de cette capacité, plus le volume de la fosse augmente et moins le projet est rentable : l'investissement augmente mais pas les économies liées à la valorisation du biogaz.

Le projet le moins rentable, avec un TEC de 0,47, correspond au cas où les taux d'inflation et d'intérêt d'emprunt valent respectivement 1% et 3%, pour une fosse de 500 m<sup>3</sup>.

Le volume minimum de fosse permettant la rentabilité des projets sans subvention est de 500 m<sup>3</sup>, sauf dans le cas où, comme précisé ci-dessus, les taux d'inflation et d'intérêt d'emprunt valent respectivement 1% et 3%. Le volume minimum est alors de 1 000 m<sup>3</sup>.

La prise en compte d'une subvention permet de rentabiliser 100% des projets, dans le cas où  $k$  vaut 0,7. Lorsque ce coefficient vaut 0,01, 80% des projets sont rentables : tous sauf pour une capacité de 500 m<sup>3</sup>. En effet, dans ce cas le taux de subvention devrait être compris entre 45% et 55%, selon les taux d'inflation et d'intérêt d'emprunt considérés.

Avec une subvention de 40%, le volume minimal de fosse permettant la rentabilité d'un projet est donc de 500 ou 1 000 m<sup>3</sup>, selon les hypothèses considérées.

La rentabilité des projets étudiés varient donc largement selon les hypothèses considérées. Si les conclusions de l'analyse de rentabilité doivent être résumées rapidement, il semble pertinent de retenir 1 000 m<sup>3</sup> comme ordre de grandeur pour le volume minimum permettant la rentabilité des projets.

Afin de déterminer dans quelles conditions les projets peuvent être rentables, avec ou sans subvention, deux composantes de la rentabilité peuvent être étudiées :

- Le coût de l'investissement : il correspond dans cette étude au rapport de l'investissement sur la production annuelle de méthane. L'objectif étant d'obtenir un indicateur facile à calculer et à utiliser, nous avons choisi de ne pas prendre en compte les charges relatives au projet, telles que

la maintenance des équipements ou les consommables. Du fait de la variabilité des charges selon le volume de fosse considéré, la valeur exacte du coût de l'investissement limite, c'est-à-dire la valeur au dessus de laquelle le projet n'est plus rentable, varie selon la capacité de stockage. Le coefficient  $k$  n'a cependant pas une influence significative sur l'intervalle donné. Toutefois, le coût de l'investissement réel varie selon le coefficient  $k$  : pour les différentes valeurs de  $k$ , la quantité de méthane varie, contrairement à l'investissement.

Pour un projet tel que celui de la Ferme de Grignon, ce coût doit être inférieur à une valeur comprise entre 3 et 5 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> sans subvention, et entre 5 et 8 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> pour une subvention de 40%. Or, dans les projets étudiés, considérés sans subvention, le coût de l'investissement est compris entre 4 et 8,5 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> lorsque  $k$  vaut 0,01 et entre 2 et 4,5 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> lorsqu'il vaut 0,7 ;

- Le tarif de l'énergie substituée, ici du propane, indiquant l'économie d'énergie réalisée : ce tarif doit être compris, lorsque le coefficient  $k$  vaut 0,01, entre 0,06 et 0,14 €/kWh sans subvention et entre 0,05 et 0,1 €/kWh avec une subvention de 40%. Lorsque  $k$  vaut 0,7, ce tarif doit être compris entre 0,05 et 0,08 €/kWh sans subvention, et entre 0,03 et 0,06 €/kWh avec une subvention de 40%. La Ferme de Grignon paye actuellement moins de 0,08 €/kWh.

La comparaison des valeurs limites et réelles du coût de l'investissement et du prix de l'énergie explique le fait que certains projets soient rentables, puisque les valeurs réelles recoupent les intervalles limites.

L'étude de la Ferme de Grignon met en évidence le fait que le volume n'est pas la seule caractéristique de la fosse ayant un impact sur la rentabilité des projets : la hauteur ou la profondeur de la fosse est tout aussi importante. En effet, une capacité de stockage de 1 500 m<sup>3</sup> est étudiée dans deux scénarios : dans le projet réel, avec une fosse de 25 m de diamètre pour 3 m de profondeur, et dans l'hypothèse « 1 500 m<sup>3</sup> », où une fosse de 22 m de diamètre pour 4 m de profondeur est considérée.

Pour une capacité de stockage donnée, il est nécessaire de calculer :

- le volume minimal d'effluent devant être présent : ce volume correspond à la hauteur d'effluent nécessaire pour maintenir l'étanchéité au biogaz entre la couverture et le lisier ;
- le volume maximal d'effluent pouvant être présent : la réglementation oblige à conserver une marge de sécurité de 50 cm pour une fosse ouverte et de 25 cm pour une fosse couverte (Chambre d'agriculture des Landes, 2006).

Ces volumes correspondent bien à des hauteurs : plus le diamètre de la fosse sera grand, plus le volume minimal sera grand et plus le volume maximal sera faible. Or, plus le volume d'effluent

présent est faible, plus la quantité de méthane produite est faible. Ces volumes peuvent donc avoir un impact significatif sur la rentabilité des projets : pour la Ferme de Grignon, l'hypothèse « 1 500 m<sup>3</sup> » est plus rentable que le projet réel.

*b) La station expérimentale porcine de Guernévez*

Pour rappel, la station expérimentale n'est pas considérée dans son ensemble. L'équivalent d'un élevage de 30 truies productives est étudié, produisant chaque année un volume total de 500 m<sup>3</sup> de lisiers de truies gestantes, de truies allaitantes, de porcelets post-sevrage et de porcs en engraissement. Du fait de la faible quantité de lisier considérée, l'analyse a été réalisée pour seulement deux volumes de fosse : le volume réel, soit 300 m<sup>3</sup>, et un volume hypothétique de 500 m<sup>3</sup>.

La production de méthane est estimée à 3 925 m<sup>3</sup> pour la fosse de 300 m<sup>3</sup> et à 4 930 m<sup>3</sup> pour celle de 500 m<sup>3</sup>. Pour une chaudière dont le rendement calorifique est de 85%, ces quantités correspondent respectivement à 33 195 kWh et 41 695 kWh thermiques disponibles. Les besoins calorifiques de cet élevage étant estimés à 21 450 kWh, il serait donc complètement autonome.

L'analyse de rentabilité économique indique un TEC compris entre -0,58 et -0,66, avec une moyenne de -0,6. Le projet n'est pas donc rentable sans subvention, malgré le fait que l'exploitation soit autonome en énergie.

La prise en compte d'une subvention de 40% ne permet pas de rentabiliser le projet, puisque selon les hypothèses, le taux de subvention devrait être compris entre 66% et 77%.

Il est impossible de définir une capacité minimum de stockage pour que le projet soit rentable.

Afin de déterminer dans quelles conditions le projet pourrait être rentable, trois composantes de la rentabilité peuvent être étudiées :

- Les besoins en chaleur : l'analyse de rentabilité économique montre qu'en fixant l'investissement initial et le tarif de l'énergie substituée, ces besoins devraient être au minimum de 64 200 kWh pour un projet rentable sans subvention, soit environ trois fois les besoins réels, et de 42 000 kWh, en prenant en compte une subvention de 40%, soit le double des besoins réels.

Il convient de remarquer que l'impossibilité de définir un volume minimum de fosse pour la rentabilité du projet est due à l'insuffisance des besoins en chaleur de l'exploitation ;

- Le coût de l'investissement : l'analyse montre que ce coût doit être inférieur à une valeur comprise entre 3,5 et 4 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> sans subvention, et entre 6 et 6,5 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> avec une subvention de 40%. Or, dans les situations étudiées, considérées sans subvention, le coût de l'investissement est supérieur à 10 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> ;
- Le prix de l'énergie fossile substituée, ici de l'électricité : ce prix devrait être compris entre 0,35 et 0,40 €/kWh, ou entre 0,20 et 0,30 €/kWh si le projet bénéficie d'une subvention de 40%. La station expérimentale de Guernévez bénéficie actuellement d'un tarif inférieur à 0,10 €/kWh.

Il n'est donc pas rentable pour une exploitation aussi petite que celle considérée d'installer une couverture Nénufar, principalement parce que les besoins en chaleur sont insuffisants.

c) La SARL Fertiwatt

Dans le cas de l'unité de méthanisation exploitée par la SARL Fertiwatt, la production de méthane est comprise entre 2 465 et 18 365 m<sup>3</sup> lorsque le coefficient  $k$  vaut 0,01, et pour un  $k$  de 0,7, entre 5 625 et 47 380 m<sup>3</sup>. La production minimum correspond à l'hypothèse d'une fosse de 500 m<sup>3</sup>, et le maximum correspond au projet réel.

Le TEC moyen est de 2,7.

L'analyse de rentabilité économique permet d'obtenir un TEC compris entre -0,04 et 2,91 lorsque le coefficient  $k$  est de 0,01 :

- pour un projet sans subvention et :
  - ▶ un taux d'inflation de 1%, 73% des projets sont rentables :
    - Le projet réel ;
    - Pour une fosse de stockage de 1 000 m<sup>3</sup> et un taux d'intérêt d'emprunt inférieur ou égal à 2% ;
    - Pour des fosses de stockage dont le volume est supérieur ou égal à 1 500 m<sup>3</sup> ;
  - ▶ un taux d'inflation de 2% : 80% des projets sont rentables, à partir du moment où la fosse de stockage a une capacité supérieure ou égale à 1 000 m<sup>3</sup>.
- 100% des projets sont rentables avec une subvention de 40%.

Lorsque le coefficient  $k$  est de 0,7, le TEC est compris 1,32 et 8,83, donc 100% des projets sont rentables sans subventions.

Globalement, le projet le plus rentable est le cas réel. Il semble pertinent de retenir un ordre de grandeur de 1 000 m<sup>3</sup> pour le volume minimum de stockage d'un projet rentable.

Afin de déterminer les conditions dans lesquelles la totalité des projets peut être rentable, avec ou sans subvention, il est intéressant d'étudier :

- Le coût de l'investissement : celui-ci doit être inférieur à une valeur comprise entre 6,5 et 8 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> pour un projet sans subvention et entre 11,5 et 13,5 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> pour un projet avec 40% de subvention.
- Le tarif de rachat de l'électricité produite à partir du biogaz : lorsque  $k$  vaut 0,01, ce tarif doit être compris entre 0,09 et 0,35 €/kWh pour un projet sans subvention et entre 0,05 et 0,2 €/kWh pour un projet avec 40% de subvention. Lorsque  $k$  vaut 0,7, le tarif doit être compris entre 0,03 et 0,15 €/kWh sans subvention, et entre 0,02 et 0,09 €/kWh avec une subvention de 40%.

Le fort taux de rentabilité peut être expliqué par le fait que, pour les projets étudiés, considérés sans subvention, le coût de l'investissement est inférieur à 10,5 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> lorsque le coefficient  $k$  vaut 0,01 et inférieur à 5 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> lorsqu'il vaut 0,7. De plus, la SARL Fertiwatt bénéficie d'un tarif de rachat de l'électricité supérieur à 0,2 €/kWh.

La rentabilité des projets peut également être expliquée par :

- L'importance du potentiel méthanogène du digestat ;
- La quantité annuelle de digestat ainsi que le volume de la fosse de stockage, qui sont significatifs : respectivement 8 600 et 8 000 m<sup>3</sup> ;
- Le fait que la quantité de biogaz pouvant être valorisée n'est pas limitée par le moteur de cogénération ;
- L'investissement, relativement inférieur d'un projet en élevage : pour une unité de méthanisation, l'investissement ne concerne que la couverture Nénufar.

Si cela reste à confirmer, il semble que les projets concernant les fosses de stockage de digestat issu d'unités de méthanisation présentent un fort potentiel.

d) La SCEA de Neuville

Dans le cas de la SCEA de Neuville, la production de méthane est comprise, lorsque le coefficient  $k$  vaut 0,01, entre 3 270 et 9 915 m<sup>3</sup>, et entre 4 880 et 16 015 m<sup>3</sup> lorsqu'il vaut 0,7. Le minimum de production correspond à une fosse de 500 m<sup>3</sup> et le maximum au projet réel.

L'analyse de rentabilité économique affiche un TEC compris entre -0,82 et -0,23 lorsque le coefficient  $k$  vaut 0,01, et entre -0,65 et 0,29 lorsqu'il vaut 0,7. Le TEC moyen est de -0,34. Le projet n'est donc pas rentable sans subvention, peu importe le coefficient  $k$ , la capacité de la fosse ou les hypothèses de taux d'inflation et d'intérêt d'emprunt.

Lorsque le coefficient  $k$  est de 0,01 et en considérant une subvention de maximum 40%, aucun projet n'est rentable. En effet, les taux de subvention permettant de rentabiliser un projet sont compris, toutes hypothèses confondues, entre 49% et 88%.

Lorsque le coefficient  $k$  est à égal 0,7 et en considérant un taux d'inflation de 1%, 40% des projets sont rentables avec subvention :

- le cas réel ;
- pour une fosse de stockage de 1 500 m<sup>3</sup> et un taux d'intérêt d'emprunt inférieur ou égal à 1% ;
- pour une fosse de stockage de 2 000 m<sup>3</sup> et un taux d'intérêt d'emprunt inférieur ou égal à 2%.

Lorsque le taux d'inflation est de 2%, 53% des projets sont rentables avec subvention :

- le cas réel ;
- pour une fosse de stockage de 1 500 m<sup>3</sup> et un taux d'intérêt d'emprunt inférieur ou égal à 2% ;
- pour une fosse de stockage de 2 000 m<sup>3</sup> et un taux d'intérêt d'emprunt inférieur ou égal à 3%.

Globalement, le maximum de rentabilité est atteint pour le projet réel, et le minimum pour une fosse de 500 m<sup>3</sup>. Il semble que le volume minimum pour un projet rentable avec subvention est de 1 500 m<sup>3</sup>. Pour un projet sans subvention, la capacité de stockage devrait être supérieure à celle du projet réel, soit 3 400 m<sup>3</sup>.

Comme précédemment, il est possible de déterminer dans quelles conditions les projets pourraient être rentables, avec ou sans subventions, en étudiant :

- Le coût de l'investissement : il doit être inférieur à une valeur comprise entre 2 et 4 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> sans subvention, et entre 3,5 et 7 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> avec une subvention de 40%. Or, pour les projets étudiés, considérés sans subvention, ce coût de l'investissement est compris entre 9 et 18 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> lorsque le coefficient  $k$  vaut 0,01 et entre 5,5 et 12,5 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> lorsqu'il est égal à 0,7.

- Le tarif de l'énergie substituée, ici du propane : pour un coefficient  $k$  de 0,01, ce tarif doit être compris entre 0,13 et 0,29 €/kWh pour un projet sans subvention et entre 0,08 et 0,19 €/kWh en prenant en compte une subvention de 40%. Pour un  $k$  de 0,7, le tarif doit être compris entre 0,08 et 0,20 €/kWh sans subvention et entre 0,05 et 0,13 €/kWh pour une subvention de 40%. La SCEA de Neuville paye actuellement moins de 0,075 €/kWh.

Les besoins en chaleur ne sont pas étudiés, car même dans le cas réel, où la capacité de stockage est de 3 400 m<sup>3</sup>, l'exploitation n'est pas autonome en énergie.

La comparaison des valeurs limites et réelles du coût de l'investissement et du prix de l'énergie explique le fait que peu de projets soient rentables.

*e) L'EARL de Quistillic*

La production de méthane à partir des lisiers bovins produits par l'EARL de Quistillic est comprise entre 680 et 1 150 m<sup>3</sup> lorsque le coefficient  $k$  vaut 0,01 et entre 1 365 et 2 665 m<sup>3</sup> lorsqu'il vaut 0,7. Le minimum correspond à une fosse hypothétique de 500 m<sup>3</sup> et le maximum à une fosse hypothétique de 2 000 m<sup>3</sup>.

L'analyse de rentabilité économique affiche un TEC compris entre -1,08 et -0,89 lorsque  $k$  vaut 0,01 et entre -0,94 et -0,62 lorsqu'il est égal à 0,7. Le TEC moyen est de -0,89.

Le projet n'est pas rentable sans subvention, peu importe le coefficient  $k$ , la capacité de la fosse ou les hypothèses de taux d'inflation et d'intérêt d'emprunt.

La prise en compte d'une subvention de 40% ne permet pas de rentabiliser les projets, puisque le taux devrait être compris entre 93% et 105% lorsque le coefficient  $k$  vaut 0,01, et entre 74% et 96% lorsqu'il est égal à 0,7.

Le maximum de rentabilité correspond au cas hypothétique d'une fosse de 2 000 m<sup>3</sup>. Le minimum correspond au projet réel. Il est impossible de déterminer un volume de stockage pour lequel le projet serait rentable.

Le manque de rentabilité des projets peut être expliqué par différents éléments :

- Les besoins en chaleur de l'exploitation : ils sont actuellement de 40 500 kWh, mais semblent insuffisants, puisque dans le cas où l'exploitation est autonome en énergie, le TEC est de -0,35. Ce projet n'est donc pas rentable, même avec une subvention de 40%. Pour qu'il le soit, les besoins en chaleur devraient être, sans subvention, de minimum 81 500 kWh, soit le double des

besoins réels. En considérant une subvention de 40%, les besoins en chaleur devraient être au minimum de 52 500 kWh, soit 30% de plus que les besoins réels ;

- Le coût de l'investissement : dans le cas où le coefficient  $k$  vaut 0,01, le coût de l'investissement limite pour assurer la rentabilité du projet est négatif dans les cas réel et hypothétique d'une fosse de 500 m<sup>3</sup>. Cela sous-entend que le porteur de projet devrait être rémunéré pour que le projet soit rentable. Pour les autres projets, le coût de l'investissement doit être inférieur à une valeur comprise entre 1 et 6 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> sans subvention, et entre 1,5 et 10 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> avec une subvention de 40%.

Le manque de rentabilité des projets, considérés sans subvention, est expliqué par le fait que le coût de l'investissement est compris entre 65 et 90 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> lorsque le coefficient  $k$  vaut 0,01 et entre 25 et 45 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> lorsque  $k$  est égal 0,7. L'importance de ce coût peut elle être expliquée par le fait que le lisier de veau est très peu méthanogène.

- Le tarif de l'énergie fossile substituée, ici de l'électricité : selon la capacité de la fosse considérée, ce prix devrait être compris, lorsque le coefficient  $k$  est de 0,01, entre 0,9 €/kWh et 1,5 €/kWh sans subvention, et entre 0,6 €/kWh et 1 €/kWh avec une subvention de 40%. Lorsque  $k$  vaut 0,7, le tarif minimum est compris entre 0,4 €/kWh et 0,8 €/kWh sans subvention, et entre 0,2 €/kWh et 0,5 €/kWh avec une subvention de 40%. L'EARL de Quistillic paye actuellement moins de 0,15 €/kWh.

Comme la Ferme de Grignon, l'EARL de Quistillic met en évidence l'importance des caractéristiques de la fosse : dans le cas réel, la fosse équipée d'une couverture Nénufar est rectangulaire, d'une capacité de 500 m<sup>3</sup>, soit le même volume que l'un des cas hypothétiques. Or, malgré une production de méthane théoriquement plus importante, le projet réel est moins rentable que le cas hypothétique.

#### *f) L'EARL de l'Avenir*

La production de méthane à partir du digestat de l'EARL de l'Avenir est compris entre 3 330 et 9 410 m<sup>3</sup> lorsque le coefficient  $k$  vaut 0,01, et entre 7 935 et 23 055 m<sup>3</sup> lorsque  $k$  est égal à 0,7.

L'analyse de rentabilité économique affiche un TEC compris entre 0,44 et 2,44 lorsque  $k$  vaut 0,01, et pour 0,7, compris entre 2,62 et 7,43. Le TEC moyen est 3,4.

98% des projets sont donc rentables sans subvention : tous sauf dans le cas où le coefficient  $k$  vaut 0,01, pour une capacité de stockage de 500 m<sup>3</sup> et des taux d'inflation et taux d'intérêt d'emprunt respectivement de 1% et 3%. Dans ce cas, le TEC est de 0,44. Un taux de subvention de 4% est alors suffisant pour rentabiliser le projet. Tous les projets sont donc rentables avec subvention.

Il semble donc qu'une capacité de stockage de 500 m<sup>3</sup> soit suffisante pour la rentabilité d'un projet tel que celui de l'EARL de l'Avenir.

Le fort taux de rentabilité peut être expliqué par :

- Le coût de l'investissement : l'analyse de rentabilité montre qu'il doit être inférieur à une valeur comprise entre 7,5 et 9 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> sans subvention et entre 12,5 et 14,5 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> avec une subvention de 40%. Or, le coût de l'investissement des projets considérés est inférieur à 8 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>, ce qui explique le fait que la grande majorité des projets soient rentables sans subvention.
- Le tarif de rachat de l'électricité produite : celui-ci doit être compris entre 0,025 et 0,25 €/kWh sans subvention et entre 0,025 et 0,15 €/kWh avec une subvention de 40%. Or, les caractéristiques de l'unité de méthanisation exploitée par l'EARL de l'Avenir font que le projet bénéficie du tarif de rachat maximum, soit 0,225 €/kWh.

Ce projet semble confirmer la conclusion que les projets liés à des unités de méthanisation présentent un fort potentiel.

#### 4. [CONCLUSION](#)

312 hypothèses ont été étudiées pour évaluer la rentabilité d'une couverture Nénufar sur une exploitation agricole ou une unité de méthanisation. Divers facteurs ont été examinés : le coefficient  $k$ , qui, pour rappel, est affecté à la matière organique réfractaire, le taux d'inflation, le taux d'intérêt d'emprunt et la capacité de stockage de la fosse équipée d'une couverture Nénufar.

Globalement, le TEC est compris entre -1,08 et 8,83, avec une moyenne de 0,86. Dans le cas où le coefficient  $k$  est égal à 0,01, le TEC est compris entre -1,08 et 2,91, pour une moyenne de 0,18. Lorsque  $k$  vaut 0,7, le TEC est compris entre -0,94 et 8,83, pour une moyenne de 1,54.

Il n'est pas surprenant que les projets soient plus rentables lorsque  $k$  vaut 0,7, puisque cette valeur implique une production méthanogène supérieure, donc des économies d'énergie plus importantes. De même, plus le taux d'inflation est élevé, plus le TEC augmente, donc plus les projets sont rentables. Cela est justifié par la définition du taux d'inflation : plus il est élevé, et plus

l'euro perd de sa valeur, donc plus le montant de l'investissement qui doit être remboursé « diminue ». Dans le cas du taux d'intérêt d'emprunt, la situation est évidemment inverse : plus le taux est faible et plus le projet sera rentable.

Les analyses réalisées montrent que la rentabilité est donc extrêmement variable selon les projets. Il semble que l'installation d'une couverture Nénufar soit la plus rentable, par ordre croissant, dans le cas de lisiers de veaux, de porcs, de vaches laitières, et enfin, dans le cas de la couverture d'une fosse de stockage de digestat issu d'une unité de méthanisation.

La prise en compte des subventions permet de faire passer le taux de projets viables de 49% à 60% : de 43% à 55% lorsque le coefficient  $k$  est de 0,01, et de 56% à 64% lorsque  $k$  vaut 0,7.

Si la couverture Nénufar est une solution adaptée pour développer la micro-méthanisation sur les élevages, il existe cependant plusieurs facteurs pouvant affecter la rentabilité des projets :

- La quantité d'effluent valorisable et le potentiel méthanogène associé ;
- La capacité de la fosse de stockage : plus elle augmente et plus le projet est rentable, sauf à partir du moment où l'exploitation est autonome en énergie. Le maximum de rentabilité correspond alors au volume de fosse permettant une production de méthane suffisante pour subvenir à la totalité des besoins en chaleur de l'exploitation.

De plus, les cas de la SARL Fertiwatt et de l'EARL de l'Avenir montrent que si la rentabilité des projets est fortement liée à la dimension de la fosse de stockage couverte, il n'est pas possible de définir un volume minimum pour lequel un projet serait rentable, généralisable à tous les types de projets. Les projets étudiés montrent que des fosses de 500 et 1 000 m<sup>3</sup> seraient suffisantes pour, respectivement, un projet lié à une unité de méthanisation et une exploitation de vaches laitières. Il semble que dans le cas d'un élevage porcin, la capacité de stockage devrait être bien supérieure à 3 000 m<sup>3</sup>. La question demeure pour un élevage de veaux de boucherie. Ces chiffres doivent être confirmés par l'étude de futurs projets.

● *Remarque : il est important de rappeler que les caractéristiques des fosses hypothétiques ont été fixées dans cette étude. Or, pour une capacité donnée, le diamètre et la profondeur de la fosse peuvent varier et auront alors un impact sur la rentabilité des projets.*

- Les besoins en chaleur de l'exploitation : ce facteur est valable lorsque le biogaz est valorisé grâce à une chaudière. En effet, le renvoi du biogaz vers une unité de méthanisation permet de générer un chiffre d'affaire stable lié à la vente d'électricité.

Les projets de la station expérimentale porcine de Guernévez et de l'EARL de Quistillic montrent qu'il existe un besoin minimal en chaleur pour assurer la rentabilité du projet. Sans subvention,

ces besoins sont d'environ 65 000 kWh dans le cas de Guernévez et d'environ 81 500 kWh dans le cas de l'EARL de Quistillic. Ces valeurs ne sont cependant pas généralisables à tous les projets, puisque les besoins en chaleur varient selon le climat et la conception des bâtiments d'élevage.

La question des besoins en chaleur semble particulièrement importante dans le cas des élevages de vaches laitières. Dans le cas de la Ferme de Grignon, le biogaz produit a pu être valorisé grâce à l'existence d'une laiterie consommant de la chaleur pour la pasteurisation du lait. Cependant, tous les élevages laitiers ne font pas de la transformation. Se pose alors la question des possibilités de valorisation du biogaz pour ces projets.

- Le prix de l'énergie fossile substituée : la SCEA de Neuville montre que malgré des besoins importants en chaleur, un projet n'est pas nécessaire rentable. En effet, la rentabilité d'un projet dépend des économies d'énergie réalisées, donc de la quantité de méthane produite et du tarif de l'énergie fossile substituée. Mis à part le cas des unités de méthanisation, où le tarif de rachat de l'énergie produite est subventionné, les tarifs dont bénéficient les exploitations étudiées sont généralement inférieurs au tarif nécessaire pour la rentabilité du projet. De plus, l'évolution du prix de l'énergie est variable selon la forme d'énergie considérée : le prix de l'électricité augmente depuis la fin des années 2000, alors que celui du gaz diminue (Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, 2017). Il est cependant probable que sur le long terme, le prix des énergies fossiles augmente du fait de la transition énergétique.

Il nous semblait également intéressant de déterminer un ou plusieurs critères pouvant être utilisés par l'entreprise lors de la pré-étude d'un nouveau projet. Nous avons considéré trois composantes de la rentabilité : le coût de l'investissement, le tarif de l'énergie fossile substituée et le cas échéant, les besoins en chaleur de l'exploitation.

L'indicateur le plus intéressant semble être le coût de l'investissement, car il permet de renseigner rapidement la rentabilité d'un projet : lors de la pré-étude d'un projet, l'entreprise peut connaître, sans réaliser une analyse économique approfondie et sans retour d'expérience, le degré de rentabilité du projet. Le tableau 10 regroupe les valeurs limites de coût de l'investissement pour tous les différents types d'exploitation. Ces valeurs servent de référence pour le projet étudié, le tableau fonctionne de la manière suivante :

- Le projet peut être, par exemple, une unité de méthanisation dont le principal intrant est du fumier bovin ;

- Dans un premier temps, il s'agit de calculer le coût de l'investissement « réel » du projet, en faisant le rapport de l'investissement total, tenant compte, le cas échéant, d'une subvention, sur la production estimée de méthane ;
- Dans un deuxième temps, il faut comparer ce coût de l'investissement « réel » à la valeur indiquée dans le tableau : pour un projet sans subvention, ce coût doit être inférieur à 6,5 €/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> pour que le projet soit considéré rentable.

Il serait intéressant d'affiner et de compléter ce tableau avec les données de futurs projets.

TYPE D'EXPLOITATION	COÛT DE L'INVESTISSEMENT (€/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ) - SANS SUBVENTION	COÛT DE L'INVESTISSEMENT (€/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ) - SUBVENTION DE 40%
Unité de méthanisation - fumier bovin	entre 6,5 et 8	entre 11 et 13,5
Unité de méthanisation - lisier de canard	entre 7,5 et 9	entre 12,5 et 14
Elevage porcin - naisseur	entre 2 et 4	entre 3,5 et 7
Elevage porcin naisseur engraisseur	entre 3,5 et 4	entre 6 et 6,5
Elevage bovin - vaches laitières	entre 3 et 5	entre 5 et 8
Elevage bovin - veaux de boucherie	entre 1 et 6	entre 1,5 et 10

*TABLEAU 10 : COÛT DE L'INVESTISSEMENT POUR DIFFÉRENTS TYPES DE PROJETS*

## VII. CONCLUSION ET LIMITES : LES AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA COUVERTURE NÉNUFAR

L'objectif de cette étude était d'évaluer la valeur ajoutée qu'une couverture Nénufar peut apporter à une exploitation agricole ou une unité de méthanisation. La notion de valeur ajoutée correspond au fait que la couverture présente des avantages pour l'exploitation, devant être plus significatifs que les inconvénients.

Pour cela, les trois piliers de la durabilité ont été considérés : l'environnement, le social et l'économique.

Tout d'abord, un modèle de production de méthane, décrit dans la littérature scientifique, a été utilisé afin d'estimer la quantité de méthane pouvant être potentiellement être produite au sein d'une fosse de stockage. Si le modèle semblait théoriquement cohérent, il était important de pouvoir le confronter à des données expérimentales, étant utilisé tout au long de cette étude.

La comparaison aux données de la station expérimentale porcine de Guernévez montre que le modèle, tel qu'il est décrit dans la littérature, sous-estime la quantité de méthane produite dans une fosse de stockage. Cette conclusion rejoint celles d'autres études (Park *et al.*, 2006 ; Miller *et al.*,

2013 ; Baldé *et al.*, 2016). Cependant, si l'on affecte la valeur de 0,7 au coefficient de dégradation de la matière organique réfractaire, plutôt que le 0,01 indiqué dans la littérature, les résultats obtenus sont très proches de la réalité. Toutefois, ce 0,7 n'est vérifié que pour la station expérimentale de Guernévez. Dans la suite de cette étude, deux valeurs possibles du coefficient sont donc considérées.

Le modèle a permis d'étudier l'impact environnemental d'une couverture Nénufar, en considérant les émissions de GES évitées grâce à la récupération et la valorisation du méthane produit. Les résultats montrent que le bilan des émissions de GES d'une exploitation agricole peut être considérablement réduit grâce à la couverture.

Concernant les problématiques sociétales, la couverture Nénufar se semble pas provoquer de changements significatifs dans la gestion de l'exploitation. Les projets sont réalisées rapidement, avec des démarches administratives relativement simples. Des modifications peuvent être apportées à la gestion de l'effluent, celui-ci devant être transféré dans la fosse le plus régulièrement possible, afin de maximiser la production de méthane. Concernant l'image de l'exploitation, la couverture présente l'avantage de diminuer les odeurs liées au stockage des lisiers.

Sur le plan économique, l'analyse réalisée grâce à la méthode du taux d'enrichissement en capital montre une rentabilité très variable :

- les projets consistant à couvrir une fosse de stockage de digestat et valorisant le biogaz produit sur l'unité de méthanisation présentent un fort potentiel. Les hautes valeurs du TEC peuvent être expliquées, premièrement, par le tarif de rachat de l'électricité produite à partir du biogaz. En effet, les unités de méthanisation bénéficient d'un tarif subventionné par l'Etat, donc supérieur à la réalité du marché. Deuxièmement, ces projets nécessitent un investissement relativement moindre par rapport aux élevages, la partie « valorisation » existant déjà ;
- les projets sur les exploitations de vaches laitières présentent également un potentiel intéressant. Il se pose cependant la question de la valorisation du biogaz. En effet, sauf en cas de transformation laitière, les besoins en chaleur de ces exploitations ne sont pas suffisants pour justifier un tel investissement. Certaines pourront produire une quantité de méthane permettant l'utilisation d'un moteur de cogénération, mais peu de solutions techniques existent pour les autres. Plusieurs projets de recherche travaillent actuellement sur le biogaz porté, consistant à associer différents sites de production sur un même point d'injection, qui correspondrait aux caractéristiques d'un projet Nénufar ;

- les projets sur les élevages porcins présentent une rentabilité mitigée. La capacité de stockage nécessaire pour un projet rentable semble être très élevée ;
- le cas des élevages de veaux de boucherie semble être très délicat : le potentiel méthanogène des lisiers ne semble pas suffisant pour permettre la rentabilité des projets.

Le critère le plus intéressant pour évaluer rapidement la rentabilité d'un projet est le coût de l'investissement. Le tableau 10 présenté en conclusion de la partie VI. devrait être complété avec des données des futurs projets.

S'il est évident que la technologie développée par l'entreprise Nénufar présente de nombreux avantages pour les exploitations, il est important que les projets apportent une véritable plus-value aux agriculteurs.

Les projets pris en compte durant cette étude ont permis d'apporter des réponses à la problématique posée. Cependant, du fait de la diversité des exploitations agricoles françaises, les résultats exposés ne pourront être significatifs que s'ils sont confirmés par un plus grand nombre de projets.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K., Gruber, L. (2007). Biogas production from maize and dairy cattle manure - Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118(1), 173-182.
- Ashare, E., Wentworth, R. L., & Wise, D. L. (1979). Fuel gas production from animal residue part II. an economic assessment. *Resource Recovery and Conservation*, 3(4), 359-386.
- Baldé, H., VanderZaad, A. C., Burt, S., Evans, L., Wagner-Riddle, C., Desjardins, R. L., Douglas MacDonald, J. (2016). Measured versus modeled methane emissions from separated liquid dairy manure show large model underestimates. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 230, 261-270.
- Béline, F., Peu, P., Dabert, P., Trémier, A., Le Guen, G., Damiano, A. La méthanisation en milieu rural et ses perspectives de développement en France. *Sciences eaux et territoires*, 2013, 12, 6-12.
- Briand, P. (2014). Je voudrais couvrir ma fosse à lisier ! *Terra*, n°429, p.32.
- Chabot, B. *La méthode TEC d'analyse économique des projets énergétiques - Partie 1 : présentation générale*. DESS, 2002, 26 p.
- Chambre d'agriculture des Landes. (2006). Bien stocker le lisier avec une fosse couverte. Je préserve l'eau, Chambre d'agriculture des Landes, Mont de Marsan. 2 p.
- Charpiot, A., Dupré, J.-Y. *La méthanisation dans la filière laitière*. Compte-rendu n°00 12 33 011. France, 2012, 52p.
- CITEPA. Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la Convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques et du Protocole de Kyoto. Paris, CITEPA, 2016, 527 p.
- Clavreul, J., Guyonnet, D., Christien, T. H. (2012). Quantifying uncertainty in LCA-modelling of waste management systems. *Waste Management*, 32(12), 2482-2495.
- Commissariat général au développement durable. Chiffres clés de l'énergie - Édition 2015. Paris (FR), Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, 2016. 48 p.
- Commissariat général au développement durable. Tableau de bord : biogaz. Quatrième trimestre 2016. Paris, Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, 2017, 8p.
- Conrad, R., Klose, M., & Claus, P. (2002) Pathway of CH<sub>4</sub> formation in anoxic rice field soil and rice roots determined by <sup>13</sup>C-stable isotope fractionation. *Chemosphere*, 47(8), 797-806.
- Cullimore, D. R., Maule, A., & Mansuy, N. (1985). Ambient temperature methanogenesis from pig manure waste lagoons: thermal gradient incubator studies. *Agricultural wastes*, 12(2), 147-157.

- Dabert, P., Béline, F., Lendormi, T. *Projet PROMETHIS - Optimisation de la méthanisation des lisiers porcins à basse température. Aspects microbiologiques*. Rapport de recherche. (2015).
- Doublet, S., Leclerc, B., Couturier, C., Berger, S. Qualité agronomique et sanitaire des digestats issus de méthanisation. ADEME, Solagro, 2004, 250 p.
- Dux, D., Van Caenegem, L., Steiner, B., Kaufmann, R. Efficacité des coûts des couvertures des réservoirs à lisier. Ettenhausen (CH) : Agroscope FAT Tänikon, 2005. 12 p. Rapport FAT n°642.
- EDEN & Ecoserveis. Généralisation de la couverture étanche des fosses à lisier avec valorisation du biogaz produit en France et Catalogne. France : EDEN ; Espagne : Ecoserveis, 2000.
- Elsgaard, L., Olsen, A. B., & Petersen, S. O. (2016). Temperature response of methane production in liquid manures and co-digestates. *Science of the Total Environment*, 539, 78-84.
- Fédération des producteurs de porcs du Québec. Les couvertures sur les fosses à lisier. Plan des interventions agroenvironnementales de la FPPQ, Fédération des producteurs de porcs du Québec, Longueuil. 2007.
- Garcia, J. L., Patel, B. K., & Ollivier, B. (2000). Taxonomic, phylogenetic, and ecological diversity of methanogenic Archaea. *Anaerobe*, 6(4), 205-226.
- GIE Elevages de Bretagne, Chambres d'agriculture de Bretagne. La couverture des fosses. Rennes (FR) : GIE Elevages de Bretagne, 2014.
- GIEC. Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre - Volume 4 Agriculture, foresterie et autres affectations des terres. Japon, IGES, 2006.
- Giroux, M., & Audesse, P. (2004). Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote totale et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrais de ferme. *Agrosol*, 15(2), 107-110.
- Godin, J. J. (2015). Aspects biochimiques et microbiologiques de la méthanisation. Chapitre 2. In : René Moletta, dir., *La méthanisation* (p.12-37). Paris, FRA : Editions Tec & Doc Lavoisier.
- Hjorth, M., Cocolo, G., Jonassen, K., Abildgaard, L. & Sommer, S. G. (2015). Continuous in-house acidification affecting animal slurry composition. *Biosystems Engineering*, 132, 56-60.
- International Panel on Climate Change. *Climate Change - The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, 1990, 365 p.
- King, S. (2011). In-Storage Psychrophilic Anaerobic Digestion of Swine Manure. Doctor of Philosophy, Department of Bioresource Engineering - Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, McGill University, Ste-Anne-de-Bellevue, Canada, 196 p.
- Kotsyurbenko, O. R. (2005). Trophic interactions in the methanogenic microbial community of low-temperature terrestrial ecosystems. *FEMS microbiology ecology*, 53(1), 3-13.

- Llabrés-Luengo, P. L., & Mata-Alvarez, J. (1987). Kinetic study of the anaerobic digestion of straw-pig manure mixtures. *Biomass*, 14(2), 129-142.
- Lübken, M., Gehring, T., Wichern, M. (2010). Microbiological fermentation of lignocellulosic biomass: current state of prospects of mathematical modeling. *Applied microbiology and biotechnology*, 85(6), 1643-1652.
- Miller, S. M., Wofsy, S., Michalak, A. M., Kort, E. A., Andrews, A. E., Biraud, S. C., Dlugokencky, E. J., Eluszkiewicz, J., Fischer, M. L., Janssens-Maenhout, G., Miller, B. R., Miller, J. B., Montzka, S. A., Nehrkorn, T., Sweeney, C. (2013). Anthropogenic emissions of methane in the United States. *Proceedings of National Academy of Sciences*, 110(50), 20018-20022.
- Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement. *Arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en oeuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole*. Journal Officiel de la République Française n°0295 du 21 décembre 2011, p.21556.
- Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer. Chiffres clés de l'énergie - Édition 2016. Paris (FR), Service de l'observation et des statistiques (SOEs), 2017. 72 p.
- Nohra, J. A., Barrington, S., Frigon, J. C., & Guiot, S. R. (2003). In storage psychrophilic anaerobic digestion of swine slurry. *Resources, conservation and recycling*, 38(1), 23-27.
- Park, K. H., Thompson, A. G., Marinier, M., Clark, K., & Wagner-Riddle, C. (2006). Greenhouse gas emissions from stored liquid swine manure in a cold climate. *Atmospheric environment*, 40(4), 618-627.
- Petersen, S. O., Olsen, A. B., Elsgaard, L., Triolo, J. M., & Sommer, S. G. (2016). Estimation of Methane Emissions from Slurry Pits below Pig and Cattle Confinements. *PLoS one*, 11(8), e01600968.
- Petersen, S. O., Sommer, S. G., Béline, F., Burton, C., Dach, J., Dourmad, J. Y., Leip, A., Misselbrook, T., Nicholson, F., Poulsen, H. D., Provolò, G., Sørensen, P., Vinnerås, B., Weiske, A., Bernal, M.-P., Böhm, R., Juhász, C., Mihelic, R. (2007). Recycling of livestock manure in a whole-farm perspective. *Livestock science*, 112(3), 180-191.
- Pigeon, S. Guides des technologies de traitement de lisiers de porcs. Fédération des producteurs de porcs du Québec, Québec, 2010.
- Quideau, P. Méthanier du lisier frais. *TechPorc*. Novembre-Décembre 2012, n°8, 28-30.
- Quideau, P., Morvan, T., Guiziou, F., Daumer, M.-L., Pourcher, A.-M., Béline, F. Les effets et conséquences de la méthanisation sur la matière organique et l'azote des lisiers de porc. *Sciences eaux et territoires*, 2013,12, 66-70.

- Raven, P. H., Johnson, G. B., Mason, K. A., Losos, J. B., Singer, S. R. (2011). *Biologie*, 2ème édition. De Boeck, Bruxelles, 1369 p.
- Risberg, K., Cederlund, H., Pell, M., Arthurs, V., Schnürer, A. (2017). Comparative characterization of digestive versus pig slurry and cow manure - Chemical composition and effects on soil microbial activity. *Waste Management*, 61, 529-538.
- Safley, L. M., & Westerman, P. W. (1989). Anaerobic Lagoon Biogas Recovery Systems. *Biological wastes*, 27(1), 43-62.
- Safley, L. M., & Westerman, P. W. (1990). Psychrophilic anaerobic digestion of animal manure: proposed design methodology. *Biological wastes*, 34(2), 133-148.
- SOLAGRO, EREP, PSPC, SOGREA, PERI G. *Expertise de la rentabilité des projets de méthanisation rurale*. ADEME, 2010, 130 p.
- Sommer, S. G., Petersen, S. O., & Møller, H. B. (2004). Algorithms for calculating methane and nitrous oxide emissions from manure management. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 69(2), 143-154.
- Tong, X., Smith, L. H., McCarty, P. L. (1990). Methane fermentation of selected lignocellulosic materials. *Biomass*, 21(4), 239-255.
- U.S. Environmental Protection Agency. *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2014*. USA : U.S Environmental Protection Agency, 2016.
- Weiske, A., Vabitsch, A., Olesen, J. E., Schelde, K., Michel, J., Friedrich, R., & Kaltschmitt, M. (2006). Mitigation of greenhouse gas emissions in European conventional and organic dairy farming. *Agriculture, ecosystems & environment*, 112(2), 221-232.

## **SITOGRAFIE**

- ADEME. *Bilans GES - Centre de ressources sur les bilans de gaz à effet de serre [en ligne]*. (Mise à jour en 2017). Disponible sur : <<http://www.bilans-ges.ademe.fr>>. (Consulté le 10/09/2017).
- AILE, Les aides à l'investissement. **In** : *AILE initiatives énergies environnement [en ligne]*. (Mise à jour en 2017). Disponible sur : <<https://www.aile.asso.fr/index.php/biogaz/plan-biogaz/les-aides-a-linvestissement/?lang=fr>>. (Consulté le 20/07/2017).
- Chambres d'agriculture de Bretagne, La station expérimentale porcine de Guernévez. **In** : *Bienvenue sur le portail des Chambres d'agriculture de Bretagne [en ligne]*. (Mise à jour en

- 2017). Disponible sur : <<http://www.chambre-agriculture-finistere.fr/synagri/station-porcine-de-guernevez>>. (Consulté le 25/07/2017).
- Chambres d'agriculture des Hauts-de-France. *Plan de compétitivité et d'adaptation des exploitations agricoles (Pcae)*. **In** : Chambres d'agriculture Hauts-de-France **[en ligne]**. (Mis à jour en 2017). Disponible sur : <<http://www.hautsdefrance.chambres-agriculture.fr/techniques-productions/elevage/pcae/>>. (Consulté le 09/03/2017).
- Commission européenne, Paquet sur le climat et l'énergie à l'horizon 2020. **In** : *European Commission* **[en ligne]**. (Mise à jour en 2017). Disponible sur : <[https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_fr](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_fr)>. (Consulté le 06/09/2017).
- FranceAgriMer. *Aide aux investissements matériels dans les exploitations agricoles en faveur de la qualité de l'air (MEE)*. **In** : FranceAgriMer **[en ligne]**. (Site mis à jour en 2017). Disponible sur : <<http://www.franceagrimer.fr/filiere-viandes/Viandes-blanches/Aides/Aide-aux-investissements-materiels-dans-les-exploitations-agricoles-en-faveur-de-la-qualite-de-l-air-MEEM>>. (Consulté le 09/03/2017).
- INERIS, 3660. Elevage intensif. **In** : *AIDA - La réglementation de la prévention des risques et de la protection de l'environnement* **[en ligne]**. (Mise à jour en 2017). Disponible sur : <[http://www.ineris.fr/aida/consultation\\_document/25172](http://www.ineris.fr/aida/consultation_document/25172)>. (Consulté le 25/07/2017).
- INSEE, Taux d'inflation en 2016. **In** : *Institut national de la statistique et des études économiques - Mesurer pour comprendre* **[en ligne]**. (Mise à jour en 2017). Disponible sur : <<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2122401#tableau-Donnes>>. (Consulté le 25/07/2017).
- Météo-Bretagne, Observations météo à Quimper-Pluguffan. **In** : *Meteo-Bretagne* **[en ligne]**. (Mise à jour en 2017). Disponible sur : <<http://www.meteo-bretagne.fr/observations-station-meteo-Quimper-Pluguffan/>>. (Consulté le 22/05/2017).
- OCDE, Taux d'intérêt d'emprunt à long terme. **In** : *OCDE - Des politiques meilleures pour une vie meilleure* **[en ligne]**. (Mise à jour en 2017). Disponible sur : <<https://data.oecd.org/fr/interest/taux-d-interet-a-long-terme.htm#indicator-chart>>. (Consulté le 25/07/2017).
- Sénat, Réglementation du stockage sur site des digestats issus de la méthanisation agricole. **In** : *Sénat - Un site au service des citoyens* **[en ligne]**. (Mise à jour en 2017). Disponible sur : <<https://www.senat.fr/questions/base/2014/qSEQ140210554.html>>. (Consulté le 25/07/2017).

## ANNEXES



## ANNEXE I : LA RÉACTION DE MÉTHANISATION

La méthanisation correspond à la transformation, en condition anaérobie, du carbone organique en dioxyde de carbone et en méthane. Cette réaction est assurée par des archées méthanogènes, anaérobies strictes, produisant du méthane dans le cadre de leur métabolisme énergétique. En 2000, 83 espèces d'archées méthanogènes avaient été décrites et divisées en trois catégories nutritionnelles (Garcia *et al.*, 2000) :

- (a) 56 espèces hydrogénotrophes utilisent le dihydrogène (H<sub>2</sub>) pour réduire le dioxyde de carbone, dont 35 espèces formatotrophes oxydant le formate pour former du méthane ;
- (b) 19 espèces méthylotrophes utilisent des composés méthylés tels que le méthanol, les méthylamines ou le méthyldisulfure, dont 13 espèces méthylotrophes obligatoires ;
- (c) 8 espèces acétoclastes, ou acétotrophes, utilisent l'acétate pour produire du méthane, dont 2 espèces acétotrophes obligatoires.

Un grand nombre d'espèces possèdent plusieurs caractéristiques nutritionnelles et n'appartiennent donc pas à une unique classe. Par exemple, deux espèces méthanogènes sont hydrogéo-méthylotrophes.

Le fait que la plupart des archées méthanogènes soient placées dans trois groupes nutritionnels peut être expliqué par le fait que la réaction la plus favorable thermodynamiquement est la réduction du dioxyde de carbone par le dihydrogène. La moins favorable est la réaction acétoclaste. La sélection naturelle a donc abouti à l'évolution de beaucoup plus d'espèces hydrogénotrophes que d'acétotrophes (Garcia *et al.*, 2000).

Dans les environnements naturels anaérobies, qui contiennent de la matière organique complexe et où la lumière, les sulfates et les nitrates sont disponibles en quantités limitées, les archées méthanogènes sont liées à des bactéries chimiohétérotrophes pour dégrader les substrats organiques (Garcia *et al.*, 2000). Les environnements terrestres méthanogènes pouvant être caractérisés par l'absence d'accepteurs d'électrons inorganiques autre que le bicarbonate (Kotsyurbenko, 2005), la communauté microbienne méthanogène est alors composée de différentes familles de micro-organismes, interdépendantes les unes des autres et constituant un réseau trophique : les substrats des uns sont les rejets des autres (Kotsyurbenko, 2005 ; Dabert *et al.*, 2015).

La réaction totale de la méthanisation est la suivante (Godon, 2015) :



Cette réaction est divisée en plusieurs étapes, chaque étape étant réalisée par des bactéries spécifiques (Garcia *et al.*, 2000).

- L'hydrolyse de polymères par des microorganismes hydrolitiques

Cette première étape permet l'hydrolyse des polymères organiques, tels que les polysaccharides, les lipides, les protéines ou les acides nucléiques, en monomères, tels que les acides gras, les acides aminés ou les monosaccharides, avec majoritairement du glucose (Godon, 2015).

Ce réaction peut traiter différents substrats. Un exemple est la cellulose, un polysaccharide de structure présent dans les résidus végétaux. Cette molécule est constituée de monomères de  $\beta$ -glucose, liés par des liaisons fortes  $\beta(1-4)$ , aboutissant à une molécule non ramifiée, très résistante. Un autre exemple est l'amidon, un polysaccharide de réserve, composé de molécules d' $\alpha$ -glucose liées par liaisons glycosidiques  $\alpha(1-4)$  ou  $\alpha(1-6)$ . Si les deux polymères sont chimiquement similaires, les liaisons  $\alpha$  sont facilement dégradables alors que peu de micro-organismes sont capables de détruire les liaisons  $\beta$ , d'où la résistance de la cellulose (Raven *et al.*, 2011). La dégradation de cette molécule est donc relativement lente, comparée à celle de l'amidon (Kotsyurbenko, 2005).

La vitesse de la réaction d'hydrolyse peut donc être variable. Elle sera, dans tous les cas, bien inférieure à celle de la réaction suivante : l'acidogénèse (Godon, 2015). L'hydrolyse est donc généralement considérée comme l'étape limitante dans la dégradation de la matière organique (Kotsyurbenko, 2005 ; King, 2011 ; Dabert *et al.*, 2015).

- L'acidogénèse de monomères organiques par des bactéries fermentatives

Pendant l'étape d'acidogénèse, les monomères issus de l'étape d'hydrolyse sont transformés en :

- acides gras volatils (AGV), avec principalement des acides acétique, propanoïque, butyrique (Kotsyurbenko, 2005) ;
- alcools, comme l'éthanol ;

- acides organiques, comme l'acide lactique ;
- hydrogène ;
- dioxyde de carbone (Godon, 2015).

Les deux premières réactions, l'hydrolyse et l'acidogénèse, sont réalisées par des bactéries anaérobies strictes ou facultatives appartenant aux genres *Clostridium*, à la famille des *Enterobacteriaceae* ou aux genres *Bacteroides* et *Bacillus* (Dabert *et al.*, 2015).

- L'acétogénèse des métabolites de la fermentation par des bactéries homoacétogènes ou syntrophiques

L'acétogénèse transforme les composés produits lors des étapes précédentes en précurseurs de méthane, c'est-à-dire l'acétate, l'hydrogène et le CO<sub>2</sub>.

Il existe deux voies d'acétogénèse (Godon, 2015) :

- (1) La voie hétérofermentaire, qui conduit également à la production d'hydrogène, de dioxyde de carbone et d'acides tels que le pyruvate, le butanoate, le propionate ;
- (2) La voie homoacétogène, produisant exclusivement de l'acétate.

Les microorganismes impliqués dans la réaction d'acétogénèse sont des bactéries homoacétogènes et acétogènes productrices obligées d'hydrogène (OPHA), qui transforment les AGV en acétate, dihydrogène et dioxyde de carbone (Dabert *et al.*, 2015).

La faisabilité de ces réactions est fortement liée à la concentration en hydrogène, qui doit être présent en faible quantité. Pour cela, le dihydrogène est consommé par les archées méthanogènes lors de la méthanogénèse (Godon, 2015 ; Dabert *et al.*, 2015). Il existe donc une relation syntrophique entre les méthanogènes hydrogénotrophes et les bactéries acétogènes (Hattori, 2008, cité dans Dabert *et al.*, 2015).

- La méthanogénèse par des archées méthanogènes

La méthanogénèse est l'étape finale d'un processus au cours duquel la matière organique est entièrement dégradée pour la production de dioxyde de carbone, la forme de carbone la plus oxydée, et de méthane, la forme de carbone la plus réduite (Garcia *et al.*, 2000). Les produits de l'acétogénèse, tels que l'acétate, le dioxyde de carbone ou l'hydrogène, sont transformés en méthane.

Deux voies peuvent être distinguées :

- (1) La transformation du dioxyde de carbone et de l'hydrogène ;
- (2) La transformation de l'acétate et de l'hydrogène (Godon, 2015), représentant 85% du méthane produit en conditions psychrophiles (Conrad *et al.*, 2002).

Les archées méthanogènes sont divisées en cinq ordres, selon leur phylogénie et leurs propriétés phénotypiques : *Methanobacteriales*, *Methanococcales*, *Methanomicrobiales*, *Methanosarcinales* et *Methanopyrales* (Garcia *et al.*, 2000).

Ces ordres sont ensuite divisés en différents genres, variant selon le substrat utilisé, leur température optimale ainsi que l'habitat qu'ils occupent (tableau I.1). La littérature rend peu compte de méthanogènes psychrophiles (Dabert *et al.*, 2015).

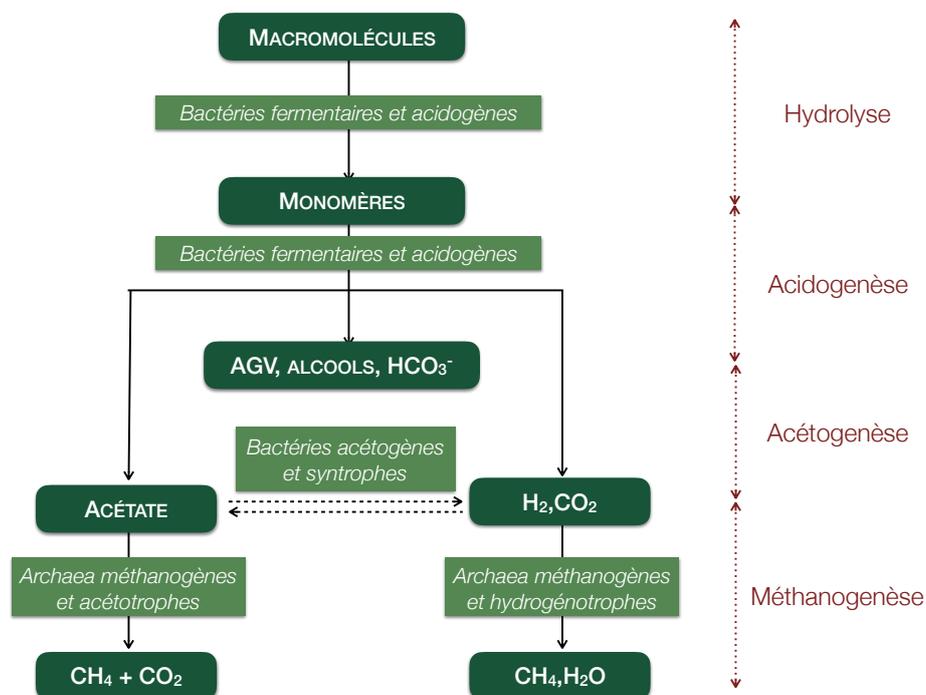
ORDRE	FAMILLE (GENRE)	SUBSTRAT UTILISÉ	TEMPÉRATURE OPTIMALE (°C)	HABITAT OCCUPÉ
Methanobacteriales	Methanobacteriaceae (Methanobacterium ; Methanobrevibacter ; etc)	H <sub>2</sub> , formate	37-45	Digesteurs anaérobies, marécages, rumens, tractus intestinal
	Methanothermaceae (Methanothermus ; Methanococcus)	H <sub>2</sub> , formate	35-88	Sources chaudes, sédiments marins
	Methanococcaceae (Methanococcus)	H <sub>2</sub> , formate	60-65	Sources géothermales marines
Methanococcales	Methanocaldococcaceae (Methanocaldococcus, Methanoterris)	H <sub>2</sub>	80-88	Sources géothermales marines
Methanomicrobiales	Methanomicrobiaceae (Methanomicrobium ; Methanogenium ; etc)	H <sub>2</sub> , formate	15-57	Rizières, digesteurs anaérobies, sédiments
	Methanospirillaceae (Methanospirillum)	H <sub>2</sub> , formate	30-37	Digesteurs anaérobies, sédiments marins
	Methanocorpusculaceae (Methanocorpusculum)	H <sub>2</sub> , formate	30-40	Digesteurs anaérobies, eau douce, sédiments
Methanosarcinales	Methanosarcinaceae (Methanosarcina, etc)	Acétate, H <sub>2</sub>	35-60	Digesteurs anaérobies, eau douce, sédiments, rumen
	Methanosaetaceae (Methanosaeta)	Acétate	35-60	Digesteurs anaérobies, eau douce, sédiments
Methanopyrales	Methanopyraceae (Methanopyrus)	H <sub>2</sub>	98	Sources géothermales marines

**TABLEAU I.1 : FAMILLES MÉTHANOGÈNES SELON LES SUBSTRATS UTILISÉS POUR LA MÉTHANOGENÈSE ET LES NICHES ÉCOLOGIQUES OCCUPÉES (D'APRÈS DABERT ET AL., 2015)**

Du fait de leurs besoins en substrats bien spécifiques, les archées méthanogènes ne peuvent pas se développer sans être trophiquement liées aux bactéries des étapes précédentes. Mais ces archées ont également leur importance, puisque la consommation des produits des réactions précédentes permet d'en réguler la vitesse.

La communauté anaérobie est donc un système biologique équilibré par les interactions ayant lieu entre les différents groupes de microorganismes constitutifs. Cette communauté est capable de choisir différentes voies de fermentation et de fonctionner en auto-régulation, afin de maintenir des valeurs de pH et de potentiel oxydoréducteur optimales (Kotsyurbenko, 2005).

Le processus de dégradation de la matière organique en conditions anaérobies est résumé dans la figure I.1.

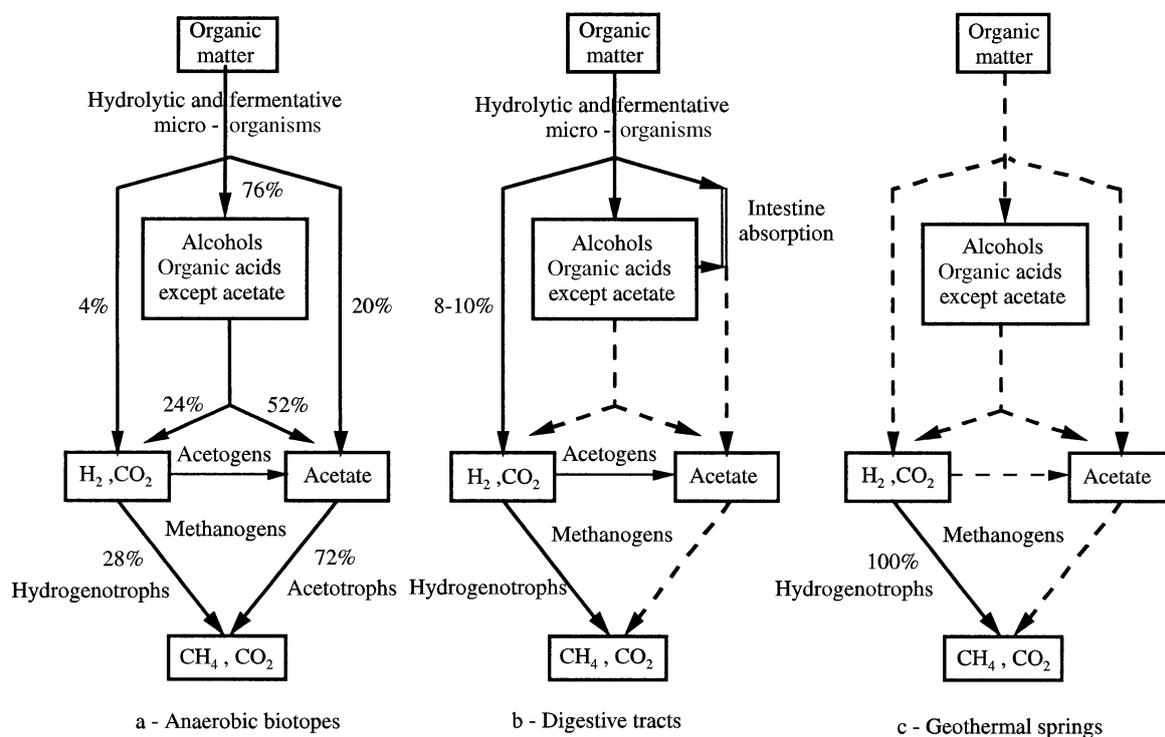


**FIGURE I.1 : REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE DE LA DÉGRADATION ANAÉROBIE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE (D'APRÈS DABERT ET AL., 2015)**

La littérature montre que différentes espèces de microorganismes sont impliquées dans la méthanogenèse et que celles intervenant dans la réaction globale de méthanisation peuvent varier selon l'habitat et les conditions physico-chimiques du milieu, telles que la température, le pH, la pression osmotique et la composition du substrats. La méthanisation peut avoir lieu dans un intervalle de température compris entre 4 et 110°C, et pour un pH compris, généralement, en 6 et 8.

Il est possible de distinguer trois types d'écosystèmes méthanogènes dans la nature (figure I.2) (Garcia *et al.*, 2000) :

- (1) Les biotopes anaérobies comme les sédiments lacustres et marins, les marais, les effluents d'élevage et les digesteurs, où la matière organique est entièrement dégradée ;
- (2) L'appareil digestif des ruminants, des humains, des insectes, etc, où les produits intermédiaires formés, tels que les AGV, sont absorbés et utilisés pour la nutrition de l'individu ;
- (3) Dans les sources géothermiques, où aucune matière organique n'est présente. La méthanogène a lieu grâce à l'hydrogène provenant des processus géologiques.



**FIGURE I.2 :** REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES DIFFÉRENTS TYPES D'ÉCOSYSTÈMES MÉTHANOGENÈS NATURELS (GARCIA ET AL., 2000)

Il est également possible de définir cinq catégories de microorganismes suivant l'intervalle de température caractéristique de leur fonctionnement (Prescott *et al.*, 2010) :

- Les **psychrophiles**, dont la température optimale pour leur fonctionnement est inférieure ou égale à 10°C, avec une température maximale de 15°C. Ces espèces se développent bien à 0°C. Elles se sont adaptées à des environnements à basse température en modifiant, notamment, leurs enzymes et la composition lipidique de leurs membranes, riches en acides gras insaturés, permettant de conserver une membrane semi-fluide ;

- Les **psychrotrophes** ou psychrophiles facultatifs peuvent vivre entre 0 et 7°C, avec une température optimale entre 20 et 30°C et une température maximale de 35°C ;
- Les **mésophiles** ont une température optimale entre 20 et 45°C, une température minimale entre 15 et 20°C et température maximale égale à 45°C ou moins. Cette catégorie concerne la majorité des microorganismes ;
- Les **thermophiles** peuvent se développer à des températures supérieures ou égales à 55°C. Leur température minimale se situe autour de 45°C avec un optimum de croissance entre 55 et 65°C. Elles sont capables de survivre à de hautes températures grâce à des enzymes et systèmes de synthèse beaucoup plus stable à la chaleur que les mésophiles ;
- Les **hyperthermophiles** ont une température optimale entre 80 et 113°C.

Pour la méthanisation, trois intervalles de température sont généralement considérés (Dabert *et al.*, 2015) :

- psychrophile : inférieure à 20°C ;
- mésophile : de 20 à 45°C ;
- thermophile : de 45 à 65°C.

La température du milieu est très importante, provoquant des changements dans la structure cellulaire des microorganismes. De plus, contrairement à d'autres facteurs environnementaux, la température ne peut pas être régulée par la communauté méthanogène. Cela signifie que selon la réponse des différentes espèces microbiologiques aux variations de température, la structure de la communauté méthanogène, et donc son fonctionnement, sera modifiée (Kotsyurbenko, 2005).

Cette étude considère la méthanisation ayant lieu en conditions psychrophiles, dans les lisiers et digestats stockés au sein de fosses de stockage.



## ANNEXE II : DIFFÉRENTS MODÈLES POUR L'ESTIMATION DE LA PRODUCTION DE MÉTHANE

Il existe plusieurs types de modèles pour l'estimation de la production de méthane à partir d'effluents d'élevage, en conditions psychrophiles.

Certains modèles considèrent que l'étape limitante de la réaction est suffisante pour décrire l'intégralité du process. D'autres prennent en compte certaines caractéristiques des substrats, telles que leur forme ou leur taille. L'hypothèse est alors que la dégradation d'une particule par une bactérie est réalisée à une vitesse par unité de surface constante. Un autre exemple est le « Anaerobic Digestion Model No. 1 », aussi appelé ADM1, créée en 1997. Ce modèle considère plusieurs étapes biochimiques et processus physiques, et requiert un nombre important de paramètres en entrée du modèle (Lübken *et al.*, 2010). Toutefois, une thèse réalisée au Canada sur un système similaire à la couverture Nénufar montre que les prédictions du modèle ADM1 ne sont pas représentatives de la réalité (King, 2011).

Les différents modèles ont évolué avec la qualité et la quantité de données disponibles, et la recherche permet encore des avancées sur ces problématiques (Lübken *et al.*, 2010).

Dans le cas de la production de méthane sur les exploitations agricoles, l'angle d'approche est souvent la quantification des GES émis afin d'évaluer l'impact environnemental du système de production. Par exemple, le GIEC a publié en 2006 des lignes directrices pour les inventaires nationaux de GES, où une méthodologie est proposée pour le calcul des émissions de méthane liées à la gestion et au stockage des effluents d'élevage (GIEC, 2006).

Le niveau 2 de cette méthode permet de calculer un « facteur d'émissions de méthane » ( $FE_{CH_4}$ ), dont la formule est précisée ci-dessous (figure II.1).

**FIGURE II.1 : EQUATION DE CALCUL DU FE CH4 (GIEC, 2006)**

**ÉQUATION 10.23**  
**FACTEUR D'ÉMISSIONS DE CH<sub>4</sub> DUES A LA GESTION DU FUMIER**

$$FE_{(T)} = (SV_{(T)} \cdot 365) \cdot \left[ B_{o(T)} \cdot 0,67 \text{ kg} / \text{m}^3 \cdot \sum_{S,k} \frac{FCM_{S,k}}{100} \cdot GF_{(T,S,k)} \right]$$

Où :

- $FE_{(T)}$  = facteur d'émissions de CH<sub>4</sub> de la catégorie de bétail  $T$ , kg CH<sub>4</sub> animal<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>
- $SV_{(T)}$  = solides volatils quotidiennement excrétés par la catégorie de bétail  $T$ , kg matière sèche animal<sup>-1</sup> jour<sup>-1</sup>
- 365 = base du calcul annuel de production de SV, jours an<sup>-1</sup>
- $B_{o(T)}$  = capacité maximum de production de méthane pour le fumier produit par la catégorie de bétail  $T$ , m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> de SV excrétés
- 0,67 = facteur de conversion de m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> en kilogrammes de CH<sub>4</sub>
- $FCM_{(S,k)}$  = facteurs de conversion du méthane pour le système de gestion du fumier  $S$  par région climatique  $k$ , %
- $GF_{(T,S,k)}$  = fraction de fumier de la catégorie de bétail  $T$  traitée à l'aide du système de gestion du fumier  $S$  dans la région climatique  $k$ , non dimensionnel

Cette formule tient compte d'un facteur de conversion du méthane (FCM), lui-même variable selon le « système de gestion du fumier », avec par exemple le pâturage, le stockage solide, le liquide/lisier, etc, et la « région climatique » avec des climats « froid », « tempéré » ou « chaud ».

La méthode du GIEC a été critiquée justement par rapport à ce FCM. En effet, cette méthodologie a une résolution géographique relativement faible, l'Europe étant divisée en seulement deux catégories, l'Europe de l'Ouest et l'Europe de l'Est (GIEC, 2006), alors que le climat y est fortement variable et que la réaction de méthanisation est connue pour être sensible aux facteurs environnementaux (Cullimore *et al.*, 1985 ; Llabrés-Luengo & Mata-Alvarez, 1987 ; Safley & Westerman, 1990 ; Sommer *et al.*, 2004 ; Park *et al.*, 2006 ; EDEN & Ecoserveis, 2000 ; King, 2011 ; Elsgaard *et al.*, 2016 ; Petersen *et al.*, 2016). Des études montrent que ces facteurs ne sont pas représentatifs de la réalité, et donc que les quantités de méthane théoriquement émises sont éloignées de la réalité (Park *et al.*, 2006 ; Baldé *et al.*, 2016). La notice fournit des valeurs pour chaque région, mais les pays ont également la possibilité d'utiliser leurs propres données en justifiant et documentant leur démarche (GIEC, 2006).

Les Etats-Unis ont choisit de développer leur propre méthode, basée sur celle du GIEC, mais spécifique aux systèmes liquides américains. Pour les fosses anaérobies et autres systèmes liquides, l'approche tient compte du climat en se basant sur la loi de van't Hoff-Arrhenius, afin d'estimer des facteurs de conversion du CH<sub>4</sub> en considérant les variations annuelles de température et le temps de rétention (U.S. Environmental Protection Agency, 2016). L'équation de ce facteur est en figure II.2 (Safley & Westerman, 1990).

$$f = \exp \left[ \frac{E(T_2 - T_1)}{RT_1T_2} \right]$$

avec :

- f : le facteur de van't Hoff Arrhenius, correspondant à la quantité de matière sèche volatile biologiquement disponible pour la conversion en méthane
- T<sub>1</sub> = 303,15 K
- T<sub>2</sub> : la température extérieure (K) pour la zone considérée
- E : l'énergie d'activation (E<sub>a</sub>) = 15,175 cal/mol
- R : la constante des gaz parfaits = 1,987 cal/K mol

**FIGURE II.2 : LOI DE VAN'T HOFF-ARRHENIUS (D'APRÈS SAFLEY & WESTERMAN, 1990)**

Cette méthode est également basée sur la quantité de MO apportée (U.S. Environmental Protection Agency, 2016), qui constitue le substrat initial de la réaction de méthanisation : la quantité apportée aura une influence sur la quantité de méthane produite.

Le principe est de calculer la quantité de MO disponible dans la fosse pour la méthanisation, et de corriger cette valeur tous les mois avec la quantité apportée et celle ayant été consommée pour la méthanisation (U.S. Environmental Protection Agency, 2016).

Des chercheurs de l'université de Guelph, Canada, ont repris les méthodes du GIEC et de l'U.S. Environmental Protection Agency afin de comparer des flux de méthane et de protoxyde d'azote calculés à des flux mesurés. De ces deux méthodes, l'américaine semble être la plus adaptée.

Les auteurs montrent que les FCM fournis par la méthode du GIEC ne sont pas représentatifs et donc que les quantités de méthane théoriquement émises sont incorrectes. Les résultats obtenus avec la méthode de l'agence environnementale américaine sont satisfaisants. Les auteurs préconisent, cependant, d'utiliser la température du lisier plutôt que la température extérieure.

Au final, une différence demeure entre les quantités de méthane émises théoriques et calculées. Selon eux, cette différence est due aux facteurs qui n'ont pas été considérés dans l'étude en question, comme les caractéristiques du lisier (pH, concentration en  $\text{NH}_4^+$ ), la gestion de la fosse (agitation, pompage) et l'impact de la formation d'une couche de glace à la surface du lisier. De plus, la méthode américaine n'est pas adaptée au report de MO d'un mois à l'autre, puisque les quantités de méthane théoriquement émises sont supérieures à la réalité. D'après les chercheurs, cela implique que même si la MO non consommée s'accumule dans la fosse, sa consommation n'est pas nécessairement reportée aux mois suivants (Park *et al.*, 2006).

Baldé *et al.* (2016) ont obtenu les mêmes conclusions dans leur étude.

D'autres études sont basées sur les variations de MO disponible à la méthanisation. Le modèle décrit par Sommer *et al.* (2004), utilisé dans cette étude, considère également que la variable principale pour l'émission de méthane est la quantité de MO. Ils distinguent, cependant, la MO dégradable ( $\text{MO}_d$ ) de la MO non-dégradable ou réfractaire ( $\text{MO}_{nd}$ ), les deux formes ne se dégradant pas à la même vitesse.

La dépendance à la température est, encore une fois, exprimée par un facteur, calculé à partir de la loi van't Hoff-Arrhenius. La formule est la suivante :

$$F(T) = MO_d \times b_1 \times \exp[ \ln(A) - E_a \times (1/RT) ] + MO_{nd} \times b_2 \times \exp[ \ln(A) - E_a \times (1/RT) ]$$

avec :

- F(T) : le taux d'émission du méthane (en g CH<sub>4</sub>/j)
- b<sub>1</sub> et b<sub>2</sub> : des facteurs de correction (sans dimension)
- A : le paramètre d'Arrhenius (en g CH<sub>4</sub>/kg MO/h)
- E<sub>a</sub> (en J/mol)
- R : la constante des gaz parfaits
- T : la température (en K)

Les facteurs b<sub>1</sub> et b<sub>2</sub> sont liés au fait que la MO<sub>d</sub> et la MO<sub>nd</sub> ne sont pas dégradées à la même vitesse, la dégradation de la MO<sub>nd</sub> étant 100 fois plus lente que celle de la MO<sub>d</sub>, du fait d'un fort taux de lignine (Tong *et al.*, 1990). De manière générale, les matières organiques peuvent être divisées en plusieurs catégories biochimiques, dont la biodégradabilité en conditions anaérobies varie (Lübken *et al.*, 2010) :

- Les glucides, avec :
  - Des sucres simples, comme l'amidon, qui sont facilement dégradables ;
  - Des sucres ayant une structure plus complexe, contenant de la pectine, de l'hemicellulose ou de la cellulose ;
- Les protéines, généralement facilement dégradables ;
- Les lipides, moyennement difficile à dégrader, dont la biodégradabilité varie en fonction de la longueur de la chaîne d'acides gras et de leur saturation ;
- La lignine, qui ne peut pas être dégradée par fermentation.

La température utilisée dans cette étude est la température extérieure. Les chercheurs justifient ce choix par l'étude de Gabriel *et al.* (2002, cité dans Sommer *et al.*, 2004), en opposition avec les conclusions de Park *et al.* (2006).

Les articles de Petersen *et al.* (2016) et d'Elsgaard *et al.* (2016) poursuivent ces réflexions. Les recherches précédentes avaient utilisé des données de différents travaux afin de définir une relation entre la digestion anaérobie et la température, ne permettant donc pas d'évaluer l'impact

des caractéristiques des effluents étudiés sur la production de méthane (Safley & Westerman, 1990 ; Sommer *et al.*, 2004).

L'objectif de l'étude réalisée par Elsgaard *et al.* (2016) était de déterminer dans quelle mesure la production de méthane dépendait de la température pour du lisier de porc, du lisier de bovin et du digestat provenant d'une unité de méthanisation thermophile.

Les caractéristiques mesurées pour les effluents sont :

- l'âge ;
- le pourcentage d'azote ammoniacal dans l'azote.
- le taux de MS ;
- le pourcentage de MO dans la MS ;

Dans des études précédemment réalisées sur la relation entre la température et la réaction de méthanisation (Safley & Westerman, 1990 ; Wood *et al.*, 2012 cité dans Elsgaard *et al.*, 2016), l'équation de la figure II.2 avait été utilisée, avec une valeur pour l'énergie d'activation ( $E_a$ ) de 63 kJ/mol. Cette valeur est basée sur des études menées à partir de déchets majoritairement agricoles (Ashare *et al.*, 1979). Dans Elsgaard *et al.* (2016), l' $E_a$  a une valeur à 81,0 kJ/mol, représentant la dépendance de la production de méthane à la température. De plus, cette valeur, valable pour un intervalle de température de 5 à 37°C (Elsgaard *et al.*, 2016) est cohérente avec les résultats de l'étude réalisée par Yvon-Durocher *et al.* (2014, cité dans Elsgaard *et al.*, 2016), ce qui indique une certaine robustesse dans cette estimation.

Dans leur étude, Petersen *et al.* (2016) s'intéressent à deux paramètres : la  $MO_d$  et le facteur de fréquence d'Arrhenius,  $\ln(A)$ , tous deux dans la formule du taux d'émission de méthane.

$$F(T) = (MO_d + 0,01 \times MO_{nd}) \times \exp[ \ln(A) - E_a \times (1/RT) ]$$

avec :

- $F(T)$  : le taux d'émission du méthane (en mg  $CH_4$ /h)
- $MO_d$  : la portion dégradable de la MO (en kg)
- $MO_{nd}$  : la portion non-dégradable de la MO (en kg)
- $\ln(A)$  : le paramètre d'Arrhenius (en mg  $CH_4$ /kg MO/h)
- $E_a = 81$  kJ/mol
- $R$  : la constante des gaz parfaits = 8,314 J/K/mol
- $T$  : la température (en K)

Comme dans Sommer *et al.* (2004), le modèle assume que la dégradation de la  $MO_{nd}$  est 100 fois plus lente que la dégradation de la  $MO_d$ . La valeur de l' $E_a$  utilisée est celle de l'étude réalisée Elsgaard *et al.* (2016).

Concernant la  $MO_d$ , les chercheurs ont utilisé des lisiers ayant déjà subis une dégradation au moment de la collecte, ce qui signifie que les valeurs de  $MO_d$  déterminées dans l'étude de Sommer *et al.* (2004) pour du lisier frais ne pouvaient pas être utilisées. De nouvelles valeurs ont été calculées pour cette étude (tableau II.1).

VALEURS DE $MO_d$ SELON LE LISIER ET L'ORIGINE ANIMALE	LISIER FRAIS : SOMMER ET AL. (2004)	LISIER DÉGRADÉ : PETERSEN ET AL. (2016)
Lisier de porc	0,89 kg $MO_d$ /kg MO	0,51 kg $MO_d$ /kg MO
Lisier de bovin	0,46 kg $MO_d$ /kg MO	0,33 kg $MO_d$ /kg MO

**TABLEAU II.1 : VALEURS DE  $MO_d$  POUR DIFFÉRENTS LISIERS**

Ces valeurs suggèrent qu'une dégradation significative de la  $MO_d$  a eu lieu pendant le temps de stockage. De plus, l'étude montre que le paramètre  $MO_d$  est peu sensible aux estimations, donc que son utilisation nécessite peu de précision et que les valeurs de la littérature peuvent être utilisées pour la modélisation.

Quant au paramètre d'Arrhenius  $\ln(A)$ , il reflète l'influence des paramètres biologiques et chimiques du lisier, tels que le type d'animal, l'âge du lisier et le niveau d'adaptation de la communauté méthanogène, sur le potentiel de production de méthane (Petersen *et al.*, 2016). L'étude menée par Elsgaard *et al.* (2016) avait permis de montrer que la valeur de  $\ln(A)$  est spécifique à un lisier particulier, ce que confirme l'étude de Petersen *et al.* (2016).

En effet, contrairement à la valeur de  $MO_d$ , le paramètre  $\ln(A)$  est très sensible aux variations, ce qui implique qu'il devrait être déterminé expérimentalement pour tous les lisiers étudiés (Petersen *et al.*, 2016).

Cependant, la détermination de  $\ln(A)$  étant complexe, il est possible d'utiliser les valeurs de la littérature, en tenant compte des incertitudes (tableau II.2) (Petersen, communication personnelle).

TYPE DE SUBSTRAT		VALEUR MOYENNE	INTERVALLE DE CONFIANCE À 95%
Lisier frais (Sommer et al., 2004)	Porc	31,1	29,5 - 32,6
	Bovin	33,3	31,2 - 35,4
Lisier dégradé (Petersen et al., 2016)	Porc	31,3	31,0 - 31,7
	Bovin	31,2	30,7 - 31,8
Digestat frais (Sommer et al., 2004)		30,1	27,3 - 32,9
Digestat dégradé (Sommer et al., 2004)		30,6	25,5 - 35,8

**TABLEAU II.2 : VALEURS DE  $LN(A)$  (EN  $gCH_4/kgMO/h$ ) POUR DIFFÉRENTS SUBSTRATS**

Un autre paramètre important est la décomposition de la  $MO_d$ . En effet, lorsque du carbone est émis du fait de la dégradation de la  $MO_d$ , il est émis sous forme de méthane et de dioxyde de carbone. Or, le ratio  $CH_4/CO_2$  dépend de plusieurs facteurs, dont les conditions de stockage.

Dans le cas du lisier de porc, 5 à 15% du carbone est émis sous forme de  $CH_4$ , et 85 à 95% sous forme de  $CO_2$ . Dans le cas du lisier de bovin, 5 à 35% du carbone est émis sous forme de  $CH_4$ , et 65 à 85% sous forme de  $CO_2$ . Les pertes de carbone sous forme de  $CO_2$  peuvent donc être considérables, et doivent être prises en compte afin d'estimer la dégradation de la  $MO_d$  (Petersen *et al.*, 2016).

Il est possible d'estimer la dégradation de la  $MO_d$  et de la  $MO_{nd}$ , à partir de la production de méthane  $F$ , en utilisant (Petersen, communication personnelle) :

- la température du lisier, qui peut être estimée à partir de la température extérieure (Park *et al.*, 2006) ;
- le taux de carbone dans la  $MO$ , qui, pour du lisier bovin ou porcin, est égal à 0,51 (Giroux & Audesse, 2004) ;
- un ratio  $CH_4/CO_2$  : dans le cas d'une couverture de fosse étanche, il est possible d'utiliser un ratio  $CH_4/CO_2$  de 60/40 (Petersen, communication personnelle).

La production de biogaz sera, dans les tous cas, variable au cours de l'année, puisque le niveau de remplissage des fosses, tout comme la température extérieure varient en fonction du temps. Or les deux facteurs ayant un impact sur la production de méthane sont la température du lisier et la quantité de  $MO$  apportée (Safley & Westerman, 1989 ; Husted *et al.*, 1994 cité dans Sommer *et al.*, 2004).

Les différentes étapes du modèle utilisé sont décrites en Annexe III.



## ANNEXE III : CALCULS UTILISÉS POUR ESTIMER LA PRODUCTION DE MÉTHANE

L'objectif de ce modèle est :

- d'estimer le potentiel méthanogène du lisier ou digestat considéré (figure III.1) ;
- d'estimer la dégradation ayant eu lieu dans la fosse avant la pose de la couverture Nénufar (figure III.2) ;
- d'estimer la production de méthane potentielle annuelle pour la fosse couverte (figure III.3).

Une partie des valeurs utilisées doivent être indiquées dans la feuille « BMP », et sont ensuite automatiquement reportées dans les feuilles suivantes. Il faut :

- entrer les valeurs de MS et de MO ;
- choisir des valeurs :
  - hautes et basses pour  $\ln(A)$ , qui correspondent, dans le cas :
    - ➔ des lisiers bovin et porcin aux intervalles de confiance donnés dans la littérature (tableau II.2)
    - ➔ du digestat, aux moyennes pour du digestat frais et du digestat stocké (tableau II.2). Ces valeurs ont été choisies pour le digestat, car des essais du modèle ont montré que les intervalles de confiance à 95% des digestats frais et dégradé étaient trop importants, conduisant à des intervalles de production bien trop étendus.
  - la valeur de MO dégradable pour du lisier de porc, ou de bovin ou pour du digestat (tableau II.1).

### I. LES CALCULS

La méthode de calcul est similaire pour l'ensemble du fichier, avec des variations concernant les températures, les temps de séjour et les quantités de lisier considérées.

Les calculs présentes ci-dessous considère le cas d'une fosse de stockage initialement vide.

La première étape est de calculer, pour le lisier ou digestat considéré, le taux de  $MO_d$  dans la matière brute, en  $kg\ MO_d/m^3\ MB$ .

Le point de départ est le taux de MS (%). Dans une analyse de lisier, la MS est donnée en % ou en mg/L, avec  $1\% = 10\ 000\ mg/L$  et sachant que la masse volumique d'un lisier est équivalente à celle de l'eau, donc  $m_{v, \text{lisier}} = 1000\ kg/m^3$  (Pigeon, 2010). Cela permet d'obtenir la MS en  $kg\ MS/m^3\ MB$  :

$$MS(kg\ MS/m^3\ MB) = 10 \times MS(\%)$$

Le taux de MO, en %MS, est ensuite utilisé pour déterminer la quantité de MO en kg MO/m<sup>3</sup> MB :

$$\text{MO}(\text{kg MO/m}^3 \text{ MB}) = \text{MO}(\%) \times \text{MS}(\text{kg MS/m}^3 \text{ MB})$$

Le tableau II.1 donne des valeurs pour le taux de MO dégradable par kg de MO (kg MO<sub>d</sub>/kg MO), ce qui permet de déterminer la quantité de MO dégradable par m<sup>3</sup> de MB de lisier ajouté dans la fosse (kg MO<sub>d</sub>/m<sup>3</sup> MB) :

$$\text{MO}_{d,\text{initiale}}(\text{kg MO}_d/\text{m}^3 \text{ MB}) = \text{MO}_d(\text{kg MO}_d/\text{kg MO}) \times \text{MO}(\text{kg MO/m}^3 \text{ MB})$$

La quantité de MO réfractaire (MO<sub>nd</sub>) peut alors être déduite :

$$\text{MO}_{nd,\text{initiale}}(\text{kg MO}_d/\text{m}^3 \text{ MB}) = \text{MO}(\text{kg MO/m}^3 \text{ MB}) - \text{MO}_{d,\text{initiale}}(\text{kg MO}_d/\text{m}^3 \text{ MB})$$

Ces valeurs serviront à calculer, pour le premier mois, les quantités de MO<sub>d,initiale</sub> et MO<sub>nd,initiale</sub> ajoutées dans la fosse :

$$\text{MO}_d(\text{kg}) = V_{\text{lisier,ajouté}}(\text{m}^3 \text{ MB}) \times \text{MO}_{d,\text{initiale}}(\text{kg MO}_d/\text{m}^3 \text{ MB})$$

La formule est similaire pour la MO<sub>nd</sub>.

Pour les mois suivants, les valeurs de la MO<sub>d,initiale</sub>(kg MO<sub>d</sub>/m<sup>3</sup> MB) et de la MO<sub>nd,initiale</sub>(kg MO<sub>d</sub>/m<sup>3</sup> MB) sont corrigées en fonction des quantités de MO<sub>d</sub>(kg) et de MO<sub>nd</sub>(kg) ayant été dégradées pour la production de méthane et par le volume de lisier dans la fosse.

Pour cela, la quantité de MO<sub>d,n</sub>(kg) au mois *n* est calculée :

$$\text{MO}_{d,n}(\text{kg}) = [ \text{MO}_{d,n-1}(\text{kg}) - \text{MO}_{d,\text{dégradée},n-1}(\text{kg}) ] + [ V_{\text{lisier,ajouté},n} \times \text{MO}_{d,\text{initiale}}(\text{kg MO}_d/\text{m}^3 \text{ MB}) ] - [ V_{\text{lisier,épandu},n} \times \text{MO}_{d,n-1}(\text{kg MO}_d/\text{m}^3 \text{ MB}) ]$$

avec V<sub>lisier</sub> le volume de lisier considéré en m<sup>3</sup>.

Le lisier épanché est donc associé à la quantité de MO<sub>d</sub> du mois *n-1*, puisque, ayant été stocké dans la fosse pendant une durée indéterminée, sa quantité de matière organique facilement dégradable a déjà été en partie consommée par la communauté méthanogène.

La formule est similaire pour MO<sub>nd</sub>.

La quantité de  $MO_d$  dans la fosse au mois  $n$  peut alors être calculée :

$$MO_{d,n}(\text{kg } MO_d/\text{m}^3 \text{ MB}) = MO_{d,n}(\text{kg}) \div V_{\text{lisier, fosse}}(\text{m}^3 \text{ MB})$$

La formule est similaire pour  $MO_{nd}$ .

Une fois que les quantités de  $MO_d$  et  $MO_{nd}$  sont connues, il est possible de calculer la production de méthane à partir de la  $MO_d$ , appelée  $F_d(T)$ , et celle à partir de la  $MO_{nd}$ , appelée  $F_{nd}(T)$ , exprimées en  $\text{kgCH}_4/\text{mois}$ .

Les calculs sont réalisés de manière à obtenir un intervalle pour la quantité de méthane produite, basé sur l'intervalle de confiance de  $\ln(A)$ . Un intervalle comprenant une « valeur basse » et une « valeur haute » sera donc obtenu. Les formules sont les mêmes dans les deux cas, seule la valeur de  $\ln(A)$  varie.

La formule générale pour  $F_d(T)$  au mois  $n$  est :

$$F_{d,n}(T) = MO_{d,n} \times \exp [ \ln(A) - (E/RT_n) ] \times 24$$

avec :

- ▶  $F_{d,n}(T)$  en  $\text{gCH}_4/\text{j}$  ;
- ▶  $MO_{d,n}$  en  $\text{kg}$  ;
- ▶  $\ln(A)$  en  $\text{gCH}_4/\text{kgMO}/\text{h}$ , dont la valeur est choisie grâce au tableau II.2 ;
- ▶  $E$ , l'énergie d'activation, est égale à  $81\,000 \text{ J/mol}$  (Elsgaard *et al.*, 2016) ;
- ▶  $R$ , la constante des gaz parfait, est égale à  $8,314 \text{ J/K/mol}$  ;
- ▶  $T_n$ , la température du lisier en Kelvin pour le mois  $n$  (Park *et al.*, 2006) ;
- ▶ 24 : le nombre d'heures dans une journée.

Pour obtenir  $F_{nd,n}(T)$ , la formule est similaire, avec un facteur 0,01, puisque la  $MO_{nd}$  est dégradée 100 fois plus lentement que la  $MO_d$  (Sommer *et al.*, 2004) :

$$F_{nd,n}(T) = 0,01 \times MO_{nd,n} \times \exp [ \ln(A) - (E/RT_n) ] \times 24$$

Pour obtenir la production totale de méthane,  $F(T)$ , en  $\text{kgCH}_4/\text{mois}$ , le calcul est le suivant :

$$F(T)(\text{kgCH}_4/\text{mois}) = \text{nombre de jours} \times [ F_d(T)(\text{kgCH}_4/\text{j}) + F_{nd}(T)(\text{kgCH}_4/\text{j}) ]$$

La formule permettant d'obtenir la production totale de méthane,  $F(T)$ , en  $m^3CH_4/mois$ , en sachant que la masse volumique de méthane est de  $0,656 \text{ kg}/m^3$ , est égale à :

$$F(T)(m^3CH_4/mois) = F(T)(kgCH_4/mois) \div 0,656$$

Pour obtenir le potentiel annuel, il faut sommer tous les  $F(T)(m^3CH_4/mois)$ .

La dernière étape consiste à calculer les quantités de  $MO_d$  et de  $MO_{nd}$  dégradées en  $CH_4$  et de  $CO_2$ . Les formules étant similaires pour  $MO_d$  et  $MO_{nd}$ , le cas de la  $MO_d$  peut être considéré.

Les éléments considérés pour calculer la quantité de  $MO_d$  dégradée pour la production de méthane sont : le ratio  $CH_4/(CH_4+CO_2)$ , qui est de 0,6 en conditions anaérobies, appelé % $CH_4$ , et le pourcentage de carbone dans la MO, appelé TOC/MO, qui est de 0,51 (Giroux & Audesse, 2004).

La formule est est (Petersen, communication personnelle) :

$$MO_{d,dégradée,n,CH_4}(kg) = [ 12 \div 16 ] \times F_{d,n}(T)(kgCH_4/mois) \times [ 1 \div \%CH_4 ] \times [ 1 \div TOC/MO ]$$

Le rapport  $12 \div 16$  correspond au rapport de la masse molaire du carbone sur la masse molaire du méthane.

Ensuite, connaissant le ratio  $CH_4/(CH_4+CO_2)$ , il est possible de calculer la quantité de  $MO_d$  dégradée pour la production de  $CO_2$ , :

$$MO_{d,dégradée,n,CO_2}(kg) = (2/3) \times MO_{d,dégradée,n,CH_4}(kg)$$

Il faut ensuite faire les sommes de la  $MO_d$  et de la  $MO_{nd}$  dégradées, qui seront prise en compte dans les calculs pour le mois suivant.

## II. LES APPLICATIONS

### A) L'ESTIMATION DU POTENTIEL MÉTHANOGENÈ D'UN EFFLUENT

La première feuille du document, intitulée « BMP » (figure III.1), a pour objectif d'estimer le potentiel méthanogène du lisier considéré.

Dans cette feuille,  $1 \text{ m}^3$  de substrat, conservé à  $37^\circ\text{C}$  pendant 30 jours, est considéré.

## B) L'ESTIMATION DE LA DÉGRADATION D'UN SUBSTRAT DANS UNE FOSSE DE STOCKAGE

Les calculs présentés précédemment considéraient une fosse vide. Or, au moment où la couverture est installée, la fosse de stockage ne peut pas être vide, car une certaine quantité d'effluent est nécessaire afin de créer l'étanchéité au biogaz entre la couverture et l'effluent. Ce substrat peut être présent depuis plusieurs mois, les périodes d'épandage, donc de vidange de fosse étant généralement au printemps et à la fin de l'été ou à l'automne. Son potentiel méthanogène est donc fortement réduit. Il est donc important d'estimer le pourcentage de dégradation du substrat, pour l'estimation de la production annuelle de méthane lorsque la couverture est installée.

Pour cela, il faut entrer les valeurs de température extérieure pour la zone considérée, dans la colonne correspondante, qui seront automatiquement reportées pour le calcul de la production annuelle (feuille « Etape 2 » ; figure III.2). Le calcul considère 1 m<sup>3</sup> de lisier pendant 1 an. Le pourcentage de dégradation minimal et maximal est calculé en faisant le ratio de la quantité finale de MO<sub>d</sub> (ou MO<sub>nd</sub>), sur la quantité initiale de MO<sub>d</sub> (ou MO<sub>nd</sub>). Ce ratio est ensuite utilisé dans la feuille « Etape 2 ».

## C) L'ESTIMATION DE LA PRODUCTION ANNUELLE DE MÉTHANE POUVANT ÊTRE VALORISÉE

Cette troisième feuille (figure III.3), qui constitue l'étape finale de la démarche, permet d'obtenir un intervalle de production annuelle de méthane pouvant être récupérée par la couverture Nénufar.

Les productions mensuelles minimales et maximales sont représentées graphiquement dans la feuille « Graphiques ».

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
M44													
1		<b>EVALUATION DU POTENTIEL MÉTHANOGENÈ</b>											
2		ENERGIE D'ACTIVATION E =	81000	MATIERE SECHE : MS =	TOOIMO								
3		en J/mol		en %	0.51								
4		CONSTANTE DES GAZ PARFAITS : R =	8.314	en kg MS/m <sup>3</sup> MB	0								
5		en J/Kmol		MATIERE ORGANIQUE : MO =	RATIO CH4/(CH4+CO2)								
6		PAR D'ARRHENIUS : INA en gCH4/kgMO/h	31,00	en % MS	0.6								
7		VALEUR BASSE	31,70	en kg MO/m <sup>3</sup> MB	0								
8		VALEUR HAUTE	30,70	MO BIODEGRADABLE : MB en kg MO/kg MO									
9		BOVIN : Valeur basse	31,80	PORC :	0.51								
10		VALEUR HAUTE	30,10	BOVIN :	0.33								
11		DIGESTAT (moyenne) : Frais	30,60	DIGESTAT :	0.29								
12		Stocké		Valeur choisie : MO4 =									
13		Valeur basse choisie : IN4 =		MO5 (en kg MO5/m <sup>3</sup> MB) =	0								
14		Valeur haute choisie : IN4 =		MO6 (en kg MO6/m <sup>3</sup> MB) =	0								
15													
16													
17		<b>VALEUR BASSE</b>											
18		NOMBRE DE JOURS	30	TC	37	T = TC (K) [2]	310,15	MO4 (kg)	MO4 (kg)	MO4 (kg)	MO4 (kg)	MO4 (kg)	MO4 (kg)
19						VOL CONSOMMÉ (m <sup>3</sup> )	1	MO4 (en kg MO4/m <sup>3</sup> MB)	0,00	MO4 (en kg MO4/m <sup>3</sup> MB)	0,00	MO4 (en kg MO4/m <sup>3</sup> MB)	0,00
20								MO4 (en kg MO4/m <sup>3</sup> MB)	0,00	MO4 (en kg MO4/m <sup>3</sup> MB)	0,00	MO4 (en kg MO4/m <sup>3</sup> MB)	0,00
21													
22													
23													
24													
25													
26													
27													
28													
29													
30													
31													
32													
33													
34													
35													
36													
37													
38													
39													
40													
41													
42													
43													
44													
45													

FIGURE III.1 : APERÇU DE LA FEUILLE DE CALCUL PERMETTANT DE CALCULER LE POTENTIEL MÉTHANOGENÈ DE L'EFFLUENT

ModBG2017-3

Chercher dans la feuille

Accueil Insertion Mise en page Formules Données Révision Affichage

Thèmes Couleurs Marges Orientation Taille Zone d'impression Sauts Arrière-plan Imprimer Mise en page

Quadrillage Automatique Imprimer Afficher

Titres

Q53

EVALUATION DU TAUX DE DÉGRADATION DU LIÈGE INITIAL									
Matière sèche (MS)									
Energie d'activation E <sub>a</sub> (kJ/mol)									
Constante des gaz R (J/mol.K)									
Matière organique (MO)									
en % VS									
POHC : Valeur basse									
POHC : Valeur haute									
BOVN : Valeur basse									
BOVN : Valeur haute									
DIGESTAT (propre) / Frais									
DIGESTAT									
Valeur choisie MOE =									
MOE (en kg MO/m <sup>3</sup> MS)									
Valeur haute choisie t									
MOE (en kg MO/m <sup>3</sup> MS)									
Valeur basse choisie t									
VOL COMBUSTIBLE (vol)									
T <sub>0</sub> EXTÉRIEURE									
T <sub>0</sub> LIBRE (°C)									
MOIS									
JANVIER	278,5								
FÉVRIER	278,5								
MARS	278,5								
AVRIL	278,5								
MAI	278,5								
JUN	278,5								
JUILLET	278,5								
AOÛT	278,5								
SEPTEMBRE	278,5								
OCTOBRE	278,5								
NOVEMBRE	278,5								
DÉCEMBRE	278,5								
Normes d'adéquation									
	6,0								
	6,7								
	11,1								
	16,3								
	20,8								
	17,3								
	19,5								
	6,9								
	3,9								

VALEURS BASSES									
MOIS	MOE (kg MO/m <sup>3</sup> MS)	MOE (kg MO/m <sup>3</sup> MS)	FT (en gCH <sub>4</sub> )	FT (en gCH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> MS)	FT (en m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> MS)	CH <sub>4</sub> (kg/m <sup>3</sup> MS)	CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> MS)	TOTAL (kg/m <sup>3</sup> MS)	
JANVIER	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
FÉVRIER	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
MARS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
AVRIL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
MAI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
JUN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
JUILLET	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
AOÛT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SEPTEMBRE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
OCTOBRE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NOVEMBRE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
DÉCEMBRE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
POTENTIEL ANNUEL (en m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> )					POTENTIEL ANNUEL (en m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> )				
Valeur basse :					Valeur haute :				
0					0				

VALEURS HAUTES									
MOIS	MOE (kg MO/m <sup>3</sup> MS)	MOE (kg MO/m <sup>3</sup> MS)	FT (en gCH <sub>4</sub> )	FT (en gCH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> MS)	FT (en m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> MS)	CH <sub>4</sub> (kg/m <sup>3</sup> MS)	CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> MS)	TOTAL (kg/m <sup>3</sup> MS)	
JANVIER	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
FÉVRIER	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
MARS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
AVRIL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
MAI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
JUN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
JUILLET	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
AOÛT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SEPTEMBRE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
OCTOBRE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
NOVEMBRE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
DÉCEMBRE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
POTENTIEL ANNUEL (en m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> )					POTENTIEL ANNUEL (en m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> )				
Valeur haute :					Valeur basse :				
0					0				

Prêt

FIGURE III.2 : APERÇU DE LA FEUILLE DE CALCUL PERMETTANT DE DÉTERMINER LE TAUX DE DÉGRADATION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE



## ANNEXE IV : GUIDES D'ENTRETIEN

### Guide d'entretien des projets Nénufar

QUESTION		RÉPONSE
<b>A</b>	<b>INFORMATIONS GÉNÉRALES</b>	
A.1	Nom, prénom de l'interviewé	
A.2	Nom de l'exploitation/société	
A.3	Type d'installation (élevage, unité de méthanisation, etc)	
A.4	Adresse - code postal - commune	
<b>B</b>	<b>PRÉSENTATION / HISTOIRE DE L'EXPLOITATION</b>	
B.1	Date d'installation/de création de l'exploitation	
B.2	Personne à l'origine de l'exploitation : reprise de la ferme familiale ? nouvelle installation ?	
B.3	Formation	
B.4	Motivations personnelles	
B.5	Historique de la structure	
B.6	SAU	
B.7	Types de cultures	
B.8	Si élevage :	
B.8a	Nombre de places/têtes	
B.8b	Quantité annuelle de lisier	
B.9	Si unité de méthanisation :	
B.9a	Structure de l'unité : nombre de fosses, dimensions/capacités utiles	
B.9b	Substrats + quantités	
B.9c	Temps de rétention hydraulique	
B.9d	Type de valorisation :	
	<i>Cogénération</i>	
	<i>Biométhane</i>	
	<i>Puissance installée/débit injecté</i>	
B.9e	Type de digestat :	
	<i>Séparé :</i>	
	<i>Brut :</i>	

QUESTION		RÉPONSE
B.9f	Quantité annuelle de digestat	
B.9g	Investissement total pour l'unité	
B.10	Autre(s) activité(s) ?	
<b>C</b>	<b>LA COUVERTURE NÉUFAR</b>	
C.1	Comment a-t-il/elle connu Nénufar ?	
C.2	Motivation initiale pour le projet	
C.3	Pourquoi Nénufar plutôt qu'une unité de méthanisation classique ?	
C.4	Modification(s) apportée(s) à la fosse pour l'installation de la couverture	
C.5	Si la couverture est déjà installée :	
C.5a	Combien de temps entre le premier contact avec Nénufar et l'installation de la couverture ?	
C.5b	Problèmes rencontrés	
C.5c	Remarques	
C.6	Si le projet est en cours :	
C.6a	Date du premier contact	
C.6b	Remarques	
C.7	Aspects financiers :	
	Investissement	
	<i>Terrassement</i>	
C.7a	<i>Couverture</i>	
	<i>Chaudière</i>	
	<i>Réseau de chaleur</i>	
	Subventions :	
C.7b	<i>Type de subvention</i>	
	<i>Montant</i>	
	<i>Remarques</i>	
<b>D</b>	<b>LA PRODUCTION DE BIOGAZ AVEC LE NÉUFAR</b>	
D.1	Type d'effluent (lisier bovin, porcin engraissement/PS/maternité/gestante, digestat)	
D.2	Quantité d'effluent traitée par an	
D.3	Fréquence d'apport	

	QUESTION	RÉPONSE
D.3	Fréquence de reprise (épandage, passage dans une autre fosse)	
D.4	Type de système d'introduction (raclage, automatisé, manuel, etc)	
D.5	<b>Epandage :</b>	
	Quantité épandue par an	
	Période d'épandage	
	Epandage réalisé par l'exploitation ou un entrepreneur ?	
	Coût de l'épandage (€/m <sup>3</sup> )	
	Technique d'épandage	
D.6	Dimensions/capacité utile de la fosse couverte	
D.7	<b>Fosse</b>	
	Enterrée	
	Aérienne	
D.8	<b>Valorisation du biogaz :</b>	
D.8a	Type de valorisation :	
	<i>Chaleur</i>	
	<i>Electricité</i>	
D.8b	Besoins en chaleur sur l'installation	
D.8c	Prix de l'énergie - Tarif de rachat de l'électricité	
D.8d	Remarques sur le mode de valorisation	
D.9	<b>Aspects financiers :</b>	
D.9a	Quantité de charbon actif consommée/an	
D.9b	Facture électrique liée aux fosses (agitations, etc)	
D.9c	Si prêt :	
	<i>Durée</i>	
	<i>Taux d'intérêt</i>	
	<i>% d'apport</i>	
D.10	<b>Si l'installation fonctionne déjà</b>	
D.10a	Quantité de biogaz produite depuis l'installation	
D.10b	% d'autonomie énergétique	

QUESTION		RÉPONSE
D.11	Autres avantages de la couverture Nénufar	
<b>E</b>	<b>IMPACT DE LA COUVERTURE</b>	
E.1	Qu'est-ce que la couverture a apporté à l'exploitation/installation ?	
E.2	<i>Sur le temps de travail</i>	
E.3	<i>Sur la gestion du substrat</i>	
E.4	<i>Sur les relations avec le voisinage</i>	
E.5	<i>Sur la vision du métier</i>	
<b>F</b>	<b>SI ABANDON DU PROJET</b>	
	Phase d'abandon du projet : après	
	Premier contact	
	Questions préliminaires	
	Première enveloppe budgétaire	
	Analyse du lisier	
	Précision BP	
F.1	Visite de Nénufar chez l'agriculteur	
	Visite de l'agriculture sur une installation Nénufar	
	Première offre	
	Négociations	
	Démarches financières : prêt	
	Démarches financières : subventions	
	Autre	
F.2	Raison de l'abandon (rentabilité, voisinage, situation personnelle)	
F.3	Remarques	
<b>G</b>	<b>AVENIR DE L'INSTALLATION/EXPLOITATION</b>	
G.1	Préoccupations principales	
G.2	Objectifs de développement	
<b>H</b>	<b>AUTRES REMARQUES</b>	

Guide d'entretien pour les agriculteurs de la Vienne

QUESTION		RÉPONSE
<b>A</b>	<b>INFORMATIONS GÉNÉRALES</b>	
A.1	Nom, prénom de l'interviewé	
A.2	Âge	
A.3	Sexe	
A.4	Nom de l'exploitation	
A.5	Type d'élevage	
A.6	Adresse - code postal - commune	
<b>B</b>	<b>PRÉSENTATION / HISTOIRE DE L'EXPLOITATION</b>	
B.1	Date d'installation/de création de l'exploitation	
B.2	Personne à l'origine de l'exploitation : reprise de la ferme familiale ? nouvelle installation ?	
B.3	Formation	
B.4	Historique de la structure	
B.5	SAU	
B.6	Types de cultures	
B.7	Description de l'élevage :	
B.7a	Nombre de places/têtes	
B.7b	Quantité annuelle de lisier	
B.7c	Epandage :	
	<i>Quantité épandue par an</i>	
	<i>Période d'épandage</i>	
	<i>Epandage réalisé par l'exploitation ou un entrepreneur ?</i>	
	<i>Coût de l'épandage (€/m<sup>3</sup>)</i>	
	<i>Technique d'épandage</i>	
B.7d	Est-ce qu'il y a des besoins en chaleur sur l'exploitation ?	
B.8	Autre(s) activité(s) ?	
<b>C</b>	<b>LE PROJET DE MÉTHANISATION</b>	
C.1	Motivations initiales pour la réalisation d'un projet de méthanisation	
C.2	Historique de la réflexion et freins à la réalisation d'un projet	

QUESTION		RÉPONSE
C.3	Quelles sont les attentes auxquelles un projet de méthanisation doit répondre ?	
C.4	Que pense-t-il de l'évolution de la filière méthanisation en France (avec objectif de 1 000 méthaniseurs agricoles en France d'ici 2020) ? Quels atouts ? Quelles contraintes ?	
C.5	Remarques	
<b>D</b>	<b>LES NOUVELLES CONTRAINTES AGRICOLES</b>	
D.1	Quels sont pour lui les contraintes agricoles principales aujourd'hui ? (société/voisinage, réglementation, financier/économie)	
D.2	Que pense-t-il de la problématique liée à la couverture des fosses de stockage d'effluents ? (intéressant, inutile, contrainte ?)	
<b>E</b>	<b>NÉNUFAR</b>	
E.1	Connait-il l'entreprise Nénufar ?	
E.2	Si oui, comment a-t-il connu l'entreprise ? Qu'en pense-t-il ?	
E.3	Si non, après description, qu'en pense-t-il ?	
E.4	Remarques	
<b>F</b>	<b>AVENIR DE L'INSTALLATION/EXPLOITATION</b>	
F.1	Préoccupations principales	
F.2	Objectifs de développement ?	
<b>G</b>	<b>AUTRES REMARQUES</b>	



	Diplôme : Ingénieur agronome Spécialité : Génie de l'Environnement Spécialisation / option : Agricultures durables et développement territorial Enseignant référent : Christian Mouchet
Auteur(s) : Emilie Bondoerffer	Organisme d'accueil : Nénufar Adresse : 104 avenue de la Résistance, 93100 Montreuil
Date de naissance* : 9 novembre 1994	
Nb pages : 60                      Annexes : 4	
Année de soutenance : 2017	Maître de stage : Rémy Engel, co-fondateur
Titre français : Evaluation technico-économique de la couverture Nénufar  Titre anglais : Technical and economic assessment of the « Nénufar » cover	
Résumé :  Le Nénufar est un système flottant pour la couverture des fosses de stockage d'effluents d'élevage. Ce dispositif est capable de récupérer le biogaz produit naturellement, qui peut ensuite être valorisé pour la production d'une énergie renouvelable.  L'objectif de cette étude était d'évaluer, grâce à des projets réels, la valeur ajoutée qu'une telle couverture peut apporter à une exploitation, en termes d'empreinte environnementale, d'organisation du travail et de rentabilité économique.  Sur le plan social, la couverture ne modifie pas la gestion de l'exploitation. Sur le plan environnemental, le Nénufar permet de réduire de manière significative l'empreinte de l'exploitation, grâce à la récupération et la valorisation du biogaz. Sur le plan économique, l'analyse affiche une rentabilité mitigée selon le type de projet.	
Abstract (1600 caractères maximum) :  The « Nénufar » is a floating cover destined to slurry tanks, capable of collecting and storing the biogas produced naturally by the manure, in order to produce sustainable energy.  The goal of this study was to assess, thanks to real projects, the added value that this cover can bring to the farm, from an environmental, social and economic point of view.  From a social point of view, the cover doesn't have a significant impact on the farm's management practices. From an environmental perspective, the farm's footprint is considerably reduced thanks to the cover, since the biogas is caught and used to produce a renewable source of energy. From an economic point of view, the analysis shows that the profitability is very variable according to the type of project.	
Mots-clés : méthanisation, biogaz, élevage, couverture de fosse  Key Words : biogas plant, biogas, breeding, tank cover	

\* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires