



Etude préliminaire pour la mise en place d'une unité de méthanisation de fumier de cheval

Parc Equestre Fédéral de LAMOTTE BEUVRON

Fédération Française d'Equitation

AUTEUR : P.POUECH
DECEMBRE 2008
RAPPORT INITIAL
REF. : 2901_FFE

Table des matières

INTRODUCTION	6
<u>PARTIE I – ELEMENTS DE CONNAISSANCE SUR LA FILIERE METHANISATION – ETAT DE L'ART</u>	7
1 NOTIONS GENERALES	8
1.1 LA BIOLOGIE DE LA METHANISATION	8
1.2 LA MISE EN ŒUVRE DE LA METHANISATION EN DIGESTEUR	9
1.3 LE BIOGAZ	11
2 SECTEURS D'APPLICATION	13
2.1 LE BIOGAZ DE FERME	13
2.1.1 ELEMENTS DE CONTEXTE	13
2.1.2 TECHNOLOGIES EMPLOYEES	14
2.1.3 INTERETS DU BIOGAZ A LA FERME	16
2.2 LA METHANISATION DES DECHETS MENAGERS	16
2.3 LA METHANISATION DES EFFLUENTS INDUSTRIELS	18
3 ETAT DE DEVELOPPEMENT	20
3.1 SITUATION EN EUROPE	20
3.2 L'EXEMPLE ALLEMAND	20
3.3 LA METHANISATION EN FRANCE	23
4 VALORISATION ENERGETIQUE DU BIOGAZ	25
4.1 PANORAMA DES PRINCIPAUX USAGES ACTUELS DU BIOGAZ	25
4.2 LA VALORISATION THERMIQUE	27
4.2.1 PRINCIPES GENERAUX	27
4.2.2 CONDITIONS DE FOURNITURE DE CHALEUR	27
4.3 PRODUIRE DE L'ELECTRICITE RENOUVELABLE	28
4.3.1 PRINCIPE GENERAUX	28
4.3.2 CONDITIONS DE VENTE D'ELECTRICITE	29
4.4 PRODUIRE UN BIOCARBURANT	30
4.5 INJECTER DANS LE RESEAU DU GAZ NATUREL	31
5 PRODUCTION D'UN AMENDEMENT ORGANIQUE	32
5.1 CARACTERISTIQUES DU DIGESTAT	32
5.2 POSSIBILITE D'ECOULEMENT	34
5.3 CAS DE LA NORMALISATION	34
<u>PARTIE II – ETUDE DES POSSIBILITES DE VALORISATION DES FUMIERS DE CHEVAUX DU PARC EQUESTRE FEDERAL</u>	36
1 OBJECTIFS	37
2 ANALYSES DU FUMIER DU PARC EQUESTRE	37
2.1 ANALYSE DE LA COMPOSITION BIOCHIMIQUE DU FUMIER	37
2.1.1 HUMIDITE ET MATIERE ORGANIQUE	37
2.1.2 MACROELEMENTS [NPK]	38
2.2 ELEMENTS TRACES METALLIQUES	39
2.3 CRITERES MICROBIOLOGIQUES	40
3 POTENTIEL METHANOGENE DU FUMIER DU PARC EQUESTRE	41
3.1 OBJECTIFS	41
3.2 MATERIEL ET METHODE	41
3.3 RESULTATS	41
3.4 ANALYSE ET COMMENTAIRES	45
CONCLUSION	47
ANNEXE	48

Liste des abréviations

CH ₄	Méthane
Nm ³	Normo m3 (volume aux conditions standards de pression et température)
MO	Matière organique ; déterminée par calcination à 550°C
MSV	Matière Sèche Volatile, assimilée à la MO
MS	Matière sèche ; déterminée par séchage à 105°C
PB	Produit Brut
COV	Charge Organique Volumique
TSH	Temps de Séjour Hydraulique
RVb	Rendement Volumique
Pb	Productivité de biogaz
PCH ₄	Productivité de méthane
AGV	Acides Gras Volatils
DCO	Demande Chimique en Oxygène
DBO ₅	Demande Biologique en Oxygène à 5 jours
MES	Matières En Suspension
NTK	Azote Total Kjeldahl
N-NH4	Azote ammoniacal ou ion ammonium
Ptot	Phosphore total

Liste des illustrations

Figure 1 : Voies de dégradation de la matière organique sous conditions anaérobies méthanogène	8
Figure 2 : Principes de fonctionnement de différents réacteurs anaérobies (source : Moletta.R, L'eau, l'industrie, les nuisances, n°300, mars 2007).	11
Figure 3 : Comparaison de la composition du biogaz de lisier et du gaz naturel fossile de Lacq.....	11
Figure 4 : Equivalence énergétique du méthane (source M.MOLETTA, 2006).....	12
Figure 5 : Comparaison de la composition du biogaz et du potentiel énergétique de différents substrats (source APESA,2007)	12
Figure 6 : Production de biogaz de différents substrats d'origine agricole (source APESA, 2007).....	13
Figure 7 : Situation du développement de la méthanisation des déchets ménagers en Europe (Source Harmonie, Comm. Agglo Montpellier, 2006)	17
Figure 8 : Schéma de principe du fonctionnement du digesteur VALORGA (source VALORGA INTERNATIONAL).....	18
Figure 9 : Evolution de la méthanisation des effluents industriels en France	19
Figure 10 : Production d'énergie primaire à partir de biogaz dans l'union européenne (en ktep, source EuroObserv'ER, 2006)	20
Figure 11 : Progression des installations de biogaz en Allemagne (en GWh, source CA Chevreux, 2007)	21
Figure 12 : Origines de la production d'électricité en Allemagne (source CA Chevreux, 2007)	21
Figure 13 : Projection d'évolution de la production d'électricité issue de biogaz en Allemagne.....	22
Figure 14 : Prévisions d'évolution du marché et de l'export de la méthanisation en Allemagne.....	22
Figure 15 : Recensement de l'état d'avancement des différents projets au niveau français (Source: ADEME, 2007).....	24
Figure 16 : Répartition par région des différents projets d'installations de méthanisation agricole en France (Source: ADEME, 2007).....	25
Figure 17 : Les différentes voies de valorisation du biogaz - source GDF.....	26
Figure 18 : modes de valorisation les plus usités selon le type de station de méthanisation (Source : http://www.lebiogaz.info).....	26
Figure 19 : schéma de principe de la valorisation des déchets par méthanisation et l'utilisation de biogaz en carburant pour véhicules (Source : http://www.biogasmax.eu/fr/biogas-lifecycle).....	31
Figure 20 : schéma de principe de la transformation de la matière organique par méthanisation.	32
Figure 21 : schéma de principe de l'évolution de la matière organique par méthanisation	33
Figure 22 : schéma de principe de l'évolution de la fraction azoté en digestion anaérobie.....	34
Figure 23 : Les différentes voies de valorisation du digestat.....	34
Figure 24 : Comparaison des compositions en NPK entre produits organiques	39
Figure 25 : Comparaison des teneurs en ETM du fumier et de la norme NFU44-051.....	40
Figure 26 : Comparaison des potentiels méthanogènes de différents substrats d'origine agricole ou agro-alimentaire (d'après des données du plateau technique de l'APESA).....	46

Liste des tableaux

Tableau 1 : composition du fumier en humidité, MS, MO	37
Tableau 2 : composition du fumier en NPK	38
Tableau 3 : composition du fumier en ETM.....	39
Tableau 4 : analyse d'indicateurs pathogènes dans le fumier	40
Tableau 5 : Résultats du test de potentiel méthanogène sur trois échantillons de fumier de cheval.....	45

INTRODUCTION

Le parc équestre fédéral de Lamotte-Beuvron souhaite engager une démarche de projet pour analyser la faisabilité sur les potentialités offertes par la méthanisation des fumiers de chevaux du centre.

A terme une étude technico-économique détaillée doit permettre l'analyse de faisabilité d'une unité de traitement par méthanisation sur le site d'exploitation situé à Lamotte-Beuvron.

Cette étude préliminaire doit permettre aux responsables du parc équestre de disposer d'informations d'aide à la décision sur les différents aspects de la filière. Elle est structurée en deux parties ; une première partie permet d'apporter des éléments d'informations sur la filière et en particulier :

- L'intérêt de valoriser le biogaz
- L'intérêt de vendre de l'électricité
- L'analyse des contraintes techniques
- Les possibilités de méthanisation
- L'état de l'art du développement de la filière.

Une deuxième partie permet de mieux caractériser les fumiers produits sur le parc équestre afin de disposer d'éléments fiables pour approfondir l'analyse de projet d'une future unité de méthanisation liée au site du parc équestre. Dans cette deuxième partie sont donnés d'une part la composition biochimique des fumiers et d'autre part les valeurs de potentiel méthanogène. Ces informations sont indispensables au bon dimensionnement technique et énergétique du projet. Ils impactent également directement sur l'économie et la rentabilité d'une future installation dans la mesure où ils permettent d'estimer la production d'énergie valorisable et susceptible d'être vendues au réseau électrique.

Partie I - Eléments de connaissance sur la filière méthanisation - Etat de l'art

1 Notions générales

1.1 La biologie de la méthanisation

La digestion anaérobie – ou méthanisation - est un processus biologique de dégradation de la matière organique en un mélange gazeux de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2) appelé biogaz. Le biogaz produit peut-être récupéré, stocké et valorisé pour la production de chaleur et/ou d'électricité. La méthanisation est observé dans les milieux naturels pauvres en oxygène, et il existe trois types d'écosystèmes méthanogènes naturels:

- Les sédiments marins et lacustres, les milieux inondés (marais, rizières), les boues et les digesteurs dans lesquels la matière organique est complètement dégradée ;
- Les appareils digestifs animaux et humains qui dégradent partiellement la matière et conduisent à la formation de produits intermédiaires assimilés comme éléments nutritifs ;
- Les eaux volcaniques, dans lesquelles la matière organique est absente et où seule la voie hydrogénéophile produit du biogaz.

La digestion anaérobie se déroule généralement à des pH voisins de la neutralité (6.5 à 8.5) et à des potentiels d'oxydoréduction très bas (-300 à -400mV). La gamme des températures peut varier de 10 à 65°C ; on parle de bactéries thermophiles (45 à 65°C), mésophiles (25 à 45°C), psychrophiles (10 à 25°C).

La digestion anaérobie se déroule en trois étapes principales qui sont présentées par la **Figure 1**.

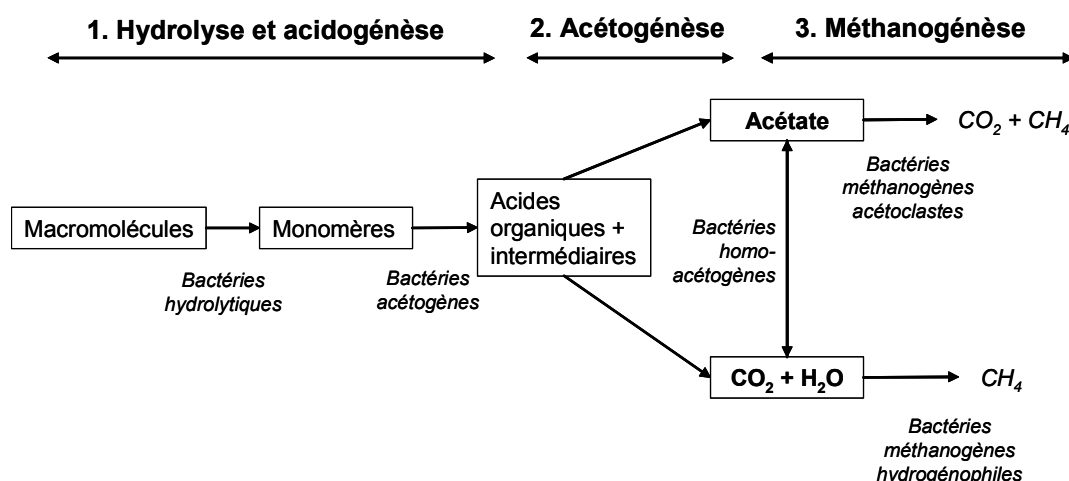


Figure 1 : Voies de dégradation de la matière organique sous conditions anaérobies méthanogènes¹

Au cours de l'hydrolyse et de l'acidogénèse, la matière organique est hydrolysée en monomère et transformée par les bactéries dites acidogènes en acides gras volatils ou AGV (acétate, propionate, butyrate...), en alcool, en acides organiques, en hydrogène et en gaz carbonique.

Ces molécules sont ensuite transformées en acide acétique, en hydrogène et gaz carbonique, c'est l'acétogénèse. Au cours de l'ultime étape de méthanogénèse, l'acétate issu des étapes précédentes conduit à la production de biogaz, constitué de CO_2 et CH_4 . C'est la voie majoritaire de production de méthane dans un digesteur.

Il existe également une production de biogaz par conversion simple du gaz de fermentation (CO_2 et H_2) en méthane. Cette conversion a une double rôle : en éliminant l'hydrogène gazeux, elle régule la production d'AGV, et elle contrôle la vitesse de catabolisme des acides propionique et butyrique. Ces bactéries sont des bactéries anaérobies strictes, très sensibles aux polluants toxiques et aux traces d'oxygène. De plus, elles sont les plus lentes du système, et ce sont donc elles qui régulent la vitesse

¹ Extrait de la thèse de Claire Emmanuelle MARCATO, origine, devenir et impact du cuivre et du zinc des lisiers porcins, rôle de la digestion anaérobie, septembre 2007, 185p.

globale de la digestion. En cas de dysfonctionnement du procédé (surcharge, variation de température ou de pH), la réponse se traduit par une accumulation des acides gras volatils dans le milieu et une inhibition de la méthanogénèse.

D'une manière générale la digestion anaérobie est stable lorsque l'installation de méthanisation est correctement dimensionnée. L'accumulation de deux types d'intermédiaires peuvent poser des problèmes sur la stabilité de la réaction globale : l'accumulation de l'hydrogène ou celle des AGV. Ces accumulations sont liées aux flux des métabolites. L'accumulation des AGV peut entraîner des baisses de pH qui peuvent inhiber la fermentation globale. L'accumulation d'hydrogène peut inhiber l'acétogénèse et la méthanisation sur acétate ce qui conduit ensuite à une accumulation d'AGV.

1.2 La mise en œuvre de la méthanisation en digesteur

Nous ne traiterons pas dans ce document de la méthanisation en Centre d'Enfouissement Technique. La production de biogaz est fatale dès lors que l'on confine de la matière organique humide en condition d'anaérobiose. La réglementation environnementale impose aux exploitants de collecter le biogaz et au minimum de le détruire au moyen d'une torchère conforme à la réglementation en terme d'émissions atmosphériques. Il existe plusieurs cas où les conditions économiques permettent de valoriser le biogaz en électricité laquelle est vendue sur le marché de l'énergie².

La mise en œuvre de la méthanisation en digesteur va dépendre de plusieurs paramètres, parmi les principaux nous retiendrons :

- Le type de matière organique (particulaire ou soluble)
- La teneur en matière sèche (solide ou liquide)
- La maîtrise de la technicité (système extensif ou intensif)

Le traitement anaérobie est particulièrement bien adapté aux effluents chargés et à ceux qui contiennent une forte proportion de carbone par rapport à l'azote et phosphore. Dans certains cas il est nécessaire de rajouter des compléments nutritionnels pour faire face aux carences ou à la non biodisponibilité d'éléments indispensables à l'activité microbienne. D'une manière générale on considère que la composition des effluents doit se rapprocher des conditions suivantes : DCO/N/P : 600/7/1.

Ainsi la technologie anaérobie va s'adapter aux caractéristiques de l'effluent à traiter et aux conditions d'exploitation. Elle est d'une grande diversité :

- **Mono, bi étagée** : en mono étagé toutes les réactions biologiques se font dans un même réacteur ; les systèmes à deux étapes comprennent un réacteur d'hydrolyse et d'acidogénèse suivis d'un réacteur d'acétogénèse et de méthanogénèse.
- **Infiniment mélangé, piston, discontinu** : le réacteur infiniment mélangé est l'une des premières technologies utilisées pour les boues de station d'épuration d'eaux usées. L'unité comprend un digesteur mélangé par un moyen mécanique ou par recirculation de biogaz sous pression (« gas lift »). Dans certains cas un décanteur placé en aval du digesteur permet de récupérer des boues qui sont réintroduites dans le réacteur permettant ainsi de recycler une partie des microorganismes. Dans un digesteur piston l'effluent est introduit à une extrémité du réacteur et est soutiré par l'extrémité opposée. Le temps de séjour hydraulique peut ainsi être correctement contrôlé ; on trouve souvent ce genre de réacteur pour le traitement d'effluents à forte teneur en matière sèche (>25%MS/PB). Citons enfin le digesteur discontinu (mis au point dans les années 1930 par Ducellier et Isman) fonctionnant essentiellement sur des effluents solides de type fumier.
- **Lit de boue, Lit fixé** : la stratégie employée dans un réacteur anaérobie est principalement axée sur le maintien de la biomasse dans le digesteur. On « joue » sur la capacité des micro-

² Arrêté tarif rachat électricité ; arrêté.... Collecte biogaz CET

organismes à se regrouper entre eux pour former des « floccs » ou des « granules » ou bien à se fixer sur un support pour constituer des « biofilms ». Le digesteur à lit de boues consiste à faire passer l'effluent à traiter au travers d'un lit de boues. La vitesse ascensionnelle de l'effluent est relativement faible, les microorganismes se forment en floccs et la décantation se réalise dans le réacteur. La maîtrise de l'hydraulique est importante et à noter que ce type de réacteur a un « caractère » fortement piston. Le lit fixé, appelé également « filtre anaérobie » est réalisé avec un support solide réparti dans le réacteur. Le support va être colonisé par des biofilms anaérobies. L'effluent traverse le support (ascendant ou descendant) ; plus la surface d'échange biofilm/effluent est importante plus le rendement de biodégradation est grand.

- **Réacteur UASB, lit fluidisé et autres technologies** : la technologie UASB repose sur la capacité des micro-organismes à former des granules. Le réacteur est dimensionné de sorte que les vitesses ascensionnelles de l'effluent soient inférieures à 1m.h^{-1} . Cette technologie est souvent utilisée pour des effluents à forte DCO soluble (effluent de papeterie, de brasserie...). Les lits fluidisés mettent en œuvre un support où se développe un biofilm. Un courant d'effluent, très souvent ascendant sur des unités industrielles, permet de maintenir en suspension ces supports. Ce type de réacteur permet d'accepter des charges organiques très importantes. A noter d'autres variantes de réacteurs adaptés à des effluents industriels spécifiques.

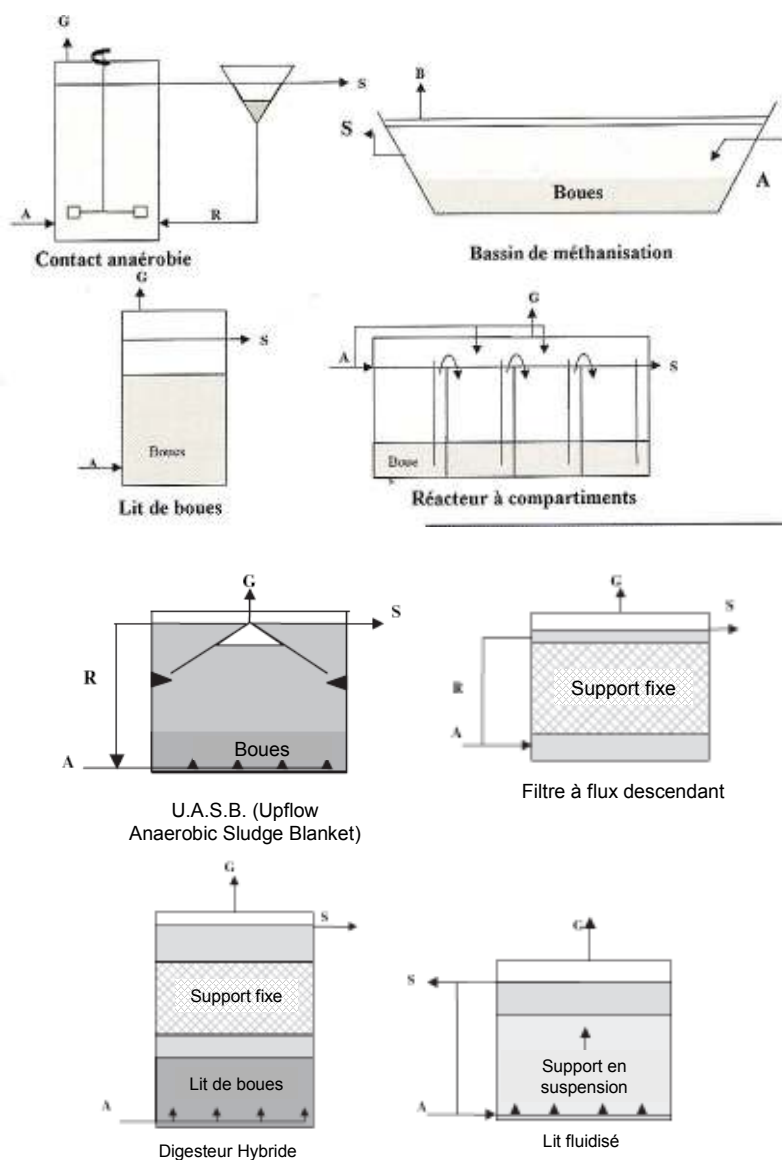


Figure 2 : Principes de fonctionnement de différents réacteurs anaérobies (source : Moletta.R, L'eau, l'industrie, les nuisances, n°300, mars 2007).

Les charges organiques appliquées en digestion anaérobie sont très élevées et peuvent varier de 1 à 40 kg de DCO par m³ de réacteur et par jour selon la technologie employée, le degré de biodégradabilité anaérobie de l'effluent et la température utilisée.

Les rendements de biodégradation de la matière organique sont eux aussi très importants. Ils sont de l'ordre de 60 à 70 % en réacteur infiniment mélangé sur des produits à forte concentration en matière solide et peuvent atteindre 95% d'abattement dans le cas de DCO soluble dans un réacteur à lit fixé ou fluidisé.

La biodégradation de la matière organique permet la libération de biogaz, mélange de méthane et de dioxyde de carbone. On considère en théorie qu'une tonne de DCO éliminée permet la production de 760 m³ de biogaz à 50% de méthane. Cependant selon la nature des produits traités et les conditions de fonctionnement du réacteur anaérobie, la production de biogaz va varier ainsi que sa teneur en méthane, donc son pouvoir calorifique.

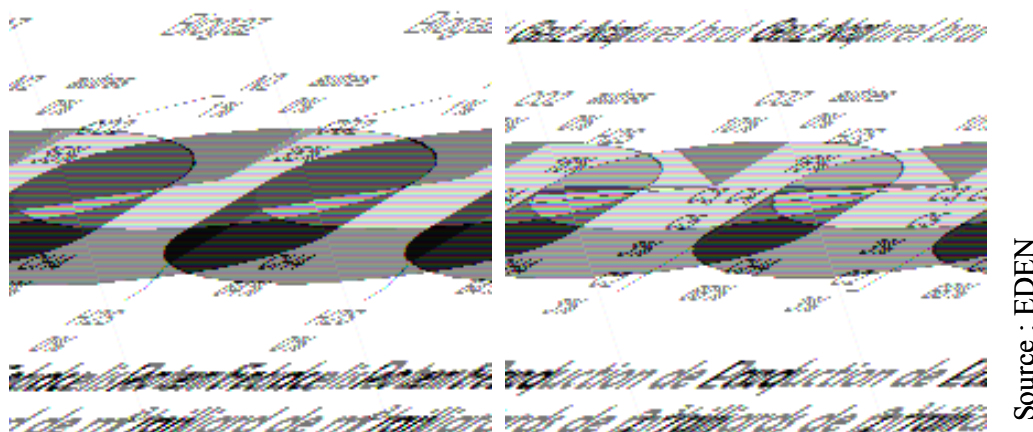
1.3 Le biogaz

La connaissance du biogaz remonte en 1776 où A.Volta montre que le gaz issu de la décomposition des vases de marais était combustible. Les différentes techniques de fermentation ont été mises au point dans la première moitié du XX^{ième} siècle. La méthanisation des boues d'épurations d'eaux usées a permis dans les années 1960/70 de grandes avancées sur la mise au point de digesteur. Dans les années 1970, les chocs pétroliers ont entraînés de nombreuses recherches sur la production de biogaz et sa valorisation. De nombreuses installations ont été construites sur effluents industriels et sur effluents agricoles. Le contre choc pétrolier a rendu obsolète la production de biogaz à des fins énergétiques. C'est l'une des raisons de l'échec du « biogaz à la ferme » et de la disparition de la centaine de digesteurs qui équipaient différents types d'élevages. Au niveau industriel, la méthanisation a permis de répondre aux contraintes environnementales de dépollution des effluents. Dans la plupart des cas les unités de méthanisation ont continué à fonctionner pour dépolluer ; le biogaz est souvent brûlé ou au pire perdu à l'atmosphère.

Avec le contexte énergétique actuel, la valorisation du biogaz retrouve un intérêt économique.

La composition du biogaz va varier en fonction des sources de production, les molécules majoritaires seront le méthane (CH₄, 50 à 75% v/v) et le dioxyde de carbone (CO₂, 25 à 50% v/v). Produit en milieu humide, il s'agit d'un gaz saturé en eau et corrosif par la présence notamment d'hydrogène sulfuré (H₂S, 200 à 5000 ppm).

Le biogaz est une énergie renouvelable qui est à apparenter au gaz naturel fossile.



Source : EDEN

Figure 3 : Comparaison de la composition du biogaz de lisier et du gaz naturel fossile de Lacq

L'intérêt énergétique de ce biogaz réside dans la teneur plus ou moins importante en méthane qui lui confère un pouvoir calorifique.

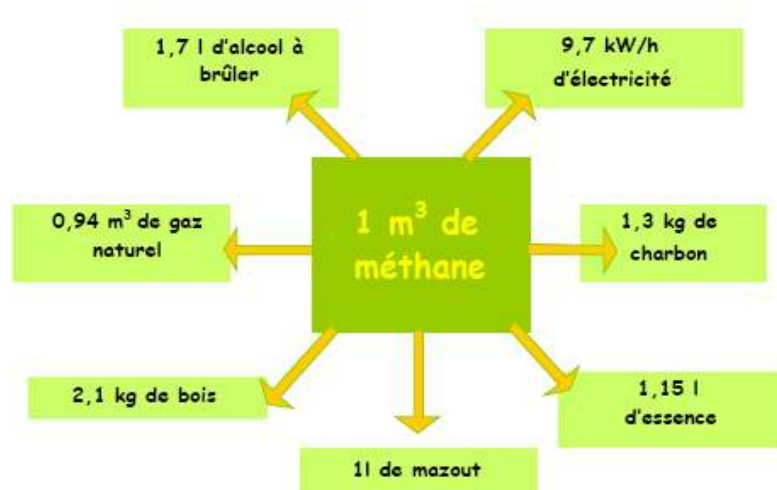


Figure 4 : Equivalence énergétique du méthane (source M.MOLETTA, 2006)

Ainsi selon la source de matière organique utilisée la production de biogaz va varier tant en volume de biogaz produit qu'en teneur en méthane. Ces deux paramètres vont donc influencer le PCI final du biogaz. Il existe un test appelé potentiel méthanogène qui permet de déterminer l'intérêt d'un produit organique à être méthanisé et à produire du biogaz. Le graphe suivant classe selon la nature de la matière organique différents produits selon leur potentiel méthanogène.

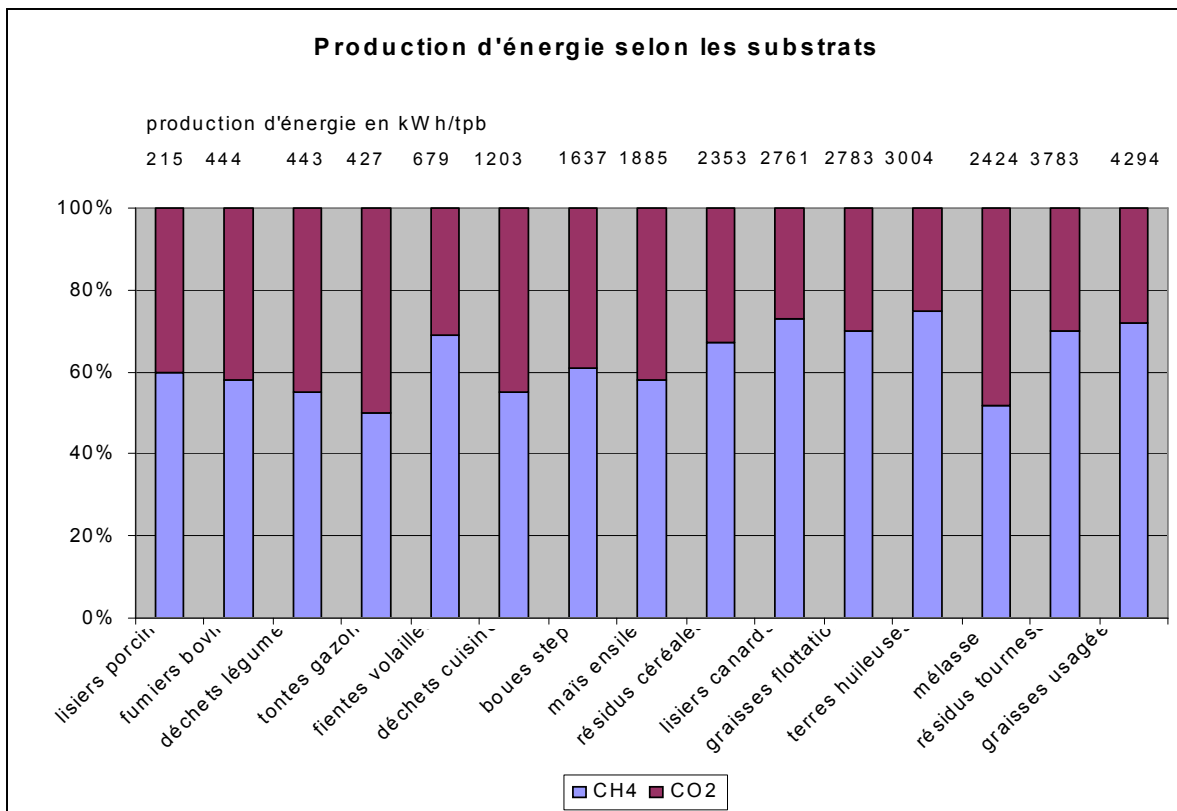


Figure 5 : Comparaison de la composition du biogaz et du potentiel énergétique de différents substrats (source APESA, 2007)

2 Secteurs d'application

La méthanisation s'applique à différents secteurs de l'activité économique avec un objectif principal qui peut changer d'un domaine d'activité à l'autre. Ainsi en milieu agricole la méthanisation va s'appliquer dans un objectif de production d'énergie, en milieu industriel agro-alimentaire la méthanisation va s'appliquer essentiellement pour ses performances d'abattement de la pollution carboné, pour les déchets ménagers les avantages liés à la maîtrise des odeurs et à la faible emprise au sol d'une unité seront plébiscités. Nous donnerons ainsi un aperçu de l'application de la méthanisation aux principaux secteurs d'activités.

2.1 Le biogaz de ferme

2.1.1 Eléments de contexte

L'exploitation agricole est par définition une usine de production de biomasse. De nombreux produits peuvent être utilisés en méthanisation pour produire de l'énergie. L'intérêt du secteur agricole réside également dans la possibilité de valoriser les digestats produits.

Parmi les sources de matières premières citons : les différents types d'effluents d'élevages (fumier et lisier), les résidus de culture, les co-produits de transformation... l'utilisation de cultures végétales dédiées peut même être envisagée comme c'est le cas en Allemagne (cf. chapitre 3).

La production de biogaz va varier selon la nature de la matière première. La figure suivante présente des potentiels méthanogènes de différents produits issus de la filière agricole.

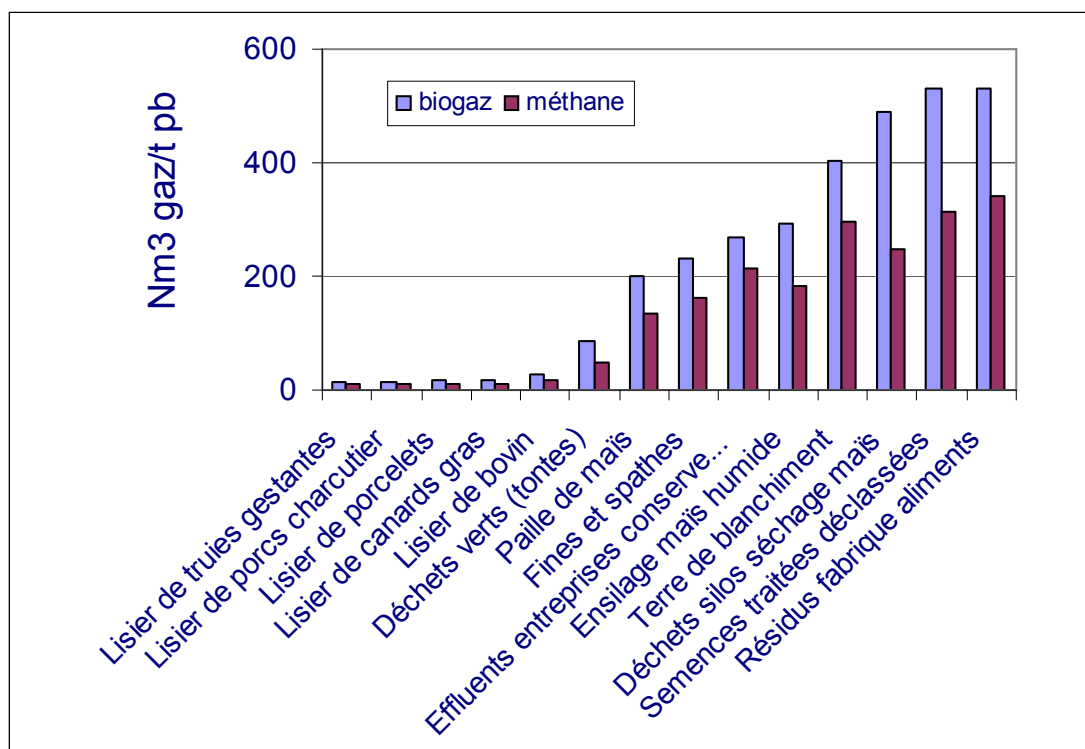


Figure 6 : Production de biogaz de différents substrats d'origine agricole (source APESA, 2007)

Un plan de développement de la méthanisation agricole a été mis en place en France de 1979 à 1983. Il a conduit à la construction d'une centaine d'installation à la ferme dont seulement 2 sont encore en fonctionnement aujourd'hui. L'unité basée à Montardon, Aquitaine – Pyrénées Atlantiques, sur le site

de l'AGPM sert encore de référence pour traitement des lisiers de porcs³. Les raisons de cet échec de développement sont dues à plusieurs facteurs : la non adéquation entre niveau de production énergétique et les possibilités de consommation sur une exploitation agricole, un tarif de rachat de l'énergie (électricité notamment) trop bas, des erreurs de conception d'installations entraînant des dysfonctionnement et des exigences d'accompagnement technique inadaptées au fonctionnement d'une exploitation agricole. Cette contre-performance a donné une mauvaise image à la méthanisation en milieu agricole.

La situation actuelle du développement de la méthanisation agricole a fortement évolué depuis 2 ans, notons les aspects suivants :

- Un nouvel engouement en France pour cette filière depuis le nouvel arrêté tarifaire pour l'achat d'électricité issue de biogaz⁴.
- Un développement très important en Allemagne depuis 1999 en raison d'une politique volontariste d'accompagnement par des tarifs d'achats de l'électricité produite élevés.
- Un recul de plus de 20 ans au Danemark avec une approche territoriale de la gestion des matières organiques fermentescibles ; approche qui a conduit à la mise en place de schémas collectifs de traitement de ces sous-produits.

2.1.2 Technologies employées

La technologie employée pour la méthanisation de substrat agricole est le digesteur infiniment mélangé brassé. Pour des tailles d'exploitation relativement importantes, un digesteur dédié est mis en place. En général le digesteur est de type « silo vertical⁵ », isolé thermiquement, muni d'un système d'échange chaleur eau/effluents et muni d'agitateurs mécaniques.



Photo 1 : réacteur infiniment mélangé –digesteur gazomètre, 15m³/jour d'effluent – 5000m³/an de lisiers de porcs - AGPM, Montardon (F-65)

³ Pouech P. et al. 2005. Intérêt de la co-digestion pour la valorisation des lisiers et le traitement de déchets fermentescibles à l'échelle d'un territoire. *Journées de la Recherche Porcine*, 37, 39-44.

⁴ Arrêté du 10 juillet 2006 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations qui valorisent le biogaz (voir chapitre 4.3).

⁵ On entend par silo vertical une cuve dont la hauteur est supérieure au diamètre de la circonférence.



Photo 2: Installation au biogaz de plus grande envergure avec plusieurs digesteurs infiniment mélangé – LIPP (A)

Les fosses de stockages d'effluents peuvent également être converties en digesteur. Les technologies employées prévoient généralement une couverture du toit des fosses, la mise en place d'un agitateur mécanique, l'isolation des parois et l'ajout d'un système d'échange chaleur.



Photo 3: réacteur continu infiniment mélangé - fosses digesteur/gazomètre - installation du GAEC Oudet (F)



Photo 4: réacteur continu infiniment mélangé - intérieur d'une fosse/digesteur pour effluents d'élevage – Schmack (A)

La prédominance de fumiers dans les diverses exploitations agricoles au niveau français pourrait entraîner la mise en place de système de méthanisation en voie sèche en fonctionnement discontinu. Les performances de ce type d'installation demandent à être validées en conditions d'exploitation réelles.



Photo 5: réacteur discontinu - intérieur d'une fosse/digesteur pour fumiers bovins – Installation de D.Brosset (F-85)

2.1.3 Intérêts du biogaz à la ferme

Au niveau agricole l'intérêt de la méthanisation réside principalement à deux niveaux :

- La production d'énergie issue de biomasse avec comme perspective à plus ou moins court terme de développer de nouveaux débouchés pour l'agriculture et de transformer l'agriculteur en producteur d'énergie renouvelable.
- L'utilisation du digestat comme fertilisant organique dans la mesure où les surfaces agricoles disponibles sont importantes et où la méthanisation permet d'obtenir au produit « stabilisé » et « caractérisé » du point de vue de l'intérêt agronomique.

2.2 La méthanisation des déchets ménagers

Alors que la méthanisation des boues de station d'épuration est utilisée depuis plus d'un siècle, il a fallu attendre les années 1980 pour que les premiers pilotes industriels capables de traiter des déchets solides tels que des déchets ménagers apparaissent. Faisons remarqué que l'on parle de digesteur en continu et non de système « batch » déjà expérimentée dans les années 1930 par Ducellier et Issman sur des fumiers. L'usine d'Amiens en France a été construite en 1988 et est restée pendant plus de 10 ans la plus importante unité au monde de méthanisation de déchets municipaux (80.000 tonnes/an). Malheureusement les difficultés de démarrage de cette usine (liées notamment à la chaîne de tri/séparation en amont des digesteurs) ont donné une image négative à cette filière.

Depuis quelques années les éléments de contexte ont beaucoup changé et la méthanisation est devenu une technique de traitement de premier plan en raison notamment :

- De la maturité acquise sur les procédés de digestion industriel en milieu solide
- De la l'amélioration de la qualité des collectes en amont permettant aux équipements de chaîne de tri de mieux fonctionner et garantissant une qualité accrue des digestats ;
- De la possibilité de traiter du biodéchet issu de collecte sélective.



Figure 7 : Situation du développement de la méthanisation des déchets ménagers en Europe (Source Harmonie, Comm. Agglo Montpellier, 2006)

Plusieurs collectivités ont lancé des études pour la réalisation d'unités de méthanisations sur la fraction triée des ordures ménagères et/ou sur les biodéchets collectés en porte à porte.

Principaux opérateurs proposant des unités de traitement par méthanisation :

- VALORGA INTERNATIONAL : digesteur mixte piston/infiniment mélangé avec injection de biogaz sous pression et maturation aérobie du digestat.
- VINCI – procédé Kompogas (procédé suisse) : digesteur piston, fonctionnement en thermophile avec compostage du digestat.
- LINDE : digesteur infiniment mélangé en phase liquide.

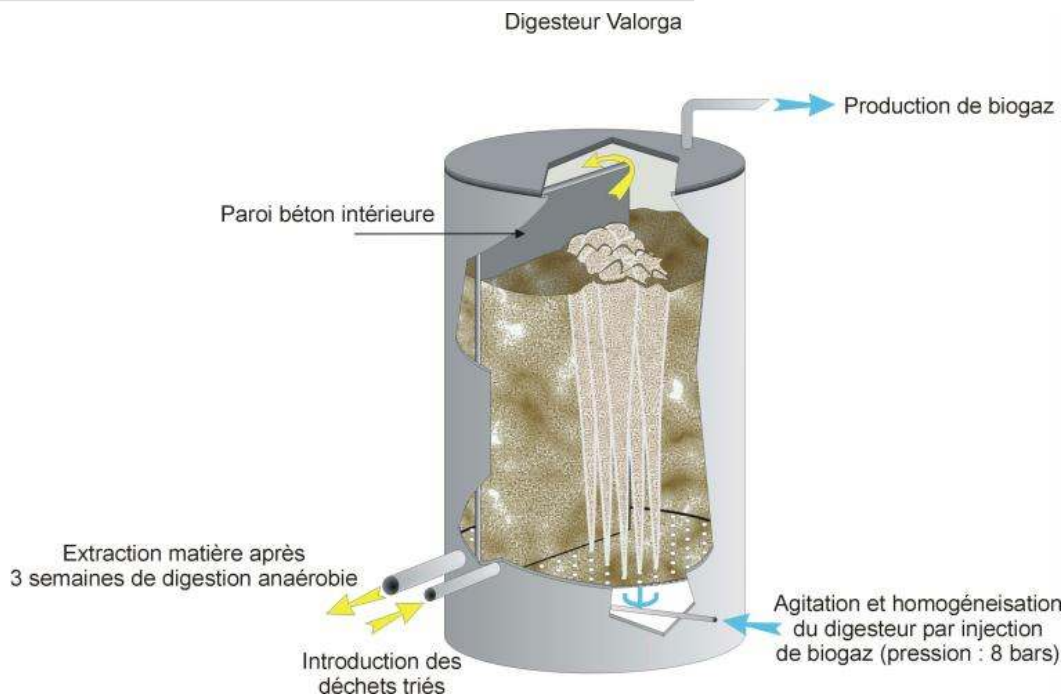


Figure 8 : Schéma de principe du fonctionnement du digesteur VALORGA (source VALORGA INTERNATIONAL)

2.3 La méthanisation des effluents industriels

Le développement de la technologie de méthanisation pour les effluents industriels remonte aux années 1970. Elle présente les avantages d'être économe en énergie et de permettre des taux d'abattement très importants de la pollution carbonée. L'amélioration du rendement des réacteurs (voir chapitre 1.2) et la fiabilisation des procédés permettent un développement important de la méthanisation en milieu industriel. Différents secteurs de production sont concernés : l'agroalimentaire, la papeterie, la chimie, le secteur viticole, les laiteries...

La méthanisation s'adapte à la fois à la taille de l'entreprise (volume d'effluents à traiter par jour) et à la nature de l'effluent (différentes technologies disponibles en fonction de la composition de l'effluent : infiniment mélangé, lit fixé, UASB...)

Le parc en Europe reste le plus important au monde. Cela vient du fait notamment de l'avancée technologique acquise ; notamment aux Pays Bas avec la mise au point du procédé UASB. En nombre d'unité la France est le pays européen comportant le plus d'installation de méthanisation (environ 150 unités fonctionnelles).

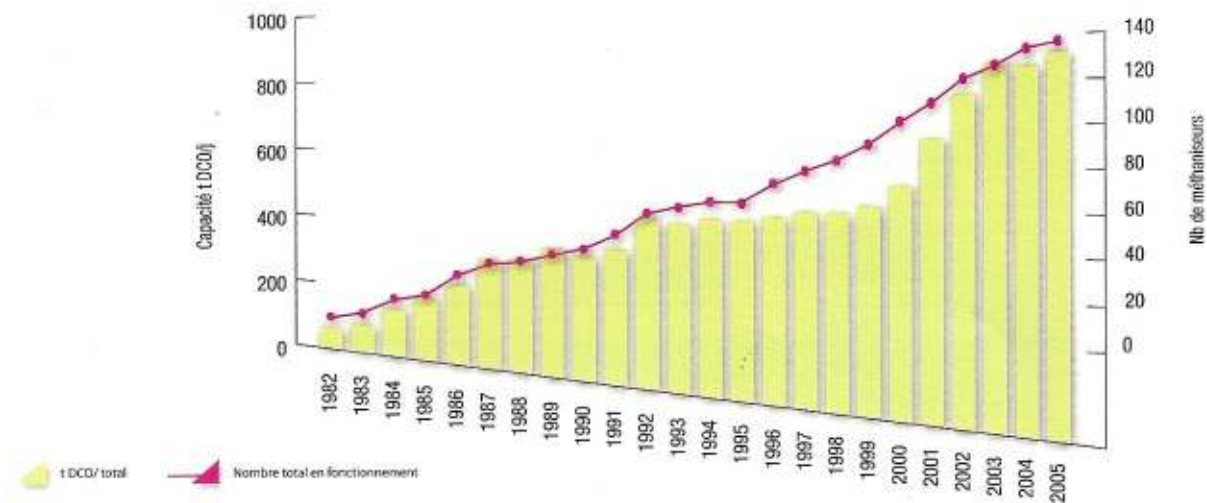


Figure 9 : Evolution de la méthanisation des effluents industriels en France⁶

Une large gamme d'effluents est concernée par la technologie de méthanisation.

Dans les industries agroalimentaires les effluents sont plus ou moins chargés en matière organique et connaissent en général d'importantes variations de production (saisonnalité de l'activité). Les principaux secteurs concernés sont les suivants :

- Les effluents riches en alcools : distilleries, cave vinicoles, brasseries
- Les effluents riches en sucres solubles : industries de transformation des fruits, boissons
- Les effluents riches en amidon : amidonnerie, industries de la conserve et légumes
- Les effluents issus de production animales : laiteries, fromageries, abattoirs

L'une des particularités des unités agroalimentaires réside dans la saisonnalité de production des effluents qui va demander de bien étudier l'adéquation entre la production d'effluent, la capacité de traitement et la possibilité d'utilisation de l'énergie (énergie thermique notamment).

Dans les papeteries les différents effluents produits (boues, liqueurs blanches...) peuvent être traités par méthanisation. L'intérêt de la méthanisation au-delà de la dépollution des effluents réside dans les besoins généralement importants en chaleur sur les unités de production ; de plus le fonctionnement de ces unités est généralement constant sur toute une année.

Enfin le secteur de la chimie est potentiellement producteur de molécules organiques dégradables par méthanisation (acide acétique, dérivés carbonés...).

Par ailleurs notons l'intérêt que peut représenter la méthanisation dans le cadre d'un regroupement d'effluents d'entreprises de petite et moyenne taille ; on parlera alors de codigestion. Différents exemples existent avec des technologies basées sur des réacteurs infiniment mélangés (type effluents d'élevage, boue de step)⁷.

Au niveau des installations industrielles la méthanisation s'intègre dans une chaîne de traitement comprenant des étapes de pré-traitement, de finition, de séparation des boues, de gestion/valorisation du biogaz. Plusieurs offres de constructeurs existent sur le marché : Biothane (Pays-Bas), Biotim (Belgique), Pâques (Pays Bas), Proserpol (France), Valbio (France), Veolia (France), Ondeo (France)...

En termes de comparaison de coût de traitement « anaérobie » et « aérobie », la méthanisation présente un surcoût généralement de 20% par rapport aux investissements. Cependant avec des coûts de

⁶ La méthanisation des effluents industriels, février 2006, agence de l'eau Adour-Garonne.

⁷ ADÆSO, UPPA-LFC, 2003. Amélioration de la dispersion de déchets gras agroalimentaires dans des boues d'assainissement afin d'améliorer leur traitement par biodégradation anaérobie.

fonctionnement plus faibles et des recettes potentielles dégagées par la valorisation d'énergie, le coût de traitement de la DCO reste plus faible pour la méthanisation vis-à-vis d'une filière aérobie.

3 Etat de développement

3.1 Situation en Europe

La méthanisation est une technologie mure qui peut voir son développement s'intensifier rapidement dans différents secteurs économiques (voir chapitres précédents). Les objectifs du livre blanc de l'Union européenne fixe à 15 Mtep l'énergie primaire produite à partir de biogaz en 2010 ; en 2005 l'union européenne (à 15 états membres) produisait environ 5 Mtep d'énergie primaire issue du biogaz.

	2004				2005			
	Décharges	Station	Autres	Total	Décharges	Station	Autres	Total
	Landfill Gas	d'épuration Sewage sludge gas	biogaz Other biogas		Landfill gas	d'épuration Sewage sludge gas	biogaz Other biogas	
United Kingdom	1 327,0	177,0		1 504,0	1 421,0	179,0		1 600,0
Germany	573,2	369,8	351,7	1 294,7	573,2	369,8	651,4	1 594,4
Italy	297,7	0,3	37,5	335,5	334,1	0,4	42,0	376,5
Spain	219,1	52,4	23,6	295,1	236,5	56,8	23,6	316,9
France	127,0	77,0	3,0	207,0	129,0	77,0	3,0	209,0
Netherlands	67,1	53,8	28,9	149,8	59,8	50,7	29,6	140,1
Denmark	13,8	19,8	55,6	89,3	14,3	20,5	57,5	92,3
Belgium	56,3	9,7	7,8	73,8	56,3	9,7	7,8	73,8
Czech Republic	18,6	28,7	2,9	50,2	21,5	31,4	2,8	55,8
Poland	21,5	23,9		45,4	25,1	25,3	0,3	50,7
Austria	11,8	19,1	14,5	45,4	11,8	19,1	14,5	45,4
Greece	20,5	15,5		36,0	20,5	15,5		36,0
Ireland	19,9	4,8	5,1	29,9	24,9	4,8	5,1	34,8
Sweden	12,0	22,1	1,2	35,3	10,1	18,7	0,9	29,8
Finland	16,6	9,9		26,5	16,6	9,9		26,5
Portugal			4,5	4,5			10,0	10,0
Slovenia	5,8	0,9		6,6	6,0	0,7		6,8
Luxembourg			5,00	5,0			6,7	6,7
Slovakia		5,7	0,2	5,9		5,7	0,2	5,9
Hungary	0,7	2,6	0,2	3,5	0,8	2,9	0,2	3,8
Total EU	2 808,6	893,1	541,7	4 243,3	2 961,4	898,0	855,6	4 715,0

Figure 10 : Production d'énergie primaire à partir de biogaz dans l'union européenne (en ktep, source EuroObserv'ER, 2006)

Le Royaume Uni reste le plus grand producteur d'énergie issue de biogaz en raison essentiellement de la politique mise en place depuis plus d'une décennie sur la collecte et la valorisation du biogaz de centre d'enfouissement technique.

L'Allemagne est le deuxième producteur d'énergie issue de biogaz avec une forte progression ces 5 dernières années liées à la mise en place d'une politique très incitative de rachat d'électricité issue de biogaz (voir chapitre suivant).

L'Italie et la France sont considérées comme les deux pays où le développement de la méthanisation devrait être significativement important dans les toutes prochaines années. Ces perspectives sont essentiellement liées aux nouveaux tarifs de rachat d'électricité (voir chapitre 4.3).

3.2 L'exemple allemand

Le secteur de la production d'énergie à partir de biogaz s'est fortement développé en Allemagne ces dernières années. Il est devenu une branche à part entière du secteur en plein essor des bioénergies.

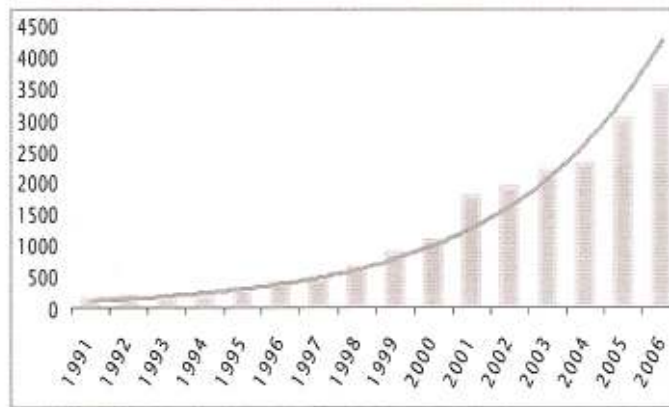


Figure 11 : Progression des installations de biogaz en Allemagne (en GWh, source CA Chevreaux, 2007)

L'électricité issue du biogaz représente 10% de l'électricité produite en Allemagne.

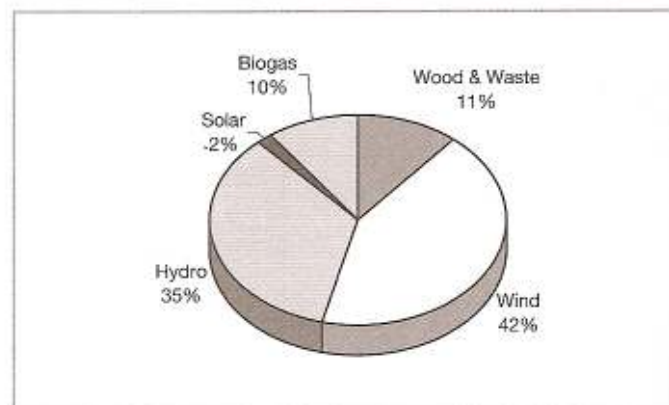


Figure 12 : Origines de la production d'électricité en Allemagne (source CA Chevreaux, 2007)

Le secteur agricole est principalement concerné. Dans les installations développées en Allemagne, le biogaz est produit à partir de résidus agricoles, de déchets industriels ou de cultures énergétiques dédiées.

Les conditions de rachat de l'énergie issue de biogaz sont très favorables, le biogaz est généralement valorisé dans des centrales de cogénération décentralisées destinées à la production d'électricité et de chaleur. Dans certaines situations, à la suite d'un traitement particulier, le biogaz peut alimenter les réseaux de gaz naturel existants. Le biogaz, à l'image du gaz naturel, peut être alors utilisé dans le secteur des transports. La Loi sur les énergies renouvelables (EEG) encourage la production d'électricité à partir du biogaz en Allemagne. L'électricité générée à partir du biogaz injectée dans le réseau public est rémunérée selon un tarif d'achat fixe pendant 20 ans, en fonction de la puissance de l'installation. En outre, des primes sont versées en cas d'exploitation de matières premières renouvelables, de technologies énergétiques innovantes et de production de chaleur en cogénération.

Pour permettre ce développement, l'acquisition de connaissances spécifiques de technologie des procédés et de gestion des processus s'est révélée indispensable. Étant donné que la productivité des installations de biogaz dépend de manière cruciale des processus microbiologiques se déroulant lors de la fermentation, un savoir biotechnologique complétant les connaissances techniques a été également nécessaire en vue d'une optimisation des installations. Les entreprises allemandes font figures de pionnières en matière de développement et de réalisation de telles installations. Les entreprises allemandes sont leaders dans le domaine de la technologie du biogaz. Les offres comprennent l'ensemble de la chaîne de compétences: de la planification à la mise en service ainsi qu'à la maintenance, en passant par la construction des installations de biogaz. Des produits élaborés sont également disponibles dans le domaine des installations de stockage et d'entreposage, des centrales de cogénération spécialisées et de la technologie d'analyse du biogaz.

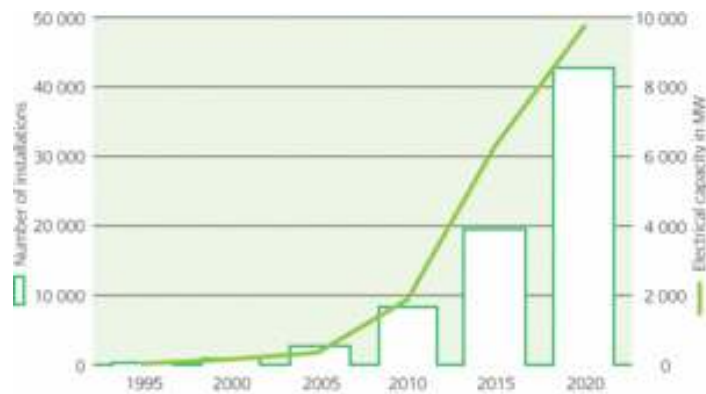


Figure 13 : Projection d'évolution de la production d'électricité issue de biogaz en Allemagne
(Source: Association allemande du biogaz-FvB, 2007)

L'année 2006 fut jusqu'à présent la plus prolifique pour le secteur du biogaz en Allemagne avec un total d'environ 650 nouvelles constructions d'installations. Le nombre d'installations a augmenté en 2006 pour atteindre la barre des 3.500, ainsi qu'une puissance électrique installée d'environ 1.100 mégawatts au total. Ainsi environ 5,4 milliards de kilowattheures d'électricité ont été générés à partir du biogaz en 2006.

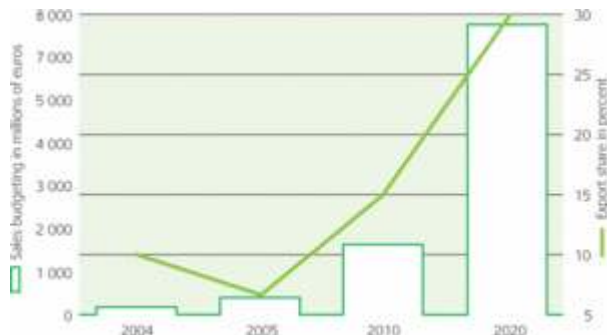


Figure 14 : Prévisions d'évolution du marché et de l'export de la méthanisation en Allemagne
(Source: Association allemande du biogaz-FvB, 2007)

Le secteur allemand a augmenté son chiffre d'affaires à l'exportation (voir le graphique ci-dessus). D'ici 2020, les professionnels du biogaz s'attendent à une part à l'exportation de quelques 30 %. Source: Association allemande du biogaz (FvB)

L'évolution de la taille des installations témoigne d'une nette tendance à la construction d'installations plus grandes et plus performantes. Si dans le passé les agriculteurs étaient souvent à la fois constructeurs et exploitants de l'installation, un intérêt accru est maintenant évident de la part des fournisseurs d'énergie et des prestataires de services énergétiques professionnels pour les installations de biogaz. Ainsi, de grandes installations ont été fréquemment réalisées grâce à la participation d'acteurs issus aussi bien du monde agricole que du secteur de l'énergie.

Une étape importante en matière de développement a été franchie en 2006 en ce qui concerne l'alimentation du réseau de gaz naturel en biogaz traité. Deux projets pilotes ont démarré avec succès. D'autres installations destinées à l'approvisionnement en biogaz se trouvent actuellement en cours de construction en Allemagne.

Notons également que l'Allemagne a une politique de soutien très important aux cultures énergétiques pour la production de biogaz. Une prime spécifique est attribuée pour chaque kWh produit à partir d'une culture énergétique dédiée ; ainsi selon la puissance installée le prix de rachat du kWh électrique va pouvoir varier entre 18 et 22 cts€/kWh. Cette situation a entraîné d'ailleurs des problèmes importants de fonctionnement des unités en fin d'année 2007 lorsque le prix d'achat des céréales a augmenté sur le marché des denrées alimentaires ; les agriculteurs n'avaient pas d'intérêt à introduire leurs cultures dans un digesteur pour produire du biogaz.

3.3 La méthanisation en France

Le développement de la méthanisation s'appuie sur plusieurs enjeux liés à différentes orientations importantes nationales et européennes, notons :

- La production d'énergie renouvelable : 21% d'électricité renouvelable en 2010 (directive EU 27/09/2001) ; augmentation de la production thermique (hausse de 50% d'ici 210 (Loi POPE du 13/07/05), production de biocarburant à hauteur de 7% en 2010 (plan biocarburant et Loi d'orientation agricole).
- La fourniture d'un amendement organique de qualité participant au maintien de la fertilité des sols
- La réduction des quantités de déchets mis en CET (directive du 26/04/1999)
- La réduction des gaz à effet de serre (plan climat 2004)
- La maîtrise des pollutions et la restauration de la qualité des eaux en permettant de réduire la pollution carbonée susceptible d'être rejetée dans le milieu naturel (directive EU et Loi sur l'eau).

Nous donnerons un petit aperçu de l'état de développement de la méthanisation selon les différentes filières.

La méthanisation est utilisée depuis longtemps pour le traitement des boues de station d'épuration, quelques données clés (source ADEME) :

- 68 installations sur boues de STEP
- Capacité de traitement 17.7 millions d'équivalent habitants
- Production d'énergie : thermique = 345 GWh_{th} ; électrique = 45 GWh_{elec}
- coût du traitement : 56 à 120 €/Tonne de MS
- Tendances : on constate une diminution du parc lié notamment aux modifications de la chaîne de traitement des eaux usées qui conduisent à une moindre production de boues et de plus des boues moins riches en matière organique biodégradable. Ces conditions ne permettent pas d'envisager une méthanisation seule de ces boues.

Au niveau industriel la méthanisation est utilisée depuis plusieurs années notamment dans le traitement des effluents issus des unités de production de boissons (brasserie, cave vinicole...) ; quelques chiffres repères (source Agence de l'Eau et ADEME) :

- 103 installations chez des industriels et IAA (127 digesteurs)
- Capacité de traitement 853 T DCO/j
- Production d'énergie : thermique = 196 GWh_{th} ; électrique = 4 GWh_{elec}
- Coût du traitement : 20 à 70 €/Tonne de DCO
- Tendances : une forte croissance (3 à 5 nouvelles unités par an) liée notamment à des enjeux énergétiques. A noter plusieurs sociétés spécialisées en France sur la technologie de la digestion anaérobie.

Comme évoqué précédemment la méthanisation des déchets ménagers est en plus essor en Europe et de nombreux projets de construction sont en cours au niveau national ; quelques données chiffrées (source ADEME) :

- 5 installations existantes (par ancienneté): Amiens, Varennes-Jarcy, Le Robert (Martinique), Lille, Calais
- Capacité de traitement 331.000 T/an
- Production d'énergie : thermique = 32 GWh_{th} ; électrique = 31 GWh_{elec}
- Coût du traitement : 80 €/Tonne

- Tendance : une croissance de 2 unités supplémentaires par an. Projection de 15 unités en 2012, développement de projet biocarburant.

Au niveau agricole la méthanisation connaît un nouvel élan spectaculaire avec 128 projets recensés par l'ADEME (voir les figures ci-après). Les projets concernent soit des installations individuelles de petite et moyenne taille, soit des projet collectifs de grande taille ; beaucoup d'installations envisagent la codigestion avec des effluents d'élevage ; quelques données (source ADEME) :

- 6 installations en fonctionnement (dont l'installation de Montardon(64) depuis 1982) ; 4 installations en système continu, 2 en système discontinu (batch) sur fumier.
- Capacité de traitement < 50.000 T/an
- Production d'énergie : thermique = 1.3 GWh_{th} ; électrique = 3.3GWh_{elec}
- Coût du traitement : non déterminé
- Tendance : une croissance prévisionnelle de 15 unités/an d'ici 3 à 5 ans en s'appuyant sur un transfert de technologie allemande.

Etat d'avancement des 128 projets de méthanisation agricole français (octobre 2007)

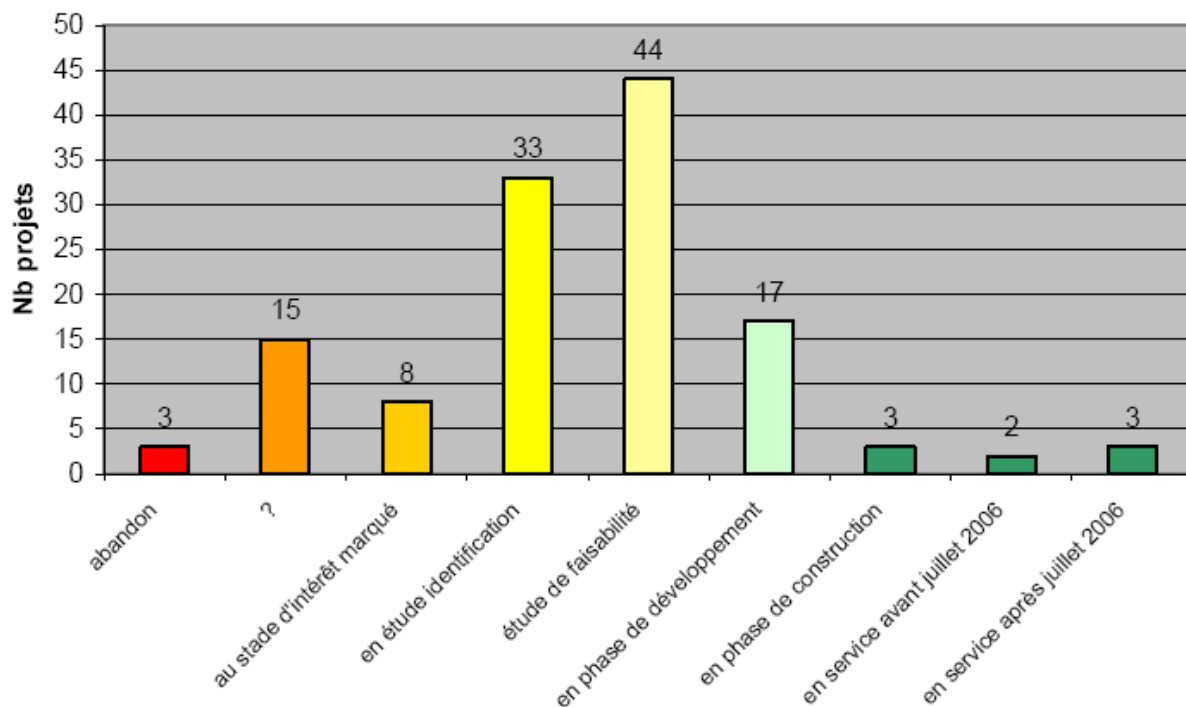


Figure 15 : Recensement de l'état d'avancement des différents projets au niveau français (Source: ADEME, 2007)

Projets et constructions d'installations de méthanisation agricole par région

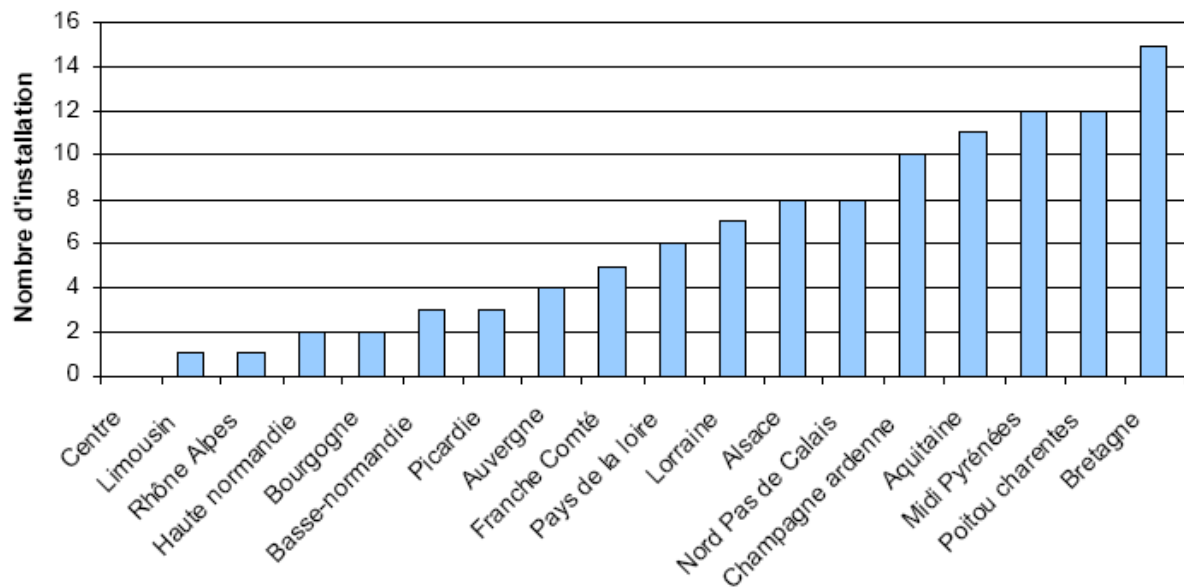


Figure 16 : Répartition par région des différents projets d'installations de méthanisation agricole en France (Source: ADEME, 2007)

4 Valorisation énergétique du biogaz

4.1 Panorama des principaux usages actuels du biogaz

Le biogaz est convertible en pratiquement toutes les formes utiles d'énergie.

Certaines applications sont largement développées et l'offre industrielle et commerciale est solidement établie pour :

- l'utilisation directe en chaudière : production de chaleur, eau chaude ou de vapeur
- la production d'électricité
- la production combinée d'électricité et de chaleur par cogénération
- gaz naturel après épuration (voir aussi la directive européenne sur le gaz naturel)
- carburant automobile après épuration et compression

D'autres voies sont au stade de la recherche et développement : production d'hydrogène, pile à combustible, production de froid par absorption.

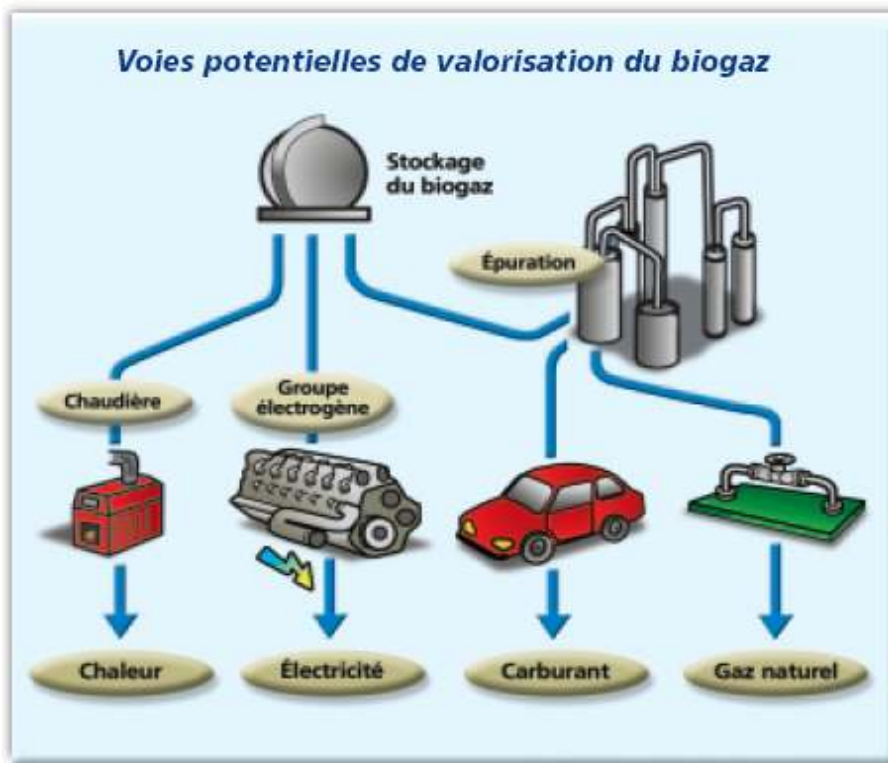


Figure 17 : Les différentes voies de valorisation du biogaz - source GDF

D'une manière générale, les valorisations thermiques nécessitent des débouchés de proximité : il peut s'agir de consommateurs externes au site de production (industries, réseaux de chaleur...) ou d'usages internes. Généralement une partie du biogaz produit est utilisée pour maintenir le digesteur à la température de fermentation (généralement 37°C ou 55°C). Cette consommation interne du procédé représente environ 15 à 30 % de la production. L'énergie est parfois utilisée pour déshydrater les boues.

Lorsqu'il n'y a pas de débouchés de proximité, la valorisation du biogaz nécessite son exportation sur les réseaux de distribution : électricité ou gaz naturel.

----->	Energie thermique seule	Energie électrique seule (sans usage de la chaleur)	Cogénération (usage interne de la chaleur)	Cogénération (usage externe de la chaleur)	Gaz naturel, carburant...
STEP urbaines					
STEP industrielles					
Centres d'enfouissement					
Digesteurs agricoles					
Installations centralisées					
Méthanisation des biodéchets					

	Rare
	Occasionnel
	Fréquent
	Majoritaire
	Dominant

Figure 18 : modes de valorisation les plus usités selon le type de station de méthanisation (Source : <http://www.lebiogaz.info>).

Nous donnerons les principes généraux des différentes voies de valorisation du biogaz sans entrer dans les détails techniques de la production d'énergie. Par contre il nous a semblé important d'apporter un éclairage sur les conditions réglementaires de fourniture d'énergie sous forme de chaleur et/ou d'électricité.

4.2 La valorisation thermique

4.2.1 Principes généraux

Le biogaz est utilisé pour des besoins thermiques autres que ceux nécessaires à la méthanisation (maintien en température du digesteur, hygiénisation de l'effluent) : soit sur le site de production (séchage des boues, déshydratation de lixiviats...), soit à l'extérieur (livraison de chaleur à un industriel ou à un réseau urbain...). Cette valorisation est souvent utilisée dans le cas des unités de méthanisation des effluents industriels.

4.2.2 Conditions de fourniture de chaleur ⁸

Le biogaz issu d'une unité de méthanisation peut être utilisé pour produire, conjointement ou non, de l'électricité et de la chaleur. L'électricité et la chaleur produites peuvent être utilisées pour les besoins du maître d'ouvrage de l'installation et / ou vendues à un tiers (privé ou public).

Il faut considérer les cas de figure suivants :

- La vente de chaleur à un tiers privé qui ressort de contrats bilatéraux sous seing privé.
- La vente de chaleur à une collectivité publique qui est encadrée par une série de textes réglementaires.

• La vente de chaleur à une collectivité publique ou à un réseau de chaleur

Rappelons qu'au sens juridique du terme, un réseau de chaleur est un service local de distribution d'énergie calorifique dont l'organisation incombe à la Collectivité. Entrent dans le champ des réseaux de chaleur les ensembles de bâtiments alimentés en chaleur à partir d'une chaufferie centrale et dont l'un au moins n'est pas propriété du maître d'ouvrage du réseau.

Le maître d'ouvrage d'une unité de méthanisation, s'il ne valorise pas la totalité de la chaleur en interne, peut vendre cette énergie à des usagers proches. Il y est d'ailleurs encouragé, du moins pour les installations de puissance supérieure ou égale à 3,5 MW, par la loi sur la chaleur (loi 80-531 du 15 juillet 1980), qui précise que :

- les quantités d'énergie utilisées, produites et disponibles doivent être déclarées à l'administration,
- le maître d'ouvrage doit faire connaître à toute collectivité publique qui lui en ferait la demande les conditions techniques et les tarifs auxquelles la chaleur disponible pourrait être livrée.

La vente de chaleur à une collectivité publique ou à un réseau de chaleur peut faire appel à deux types de relations contractuelles :

- Les contrats de vente sont encadrés par le **Code de Marchés publics** si le ou les bâtiments à chauffer sont :
 - un équipement public seul exploité en régie,
 - un réseau de chaleur exploité en régie,
 - un équipement public seul dont l'exploitation est déléguée. Notons que dans ce cas, une modification du contrat en cours est indispensable et peut prendre la forme d'un avenant ou d'une résiliation suivie de la passation d'un nouveau marché.

Il est important de noter que la mise en concurrence pour la fourniture de chaleur ou de combustible n'est pas obligatoire.

⁸ D'après l'étude réglementaire réalisée par APESA/BIOMASSE/RITMO pour le compte de l'ADEME ; 2007

- **Les contrats de délégation de service public** concernent les bâtiments chauffés par un réseau de chaleur dont l'exploitation est déléguée. Ils prévoient la possibilité d'alimenter partiellement le réseau de chaleur avec une source énergétique différente de celles précisées au contrat initial. Il s'agit dans ce cas d'un simple contrat privé d'achat de chaleur entre le délégataire et le producteur de chaleur issue du biogaz. La passation de ce contrat s'effectue néanmoins, suivant les quantités en jeu, sous le contrôle de la Collectivité autorité organisatrice du service public

Rappelons que, dans le cadre de l'alimentation d'un réseau de chaleur, quel que soit son mode de gestion, la Collectivité et les usagers peuvent trouver un intérêt à son alimentation totale ou partielle à partir de chaleur issue du biogaz, dans la mesure où la fiscalité sur la vente de chaleur peut être réduite à 5,5 % si la proportion d'énergie renouvelable utilisée dépasse 60 % (loi 2006-872).

Par ailleurs, il est important de noter que, conformément à la Loi 2006-872 du 13 juillet 2006 portant engagement national pour le logement, la mise en concurrence pour la fourniture de chaleur ou de combustible n'est pas obligatoire. Les contrats de délégation de service public ne sont pas régis par le code des marchés publics mais par le code général des collectivités territoriales.

- **La vente de chaleur à un tiers privé**

La vente de chaleur à un tiers privé n'est encadrée par aucun texte de loi. Il semble cependant nécessaire d'envisager des contrats sous seing privés avec acte notariés.

Notons que le producteur de chaleur, qui peut s'engager à fournir tout ou partie des besoins du tiers, doit veiller à la pérennité de son débouché, par exemple en envisageant de lier le bien immobilier chauffé à sa fourniture d'énergie.

4.3 Produire de l'électricité renouvelable

4.3.1 Principe généraux

Avec la directive 96/92 du 19 décembre 1996 relatives au marché intérieur de l'électricité, l'Union européenne a souhaité mettre en place un grand marché de l'électricité. En France cette directive a été transposée notamment par la loi n°2000-108 du 10 février 2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité. Citons également la loi de programme n°2005-781 du 13 juillet 2005 qui détermine les orientations de la politique énergétique de la France et qui fixe un objectif de production intérieure d'électricité d'origine renouvelable à hauteur de 21 % de la consommation en 2010.

La libéralisation du marché de l'énergie a conduit à la mise en place des instruments économiques pour la production d'électricité à partir d'origines renouvelables tels que l'obligation d'achat de l'électricité produite avec des tarifs spécifiques pour chacune des filières ainsi que la possibilité de vendre de l'électricité renouvelable à un opérateur énergétique. La production d'électricité à partir de biogaz fait partie des différentes filières de production d'électricité à partir de la biomasse.

Ainsi le producteur d'électricité issue du biogaz va pouvoir envisager : soit la vente d'électricité à un opérateur privé ; soit la vente d'électricité dans le cadre de l'obligation d'achat. Les différentes réglementations dont il faut tenir compte ainsi que les démarches nécessaires pour la vente d'électricité sont abordées dans le chapitre suivant.

Au niveau technique les installations de production d'électricité à partir de biogaz sont éprouvées. Plusieurs entreprises proposent des installations « clés en main » dans des gammes de puissance variant de 30 kWelec à plus de 1 MWelec ; les services de maintenance sont souvent associés au fournisseur d'équipement.

4.3.2 Conditions de vente d'électricité ⁹

Le producteur dispose de deux possibilités pour vendre l'électricité produite à partir du biogaz :

a) **La vente à un opérateur énergétique sur le marché de l'électricité** (opérateur ayant déposé une déclaration pour exercer l'activité d'achat pour revente d'électricité en application du décret n°2004-388 du 30 avril 2004). Il est important de noter que le producteur doit être rattaché à un responsable d'équilibre qui garantit contractuellement avec le gestionnaire du réseau de transport (RTE), le coût des écarts instantanés constatés entre l'électricité produite et injectée dans un périmètre pré-établi et l'électricité consommée dans ce même périmètre. Ce responsable d'équilibre peut être l'acheteur ou un tiers. Le producteur peut également envisager de garantir et contractualiser directement avec le RTE.

b) **La vente dans le cadre de l'obligation d'achat par EDF ou une entreprise locale de distribution** (article 10 de la loi n°2000-108 du 10 février 2000). La puissance installée ne doit pas dépasser 12 MW (**Décret n°2000-1196 du 6 décembre 2000**). Il s'agit d'un droit pour le producteur qui est formalisé par l'obtention d'un certificat d'obligation d'achat. Pour cela le producteur doit adresser un dossier de demande au préfet de région (DRIRE) comprenant les éléments énumérés dans le décret n°2001-410 du 10 mai 2001 :

- S'il s'agit d'une personne physique, ses nom, prénom et domicile ou, s'il s'agit d'une personne morale, sa dénomination ou sa raison sociale, sa forme juridique, l'adresse de son siège social, son numéro d'identité au répertoire national des entreprises et des établissements (SIRET), ainsi que la qualité du signataire du dossier.
- La localisation de l'installation de production d'électricité concernée.
- L'énergie primaire biogaz et la technique de production utilisées.
- La puissance installée, la capacité de production de l'installation de production d'électricité et le nombre prévisionnel d'heures de production annuelle.

Les relations entre le producteur et l'acheteur font l'objet d'un contrat d'achat de l'électricité établi selon un modèle approuvé par le ministre chargé de l'énergie (modèle de contrat disponible sur le site internet du MINEFI «contrat d'achats de l'énergie électrique produite par les installations valorisant le biogaz et bénéficiant de l'obligation d'achat d'électricité»). Ce contrat précise notamment les conditions relatives à la fourniture de l'électricité, le tarif d'achat de l'électricité, la durée, les engagements des parties. Le producteur doit communiquer à la DRIRE un bilan annuel de fonctionnement de la production. Le producteur est tenu de vendre l'intégralité de la production d'électricité, déduction faite éventuellement de la part autoconsommée (cependant le tarif préférentiel d'achat de l'électricité rend la plupart du temps l'autoconsommation économiquement non intéressante).

A noter la possibilité de vente de l'électricité dans le cadre d'un appel d'offres lancé par le ministre chargé de l'énergie dans un objectif de développer les capacités de production de la filière.

▪ **Les tarifs de rachat de l'électricité produite**

Dans le cadre de la **Loi n°2000-108 du 10 février 2000** relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité et de ses décrets d'application, de nouvelles conditions d'achat de l'électricité produite à partir d'énergies renouvelables ont été définies et chaque filière a fait l'objet d'un arrêté tarifaire spécifique pris par les ministres chargés de l'économie et de l'énergie, après avis du Conseil supérieur de l'énergie et de la Commission de régulation de l'énergie. Il existe deux arrêtés tarifaires spécifiques à la filière biogaz et méthanisation :

- L'arrêté du 16 avril 2002 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par méthanisation ; les conditions de cet arrêté restent valables pour les installations construites avant le 10 juillet 2006 qui ont conclu un contrat d'obligation d'achat.

⁹ D'après l'étude réglementaire réalisée par APESA/BIOMASSE/RITMO pour le compte de l'ADEME ; 2007

- L'arrêté du 10 juillet 2006 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations qui valorisent le biogaz. Ce sont les conditions tarifaires de ce nouvel arrêté qu'il faut retenir pour la vente de l'électricité produite. L'énergie électrique fournie par le producteur est facturée à l'acheteur sur la base d'un tarif qui prend en compte la puissance maximale installée, la prime d'efficacité énergétique et la prime à la méthanisation. Ainsi le tarif applicable à l'énergie fournie est égal à T+M+PM, formule dans laquelle T : est le tarif de référence; M : est la prime à l'efficacité énergétique ; PM : est la prime à la méthanisation qui s'élève à 2 c€/kWh. Les conditions des différents paramètres ont été fixées dans l'arrêté de la manière suivante :

Puissance maximale installée	Tarif d'achat (c€/kWh)
Inférieure ou égale à 150 kW	9.00
Entre 150 kW et 2 MW	Interpolation linéaire
Supérieure ou égale à 2 MW	7.50

Tarif d'achat de l'électricité issue de la méthanisation

Valorisation énergétique totale (V)	Montant de la prime (c€/kWh)
V inférieur ou égal à 40%	0.00
V entre 41% et 74%	interpolation linéaire
V supérieur ou égal à 75%	3.00

Prime à l'efficacité énergétique

Précisons que la valorisation thermique totale s'évalue de la manière suivante : $V = \text{énergie thermique valorisée ((vendue ou autoconsommée) + énergie électrique valorisée (vendue ou autoconsommée))} / \text{énergie primaire biogaz} \times 0,97$. Ainsi selon le pourcentage de valorisation de l'énergie contenue dans le biogaz, le prix d'achat de l'électricité pour une puissance installée inférieure ou égale à 150 kW va se situer entre 11 c€/kWh sans valorisation de la chaleur et 14 c€/kWh si une cogénération est installée et plus de 40% de la chaleur produite est valorisée.

Il faut également noter qu'une installation de production d'électricité issue de biogaz et de puissance inférieure ou égale à 36KVA peut éventuellement bénéficier d'une obligation d'achat selon les conditions tarifaires de l'arrêté du 13 mars 2002. Le prix d'achat d'électricité est basé sur les tarifs de vente d'électricité du marché dans le cadre de contrat fournisseur/client domestique. Un plafond d'achat d'électricité est établi en fonction de la puissance installée et d'une durée de fonctionnement maximale de l'installation de 8400h.

Le producteur d'électricité peut choisir entre les deux arrêtés tarifaires en cours. Le contrat d'obligation d'achat est établi pour une durée de 15 ans.

4.4 Produire un biocarburant

Pour cette application, les spécifications de pureté du gaz sont beaucoup plus sévères que pour les précédentes, puisque le biogaz utilisable comme carburant doit contenir un minimum de 96% de méthane. Il faut en outre que le point de rosée soit inférieur à -20°C, ce qui correspond à une teneur en eau inférieure à 15 mg/(n)m³. D'autres exigences sont à respecter : teneur en H₂S inférieure à 100 mg/(n)m³, en huile inférieure à 70- 200 ppm, en hydrocarbures liquides inférieure à 1 %, avec une taille de poussières limitée à 40 microns.

La séquence typique de préparation est la suivante : compression à 15- 20 bar désulfuration et décarbonatation par lavage à l'eau sous pression (perte de 8% du méthane environ) ; déshydratation par procédé PSA (Pressure System Adsorption) ; déshalogénéation par passage sur charbon actif, généralement perdu (incinéré) ; enfin, compression à 250-350 bar.

La ville de Lille est pionnière en France sur ce type de valorisation. Les références existent dans certains pays du nord de l'Europe et notamment la Suède.

Le biogaz est un biocarburant à part entière. Il est d'ailleurs le seul biocarburant à présenter les mêmes propriétés que sont homologues fossile, ce qui est tout à fait logique puisqu'il s'agit de la même molécule d'hydrocarbure, le méthane CH_4 .

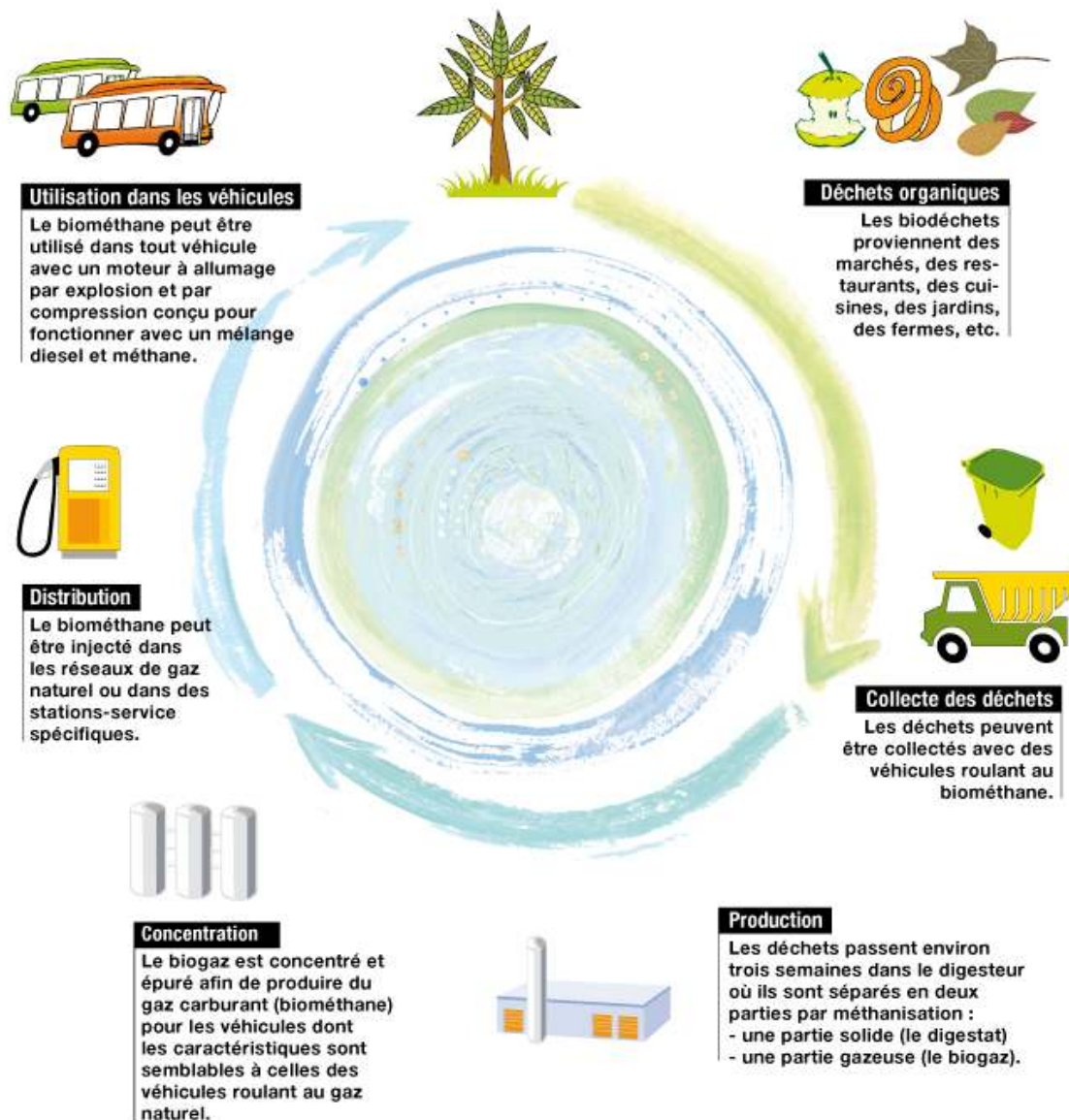


Figure 19 : schéma de principe de la valorisation des déchets par méthanisation et l'utilisation de biogaz en carburant pour véhicules (Source : [http:// www.biogasmax.eu/fr/biogas-lifecycle](http://www.biogasmax.eu/fr/biogas-lifecycle)).

4.5 Injecter dans le réseau du gaz naturel

L'épuration du biogaz aux normes du gaz naturel d'origine fossile permet d'envisager l'injection dans le réseau de transport. Cette perspective permet d'envisager le découplage entre la production et la consommation d'énergie.

La composition finale du biogaz ainsi que sa pression dépendent évidemment des spécifications imposées par le gestionnaire du réseau. Ces dernières portent principalement sur les teneurs en méthane, en gaz carbonique, en hydrogène sulfuré et en oxygène, avec des contraintes supplémentaires sur la teneur en composés organohalogénés. Le gaz injecté doit en outre être odorisé avant l'injection.

Il n'existe pas en France d'opération d'injection de biogaz épuré dans le réseau de transport. Par contre différentes opérations existent en Suède, en Hollande, Allemagne...

En novembre dernier, les résultats des travaux de l'étude de l'AFSSET (Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail) montrent qu'il est aujourd'hui envisageable d'injecter du

biogaz épuré dans le réseau de distribution de Gaz de France. Les conditions techniques ainsi que les tarifs de rachat du gaz restent à être définies par les ministères concernés. Cette nouvelle possibilité va permettre certainement de développer des projets de territoire en découplant les ressources de matières organiques de l'utilisation finale de l'énergie produite. Le paysage de la méthanisation en France pourrait avoir un nouvel essor.

5 Production d'un amendement organique

La méthanisation des sous-produits solides conduit à la production d'un résidu de méthanisation appelé le digestat. Ce produit peut avoir des caractéristiques intéressantes pour une valorisation comme fertilisant organique, nous apporterons ci-après quelques éclairages sur ce point.

5.1 Caractéristiques du digestat

Après avoir été digéré pendant quelques dizaines de jours en condition mésophile (37°C) ou thermophile (55°C), le résidu de méthanisation contient une fraction non dégradée de la matière organique initiale et l'ensemble des matières minérales ; signalons également que le procédé n'entraîne pas de perte en eau (minime au travers des condensats du biogaz). Le schéma suivant présente les différentes fractions obtenues.

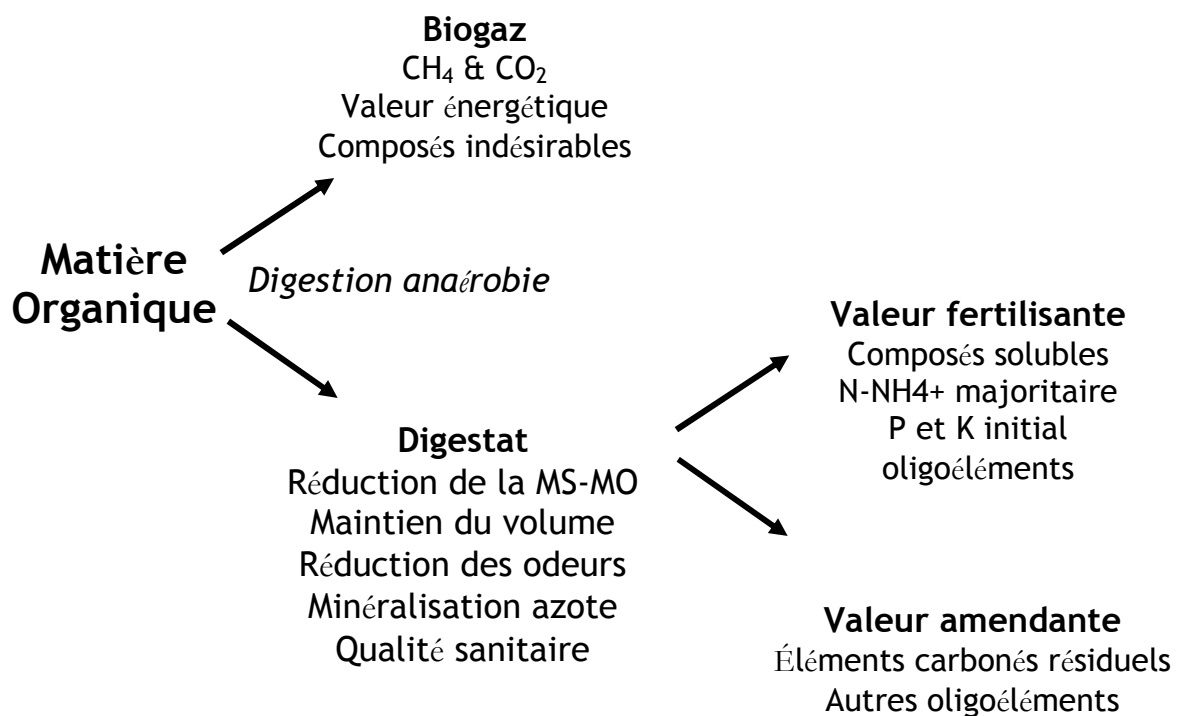


Figure 20 : schéma de principe de la transformation de la matière organique par méthanisation.

La qualité de la fraction solide du digestat est une composante importante du bon fonctionnement de la filière dans son ensemble. Elle concerne d'une part l'aspect visuel du produit final et d'autre part des critères agronomiques d'efficacité et d'innocuité. La qualité visuelle est directement dépendante de la présence de composés indésirables (morceaux de plastique, de verre, de métaux...). Certains critères

d'innocuité sont liés à la présence de composés dangereux (métaux, composés organiques...). La qualité des produits finis dépend dès lors du système de collecte mis en place et de l'efficacité du tri¹⁰.

La fraction solide résiduelle issue du digestat contient de la matière organique et des éléments minéraux pouvant être valorisés en agriculture pour l'entretien de la fertilité des sols et/ou pour la fertilisation des cultures. En effet la méthanisation est un procédé de transformation biologique entraînant des modifications dans les formes de la matière organique et la biodisponibilité des éléments nutritifs pour les végétaux. Les conditions physico-chimiques du milieu (anaérobiose avec des potentiels d'oxydoréduction très bas) ont également un impact sur la mobilité de certains composés comme les éléments traces métalliques¹¹. Il n'est pas raisonnable de considérer cette transformation comme un simple prétraitement (au même titre que le broyage ou la déshydratation), il s'agit bien d'une étape de profonde modification de la matrice organique. Pour permettre une optimisation de son utilisation, le digestat doit suivre une phase de post-traitement aérobie dont l'objectif est de poursuivre l'évolution de la matière organique afin d'obtenir un produit plus « stabilisé » du point de vue de l'évolution de la matière organique. Dans la pratique, les industriels poursuivent l'évolution du produit en procédant à une phase de maturation aérobie plus ou moins poussée voire de compostage aérobie.

Les produits obtenus à partir de la méthanisation de matière organique sont à rapprocher de la catégorie des amendements organiques en revendiquant principalement un effet d'entretien ou de valorisation de la fertilité des sols. La méthanisation de la matière organique peut être comparée à la phase thermophile du compostage. Il s'agit de phases d'intense activité bactérienne où le carbone le plus facilement accessible est dégradé en CO₂ avec dégagement de chaleur (phase thermophile du compostage) ou en CO₂ et en méthane (digestion anaérobie). A la fin de ces processus biologiques, on a des produits (digestat et compost frais) qui doivent subir une phase de maturation (réorganisation du carbone, humification) afin d'obtenir un produit stabilisé (faible évolution de la fraction carbonée). La question à laquelle le projet souhaite répondre est de savoir si on peut obtenir à partir du même déchet qu'il soit traité par compostage ou par méthanisation, un produit final appartenant à la même catégorie de produit organique.

Les schémas suivants présentent les bilans matière organique et azote lors du processus de méthanisation.

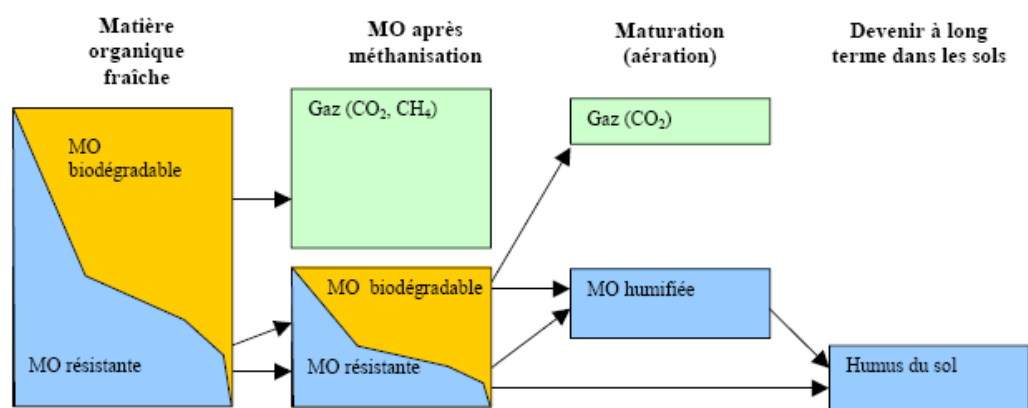


Figure 21 : schéma de principe de l'évolution de la matière organique par méthanisation

¹⁰ Environnement & Technique (2005), n°252, p26-28.

¹¹ APESA et al. (2006). Methavalorg, rapport final de programme. Et publication en cours

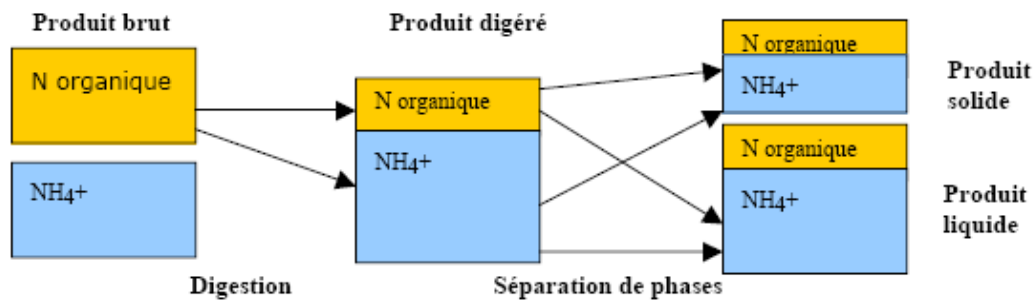


Figure 22 : schéma de principe de l'évolution de la fraction azotée en digestion anaérobie

5.2 Possibilité d'écoulement

L'écoulement du digestat reste un point important à bien maîtriser sur une unité de méthanisation. Cela conditionne le fonctionnement de l'ensemble de l'installation au même titre que la valorisation énergétique du biogaz.

Il s'agit donc d'une problématique qu'il ne faut pas sous-estimer au moment des études de faisabilité d'un projet. Les possibilités d'écoulement du digestat sont comparables aux différentes voies d'écoulement d'un produit organique en faisant le distinguo entre la « logique déchet » et la « logique produit ». La figure suivante présente les différentes possibilités d'écoulement du digestat.

Nous détaillerons la voie de la normalisation et la spécificité des digestats ; pour les autres voies on peut s'appuyer sur les documents et ouvrages relatifs aux autres sous-produits organiques car la réglementation et les modes opératoires sont applicables à l'utilisation de digestat.

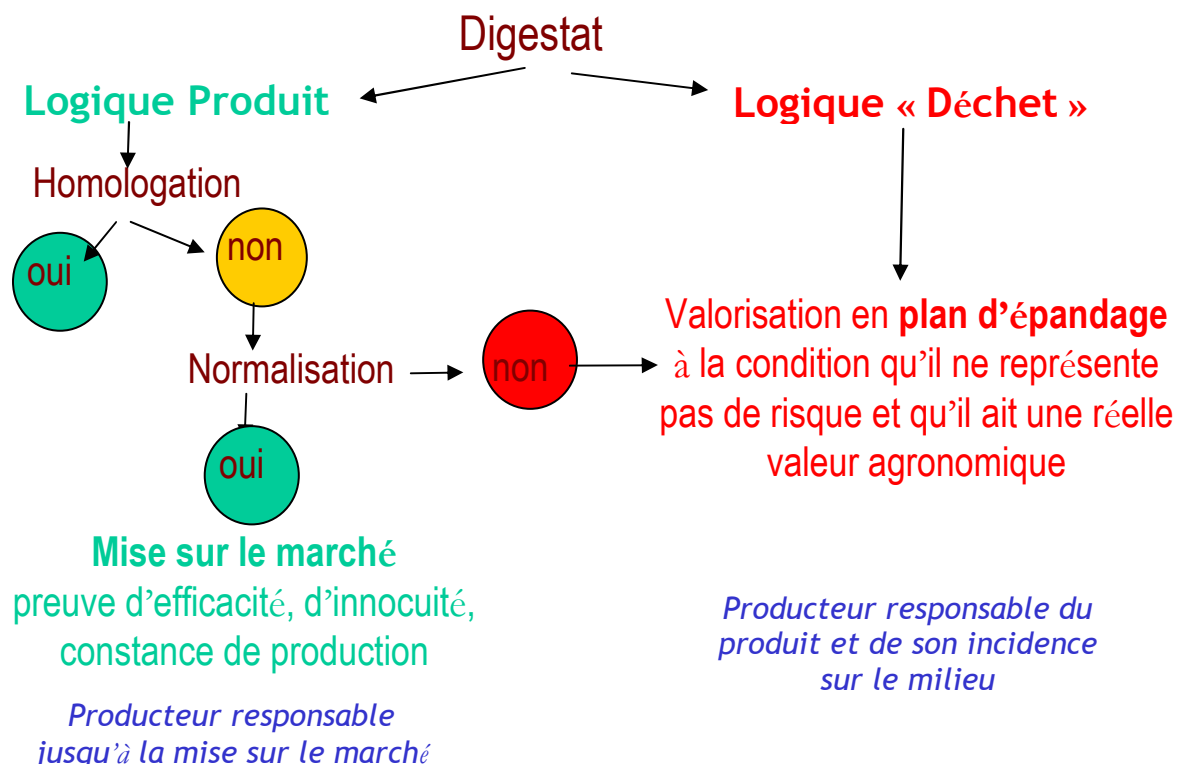


Figure 23 : Les différentes voies de valorisation du digestat

5.3 Cas de la normalisation

Il existe deux normes qui peuvent s'appliquer aux digestats :

- NF U 44-051 : Amendements organiques

- NF U 44-095 : Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux

Il faut cependant noter que seuls les **digestats compostés** peuvent entrer dans la composition d'amendements organiques normalisés (NF U 44-051 ou NF U 44-095).

Les principales spécificités de la norme 44-051 sont les suivantes :

- Rendue d'application obligatoire (arrêté du 21 août 2007): compost urbain – délai de 18mois, compost vert – délai de 6mois, écoulement des sacheries – 18 mois
- 5 dénominations accessibles aux digestats: fumiers/lisiers/fientes compostés, compost vert, compost de fermentescibles alimentaires et/ou ménagers,compost végétal, compost de matières végétales et animales.
- Nettement plus rigoureuse que l'ancienne version (décembre 1981)
- Introduit différents critères:
 - Critères de composition en éléments fertilisants (NPK)
 - Critères d'innocuité : E.T.M., C.T.O., inertes et impuretés
 - Critères microbiologiques
- Analyses sur le produit : correspondant aux critères + CBM/ISB + minéralisation C et N
- Analyses en routine selon le tonnage produit

La valorisation du digestat au travers la norme 44-051 demandera le respect de ces différentes mesures. Mais le texte précise que pour le digestat un « compostage caractérisé » est obligatoire. Selon la NF-U 44-051 le « **Compostage caractérisé** » des digestats est défini de la manière suivante :

- Ajout de matière végétale
- Processus de décomposition et de transformation contrôlés de produits organiques sous l'action de populations microbiennes évoluant en milieu aérobie qui se traduit par :
- augmentation de température
- perte masse et volume
- « humification » + degré maturité

Cette obligation de compostage pour les digestats nous paraît abusive et très pénalisante pour la filière méthanisation. En effet l'obligation d'imposer un compostage post-méthanisation est non seulement techniquement un contre sens mais également supprime les avantages que revêt la technologie anaérobie : faible empreinte foncière, rapidité du traitement, maîtrise des odeurs, bilan énergétique...

Il nous semble important de mieux caractériser le comportement du digestat en maturation aérobie. Ceci afin de dimensionner correctement l'étape post-méthanisation au niveau industriel. Il nous semble également important de pouvoir comparer les produits organiques finaux issus d'une filière de traitement par compostage et d'une filière de méthanisation. Cette comparaison doit permettre de mieux appréhender les différences entre ces produits, leurs efficacités et leurs innocuités. Des démarches sont en cours pour essayer de faire évoluer cette norme.

Partie II - Etude des possibilités de valorisation des fumiers de chevaux du parc équestre fédéral

1 Objectifs

Une campagne d'échantillonnage a été réalisée sur le site en respectant un protocole adapté. On se rapportera à l'annexe 1 pour plus de description.

Les résultats de la composition biochimique sont détaillés ci-après. Nous les comparerons avec des valeurs moyennes issues d'autres campagnes d'échantillonnage réalisées sur des centres équestres au niveau national.

Le fumier échantillonné a ensuite été utilisé pour mesurer la production de biogaz et évaluer son potentiel méthanogène. Les résultats sont discutés au chapitre 3.

Nous apporterons quelques commentaires sur les orientations possibles quant au projet de méthanisation des fumiers en chapitre 4.

2 Analyses du fumier du parc équestre

2.1 Analyse de la composition biochimique du fumier

2.1.1 Humidité et matière organique

Les analyses d'humidité et de matière organique sont données dans le tableau suivant.

Tableau 1 : composition du fumier en humidité, MS, MO

Paramètres		Fumier Parc équestre fédéral	moy.	mini	maxi	méd.
Humidité	% PB	56.6	58.6	16.8	73.8	66.3
Matière sèche	% PB	43.5	41.4	26.3	83.2	33.8
Matière minérale	% PB	10.8	6.3	3.8	10.8	5.9
Matière organique	% PB	32.7	35.1	19.8	77.2	28.5
Matière organique	% MS	75.3	82.8	75.3	92.8	83.4

Le fumier produit sur le site présente une humidité de 56.6% et une teneur en matière organique de 75.3%. En le comparant à l'échantillon national de fumiers, on note une forte hétérogénéité de l'humidité des fumiers. Les teneurs varient de 16,8% à 73,8%.

Les teneurs en matière organique varient de manière forte entre les échantillons de fumiers. On note un écart de presque 20 points. La teneur moyenne est de 82,8% ; ce qui est comparable à des valeurs de fumiers de bovin.

2.1.2 Macroéléments [NPK]

L'analyse des macroéléments fertilisants est donnée dans le tableau suivant.

Tableau 2 : composition du fumier en NPK

Paramètres	Fumier Parc équestre fédéral		moy.	mini	maxi	méd.
Azote total	g/kg de MS	10.4	11.2	7.6	15.4	11
Azote organique	g/kg de MS	9.4	9.6	7.0	11.5	9.35
Azote ammoniacal	g/kg de MS	1.0	1.9	0.0	4.0	1.2
Azote nitrique	g/kg de MS		0.6	0.0	1.7	0.037
Phosphore	g/kg de MS	7.45	7.4	2.3	10.3	8.075
Potassium	g/kg de MS	17.3	22.7	16.4	28.9	22.35

Les valeurs en NPK des fumiers du parc équestre restent dans la fourchette moyenne de l'échantillon national.

La teneur en azote total varie peu entre les différents fumiers. La valeur moyenne est de 11,2 g par kg de matière sèche. Ceci permet l'apport de fertilisant entre 4 et 6 kg par mètre cube. A noter qu'il s'agit principal d'azote organique pour lequel il faudra tenir compte d'un coefficient de minéralisation dans un plan d'épandage.

Les teneurs en phosphore sont un peu plus faibles que celles de l'azote. La teneur moyenne est de 7,4 g par kg de matière sèche. Les écarts sont faibles entre les échantillons de fumiers ; ce qui représente une valeur fertilisante située entre 2 et 3,5 kg par mètre cube.

Les teneurs en potassium sont élevées. On note des écarts plus importants entre les fumiers mais les tendances restent identiques. L'apport en potassium varie de 7 à 14 kg par mètre cube de fumier.

Les valeurs fertilisantes moyennes varient peu en fonction de la nature de la litière utilisée. A noter le potassium plus élevé lié au végétal lorsque l'on utilise une litière à base de paille de céréale.

Les valeurs fertilisantes moyennes varient également peu en fonction de l'humidité des fumiers.

La forme organique est largement majoritaire pour l'ensemble des échantillons de fumier. La teneur en azote ammoniacal varie de 0 à 4[°]/∞ . Seul le fumier 1 présente de l'azote nitrique. Ceci montre que la plupart des fumiers sont stockés en condition d'anaérobiose (présence quasi exclusive d'ammoniaque). D'un point de vue de la fertilisation et de l'utilisation de l'azote par des végétaux, les fumiers équins sont intéressants car ils amènent de l'azote organique qui sera minéralisé au cours du temps selon les conditions pédoclimatiques locales. Un coefficient d'efficacité azote en année 1 est à déterminer pour tenir compte de l'azote réellement disponible pour la croissance du végétal ; variable de 20 à plus de 40%.

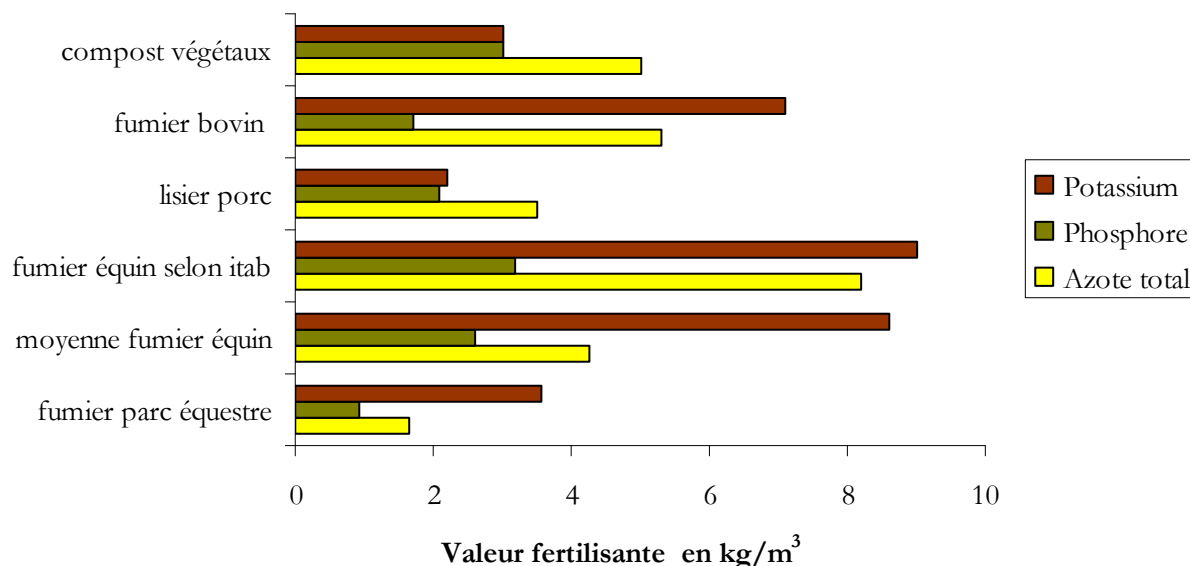


Figure 24 : Comparaison des compositions en NPK entre produits organiques

Les fumiers échantillonnés présentent des caractéristiques en terme de valeur fertilisante comparables aux autres matières organiques habituellement utilisées en épandage agricole. A noter une teneur moyenne en azote plus faible dans l'échantillon par rapport aux données de la littérature. A noter également la teneur élevée en potassium des fumiers équins. En utilisation comme fertilisant organique le fumier équin est à rapprocher des pratiques habituelles de fertilisation avec les fumiers bovin.

On note cependant que le fumier du centre équestre présente des teneurs en éléments fertilisants légèrement inférieures à la moyenne de l'échantillon de fumiers.

2.2 Eléments traces métalliques

Tableau 3 : composition du fumier en ETM

Paramètres		Fumier Parc équestre fédéral	moy.	Mini	maxi	méd.
chrome	mg/kg de MS	10	9.8	3.1	22.1	8.9
cuivre	mg/kg de MS	22.5	31.2	4.3	92.0	18.9
nickel	mg/kg de MS	4.5	4.2	1.5	8.5	4.05
zinc	mg/kg de MS	120	80.5	11.0	125.0	89.95
cadmium	mg/kg de MS	<seuil détection	<seuil détection	<seuil détection	<seuil détection	<seuil détection
plomb	mg/kg de MS	<seuil détection	<seuil détection	<seuil détection	<seuil détection	<seuil détection
mercure	mg/kg de MS	<seuil détection	<seuil détection	<seuil détection	<seuil détection	<seuil détection
sélénium	mg/kg de MS	<seuil détection	0.6	0.3	0.9	0.6
arsenic	mg/kg de MS	<seuil détection	<seuil détection	<seuil détection	<seuil détection	<seuil détection

Les teneurs en éléments traces métalliques sont faibles. Certains composés n'ont pu être détectés (au seuil de détection de l'analyse normée) comme le cadmium, le mercure, l'arsenic.

Les teneurs sont proches entre les différents échantillons de fumier. Le cuivre et le zinc sont les éléments majoritaires. Rappelons qu'il s'agit d'oligoéléments indispensables au bon fonctionnement des cellules vivantes (souvent des cofacteurs enzymatiques) et qu'il ne s'agit pas d'éléments toxiques. C'est la dose d'utilisation du produit qui engendrera éventuellement une toxicité.

Les teneurs en éléments traces métalliques dans l'échantillon de fumier du parc équestre restent très faibles. On peut comparer ces teneurs à celles imposées par la norme NFU 44-051 pour se rendre compte de la conformité du fumier

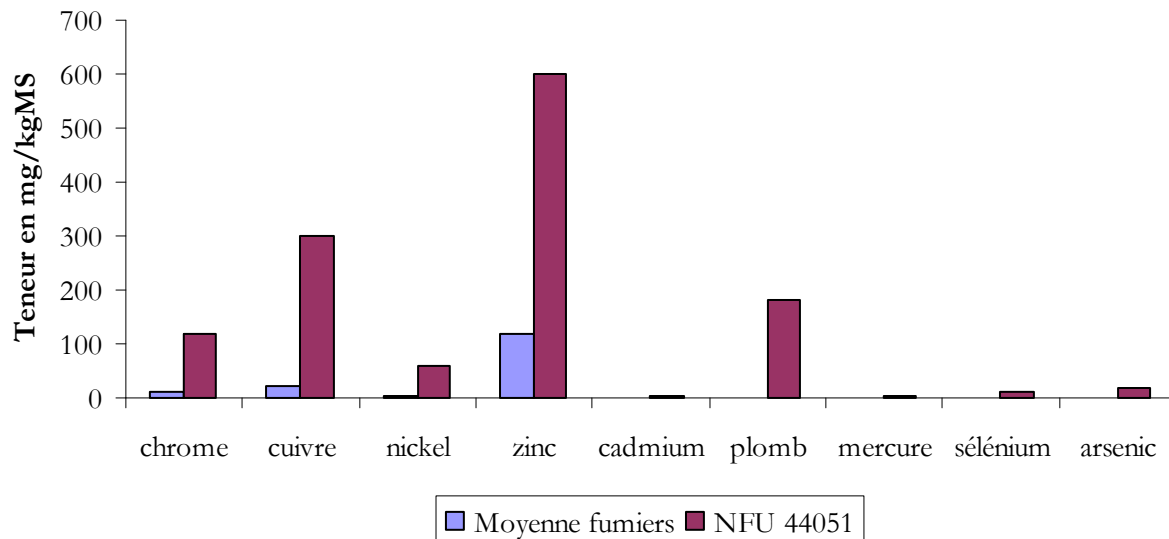


Figure 25 : Comparaison des teneurs en ETM du fumier et de la norme NFU44-051

2.3 Critères microbiologiques

Tableau 4 : analyse d'indicateurs pathogènes dans le fumier

		Fumier Parc équestre fédéral
Salmonelles	/25g MB	absence
Œufs d'helminthes viables	/1.5g MB	absence

Pour l'analyse de qualité du fumier nous nous sommes basé sur les exigences de la norme NFU 44-051 relative aux amendements organiques. Elle détermine les critères microbiologiques sur deux familles de pathogènes : les salmonelles et les d'helminthes viables. L'absence d'éléments pathogènes est indispensable pour envisager l'utilisation du produit se réfèrent à la norme.

Dans le cas des analyses réalisées, on constate l'absence de ces pathogènes dans le fumier du parc équestre. A noter que ces analyses ont également été négatives pour les autres fumiers échantillonnés au niveau national.

3 Potentiel méthanogène du fumier du parc équestre

3.1 Objectifs

La méthanisation permet de transformer une fraction de la matière organique en biogaz (mélange de méthane et de dioxyde de carbone). Ce biogaz peut ensuite être valorisé pour produire de la chaleur et/ou de l'électricité. Le produit final de méthanisation, appelé « digestat », peut être utilisé en tant qu'amendement / fertilisant organique.

Afin d'évaluer correctement un projet de méthanisation, l'une des premières étapes est de connaître la production de biogaz permise par les déchets produits. C'est l'objet des travaux qui ont été réalisés ci-après. Des tests de potentiel méthanogène ont été réalisés pour trois fumiers d'origine différentes : deux fumiers pailleux en provenance des sites de Lamotte-Beuvron (44) et Orléans (45), et un fumier de copeaux de bois en provenance de Chatenay-Malabry (92).

Ces résultats permettent de positionner l'intérêt du fumier du parc équestre de Lamotte Beuvron d'un point de vue de la faisabilité de méthanisation.

3.2 Matériel et méthode

Dans la suite, les produits soumis à analyse seront dénommés « substrats ».

Dans un premier temps, l'analyse des teneurs en matière sèche et en matière organique des substrats est réalisée. Pour la réalisation des tests de production de biogaz, un échantillon du substrat à tester est placé dans un réacteur batch d'une capacité de 500 mL en présence d'un inoculum microbien adapté.

Fermés hermétiquement (conditions anaérobies), ces fermenteurs sont maintenus à 37°C dans un bain thermostaté (conditions mésophiles), et sont agités régulièrement.

La production de biogaz et la composition en CH₄ et CO₂ (analyse par infrarouge) sont mesurées quotidiennement. Les volumes de gaz obtenus sont corrigés en température et en pression pour une expression des résultats de production en norme litre (conditions standard : 0°C et 1bar) par unité de masse de substrat.

Pour chaque substrat, deux répétitions sont effectuées.

Cinq valeurs définissant la dégradabilité du substrat en condition anaérobie sont alors déterminées :


- La production de biogaz (Nm³ biogaz / t PB ou Nm³ biogaz/t MO) ;
- Le potentiel méthanogène (Nm³ CH₄/t MO) ;
- Le taux de dégradation (% MO) ;
- Le temps pour 80 % de dégradation (jours) ;
- La teneur finale en méthane (% CH₄).

Les résultats sont présentés par substrat sous forme de « fiche produit ».

3.3 Résultats

Les fiches suivantes regroupent les résultats des analyses de la matière sèche et de la matière organique, ainsi que ceux des tests de potentiel méthanogène.

CARACTERISTIQUES SUBSTRAT

Nom :	FUMIER LAMOTTE-BEUVRON	
Origine :	FFE (44)	
Humidité :	65,9 %	
Matière Sèche ¹² :	34,1 % PB	
Matière Organique ¹³ :	79,8 % MS 27,2 %PB	
Observations :	Fumier pailleux	

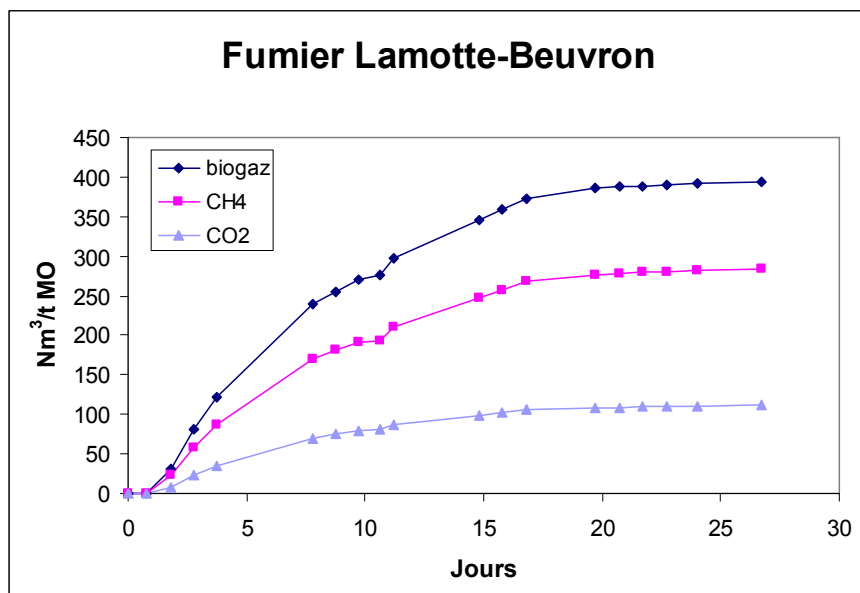
MODE OPERATOIRE

Nombre de répétitions :	2
Caractéristique de l'inoculum :	Digestat de méthanisation appauvri
Durée de l'essai :	27 jours
Température :	Mésophile (37°C)

RESULTATS

Production de biogaz :	108 Nm ³ /t PB ¹⁴
	395 Nm ³ biogaz/t MO
Potentiel méthanogène :	284 Nm ³ CH ₄ /t MO
Taux de dégradation :	41,2 % MO ± 5 %
Temps pour 80% de dégradation :	11 jours
Teneur en CH ₄ finale :	71,8 %

OBSERVATIONS



Ce test révèle une dégradation correcte du fumier de Lamotte-Beuvron : plus de 40% de la matière organique sont dégradés en 27 jours.

L'activité microbienne se met en place rapidement (la période de latence au cours de laquelle la biodégradation est négligeable n'est que de 2 jours) et se stabilise après une quinzaine de jours.

La teneur en méthane est bonne (plus de 70%) et se traduit par un potentiel méthanogène correct.


Ce fumier présente un intérêt pour un traitement par méthanisation : sa dégradation est rapide et le biogaz obtenu de bonne qualité pour sa valorisation.

¹² La matière sèche est déterminée à 105 °C (selon procédure et d'après norme NF U44-171)

¹³ La matière organique est déterminée à 550°C (selon procédure et d'après norme NF U44-160)

¹⁴ Nm³ : normo-m³, volume ramené aux conditions standards de pression et température (1 bar absolu et 273°K)

CARACTERISTIQUES SUBSTRAT

Nom :	FUMIER MALABRY	CHATENAY-	
Origine :	FFE (92)		
Humidité :	73,7 %		
Matière Sèche ¹⁵ :	26,3 % PB		
Matière Organique ¹⁶ :	75,0 % MS		
Observations :	19,7 %PB	Copeaux de bois	

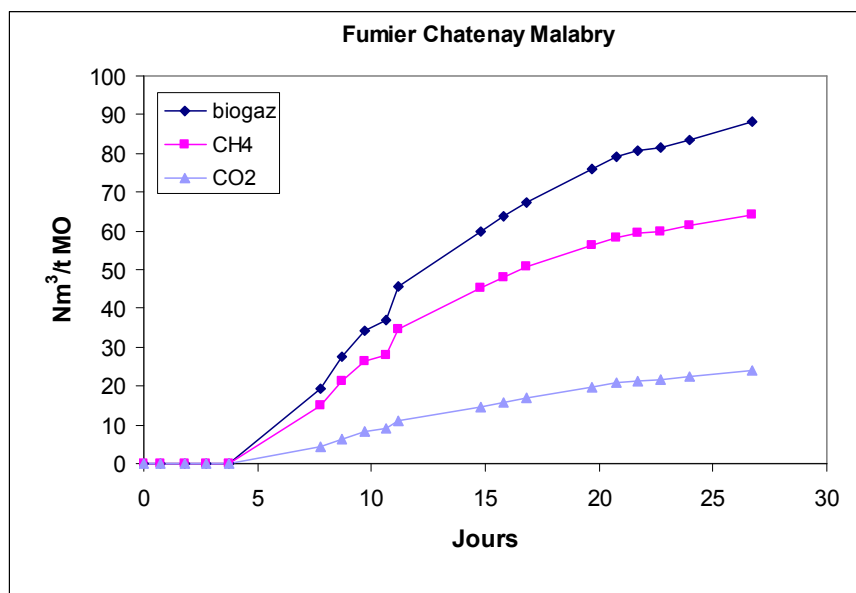
MODE OPERATOIRE

Nombre de répétitions :	2
Caractéristique de l'inoculum :	Digestat de méthanisation appauvri
Durée de l'essai :	27 jours
Température :	Mésophile (37°C)

RESULTATS

Production de biogaz :	17 Nm ³ /t PB ¹⁷
	88 Nm ³ biogaz/t MO
Potentiel méthanogène :	64 Nm ³ CH ₄ /t MO
Taux de dégradation :	9,1 % MO ± 5 %
Temps pour 80% de dégradation :	17 jours
Teneur en CH ₄ finale :	72,7 %

OBSERVATIONS



A l'inverse du précédent, ce test présente une dégradation faible et lente. Une période de latence d'environ 5 jours est observée. De plus, après 4 semaines, seuls 9% de la matière organique sont dégradés, se traduisant par un potentiel méthanogène faible, de l'ordre de 64 Nm³ CH₄ / t MO.

En revanche, la qualité du biogaz est bonne, avec une teneur en méthane de plus de 70%.


Ce substrat n'est pas très intéressant pour un traitement par méthanisation. La présence de copeaux de bois doit permettre d'envisager un compostage. Il pourrait également être utilisé pour permettre la maturation du digestat.

¹⁵ La matière sèche est déterminée à 105 °C (selon procédure et d'après norme NF U44-171)

¹⁶ La matière organique est déterminée à 550°C (selon procédure et d'après norme NF U44-160)

¹⁷ Nm³ : normo-m³, volume ramené aux conditions standards de pression et température (1 bar absolu et 273°K)

CARACTERISTIQUES SUBSTRAT

Nom :	FUMIER ORLEANS	
Origine :	FFE (45)	
Humidité :	71,8 %	
Matière Sèche ¹⁸ :	28,2 % PB	
Matière Organique ¹⁹ :	86,2 % MS 24,4 %PB	
Observations :	Fumier pailleux	

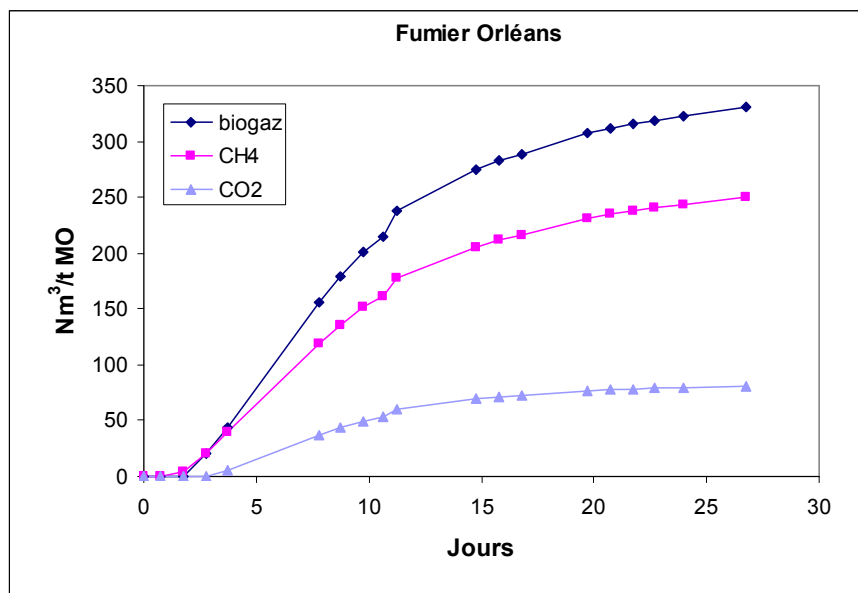
MODE OPERATOIRE

Nombre de répétitions :	2
Caractéristique de l'inoculum :	Digestat de méthanisation appauvri
Durée de l'essai :	27 jours
Température :	Mésophile (37°C)

RESULTATS

Production de biogaz :	81	Nm ³ /t PB ²⁰
Potentiel méthanogène :	331	Nm ³ biogaz/t MO
Taux de dégradation :	250	Nm ³ CH ₄ /t MO
Temps pour 80% de dégradation :	33,0	% MO ± 5 %
Teneur en CH ₄ finale :	11	jours
	75,5	%

OBSERVATIONS



Ce test montre une dégradation légèrement plus faible que celle du premier fumier pailleux. Après une période de latence de 2 jours, la cinétique est rapide pendant une douzaine de jours, permettant de dégrader un tiers de la matière organique en 4 semaines. Le potentiel méthanogène est correct (250 Nm³ CH₄/t MO), et le biogaz de qualité.

Comme le premier fumier pailleux, ce substrat pourra être un bon substrat pour la digestion anaérobie.

¹⁸ La matière sèche est déterminée à 105 °C (selon procédure et d'après norme NF U44-171)

¹⁹ La matière organique est déterminée à 550°C (selon procédure et d'après norme NF U44-160)

²⁰ Nm³ : normo-m³, volume ramené aux conditions standards de pression et température (1 bar absolu et 273°K)

3.4 Analyse et commentaires

Les résultats du test de potentiel méthanogène sur les fumiers de cheval sont hétérogènes comme le montre le tableau suivant :

Tableau 5 : Résultats du test de potentiel méthanogène sur trois échantillons de fumier de cheval.

Origine du fumier	Production de biogaz	Potentiel méthanogène	Taux de biodégradation anaérobie
	Nm ³ /t PB	Nm ³ CH ₄ / t MO	%MO
Parc équestre Lamotte – Beuvron	108	284	41
Chatenay – Malabry	17	64	9
Orléans	81	250	33

Cette hétérogénéité est liée à la composition de la litière utilisée : les fumiers pailleux présentent des potentiels méthanogènes importants tandis que le fumier à base de copeaux de bois présente un intérêt moindre en terme de production de biogaz.

Ainsi les fumiers pailleux seront plus intéressants pour une valorisation par méthanisation : les potentiels méthanogènes sont corrects, avec des valeurs voisines de 284 et 250 Nm³ CH₄ / t MO, et une teneur en méthane de plus de 70 %, tout à fait adaptée à la valorisation énergétique du biogaz.

En revanche, le fumier à base de copeaux sera moins intéressant pour être traité dans un digesteur. Par contre sa composition (litière humide comportant un support carboné) en fait un bon substrat pour du compostage. Pour cela, il conviendra de faire le nécessaire pour assurer une bonne oxygénation de l'andain, en portant particulièrement attention à la structure du produit et son humidité. Son utilisation pourrait également s'envisager pour permettre la maturation du digestat avec une proportion adéquate afin de permettre une bonne oxygénation des andains.

Afin de mieux visualiser les différents résultats obtenus dans le cadre de cet essai, les figures suivantes placent les fumiers échantillonnés (barre d'histogramme en vert) parmi d'autres testés selon le même protocole en fonction du potentiel méthanogène, et de la productivité en biogaz.

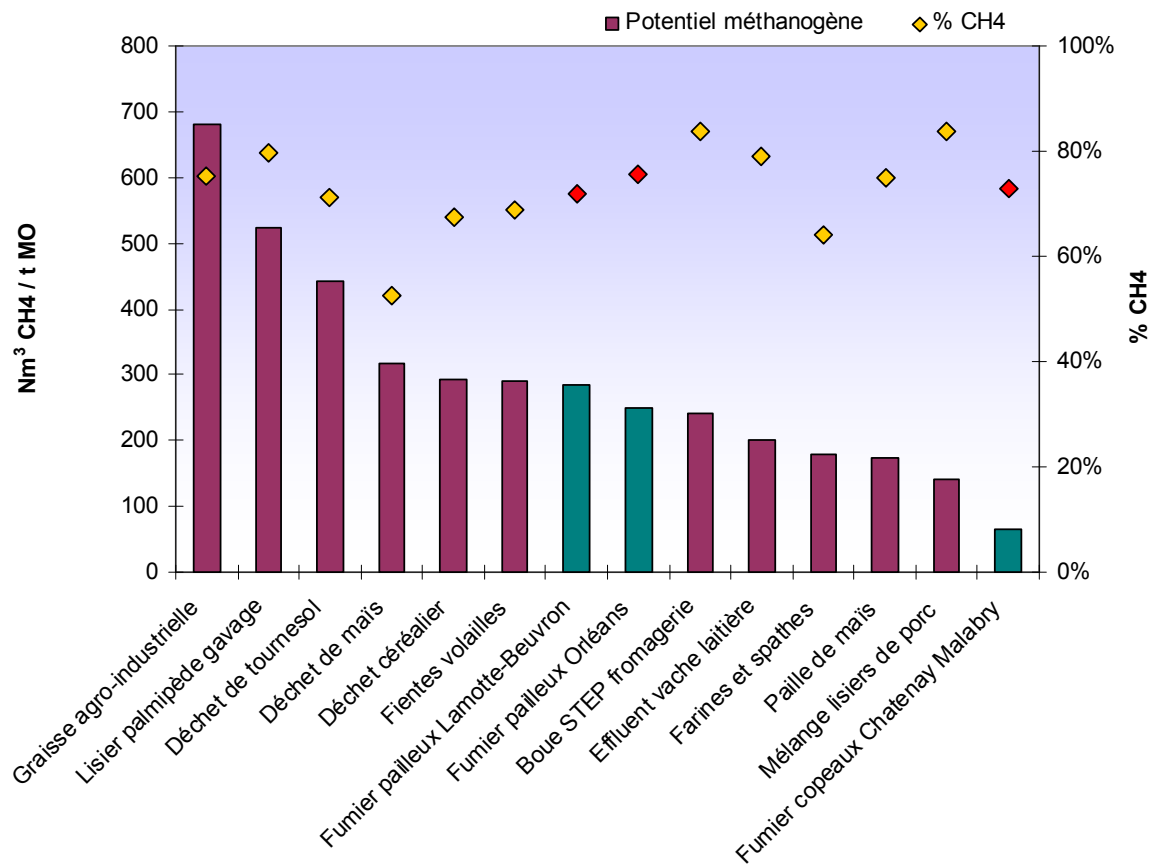


Figure 26 : Comparaison des potentiels méthanogènes de différents substrats d'origine agricole ou agro-alimentaire (d'après des données du plateau technique de l'APESA)

Les fumiers pailleux se situent en milieu de série des potentiels méthanogènes. Cela montre qu'ils peuvent constituer des substrats intéressants pour alimenter une unité de méthanisation et permettre une production de biogaz suffisante pour permettre d'atteindre un intérêt économique de rentabilité par la valorisation énergétique de ce gaz.

Le fumier de cheval à base de copeaux de bois présente la plus faible valeur de production sur notre gamme d'échantillons.

Ainsi le fumier disponible sur le Parc Equestre de Lamotte Beuvron présente un potentiel méthanogène intéressant qui justifie d'approfondir le projet d'installation d'une unité de méthanisation.

CONCLUSION

La méthanisation est une filière de valorisation de la biomasse qui est très intéressante pour au moins trois de ses aspects :

- Le traitement de produits organiques fermentescibles (limitation des odeurs, contrôle de la pollution...)
- La valorisation énergétique grâce au biogaz produit
- La valorisation du digestat (résidu de la fermentation) au niveau agricole ou pour la production d'un amendement organique commercialisable.

Des solutions techniques existent selon la configuration du site. Tous ces aspects ont pu être présentés dans la partie I du rapport.

Les fumiers produits sur le site du parc équestre de Lamotte Beuvron peuvent permettre d'envisager un projet d'unité de méthanisation. En effet la production de biogaz ramenée au produit brut permet de positionner le fumier équin pailleux en milieu de gamme (voir figures données en partie II du rapport). Le niveau d'humidité relativement élevé permet d'envisager un traitement sur des installations de type infiniment mélangé en veillant à une agitation adaptée à ce type de produit. La solution de codigestion (mélange des fumiers avec d'autres substrats) est tout à fait envisageable et doit permettre de trouver une optimisation dans le traitement des ces sous-produits d'élevage.

Les essais de potentiel méthanogène réalisés permettent de montrer l'intérêt de traiter ce fumier de cheval en méthanisation avec un objectif de valorisation énergétique du biogaz. Ces premiers résultats encourageants demandent à être poursuivis tant du point de vue technique (fonctionnement d'un digesteur en continu sur une base fumier de cheval afin de valider les paramètres de dimensionnement d'une unité de méthanisation) que du point de vue économique (réalisation d'une étude de faisabilité sur un ou plusieurs sites potentiels afin de terminer notamment les disponibilités des gisements, de dimensionner les installations et d'évaluer les investissements nécessaires, de réaliser l'étude économique de rentabilité...).

Ces résultats positifs permettent au Parc Equestre d'envisager de poursuivre le projet de méthanisation en approfondissant le projet notamment au travers une analyse approfondie de faisabilité sur site et en rapport avec l'environnement proche de Lamotte Beuvron.

Annexe

- Annexe 1 : Protocole d'échantillonnage des fumiers
- Annexe 2 : Test de potentiel méthanogène

Principe de l'échantillonnage

L'échantillon parfait n'existe pas. L'objectif est d'obtenir un échantillon le plus représentatif possible du fumier que l'on va utiliser pour l'essai de potentiel méthanogène. Nous considérerons un **lot** comme étant un volume suffisamment représentatif du produit destiné à être traité par méthanisation. Un lot pourra être identifié par exemple en fonction :

- Du mode d'élevage ou d'entretien des chevaux.
- De la période considérée.
- De tout autre paramètre pouvant avoir une influence sur l'hétérogénéité du fumier.

Le choix de l'identification du lot doit se faire par une personne compétente capable d'estimer l'hétérogénéité possible entre les fumiers selon les différents élevages concernés. Il est possible que cette hétérogénéité ne soit pas très importante, il s'agira alors de choisir le lot pour qu'il soit le plus représentatif possible de l'ensemble des sites de production considérés (par exemple selon le coproduit utilisé : paille, lin... ; la fréquence de changement de litière,...).

Méthode

La méthode est à renouveler pour la constitution de chaque échantillon (soit trois fois dans le cas de cette étude).

Prescriptions générales

- Prélever et préparer les échantillons aussi rapidement que possible en tenant compte des précautions requises pour qu'ils demeurent représentatifs du produit.
- Les instruments ainsi que les surfaces et les récipients destinés à recevoir les échantillons doivent être propres et secs.
- Stocker les échantillons au réfrigérateur (4°C) jusqu'au moment de l'envoi. La durée de stockage doit être la plus courte possible.
- La dimension du lot doit être telle que toutes les parties qui le composent puissent être échantillonnées.

Elaboration de l'échantillon global

Dans un premier temps, il s'agit d'effectuer un échantillon global pour chaque lot. Dans un premier temps il faut quantifier le volume du stock de produit (généralement il s'agit d'un tas plus ou moins haut et long) et déterminer l'emplacement des tranchées de prélèvement (il s'agit de faire des ouvertures dans le tas sur toute la hauteur et jusqu'au centre du tas) ; il s'agit d'effectuer une tranchée tout les 10 mètres maximum. Au niveau de chaque front de tranchée on effectue sur toute la hauteur des **prélèvements élémentaires** d'environ 2 litres. Les prélèvements élémentaires doivent être effectués à l'aide d'une griffe à trois dents. Le volume de chaque prélèvement doit être approximativement équivalent.

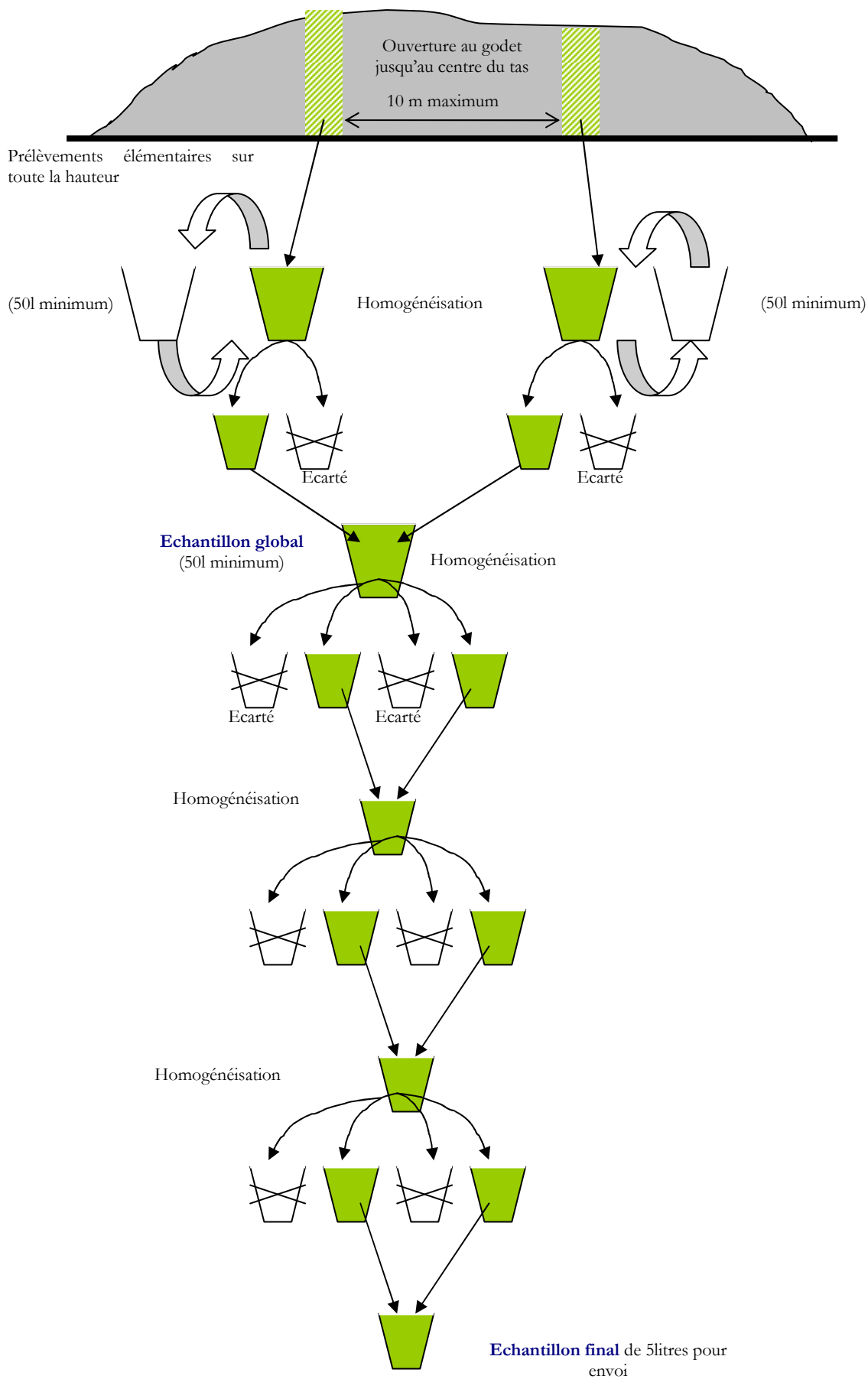
Les prélèvements élémentaires se font à différents points du front de tranchée. Déposer le contenu prélevé dans un récipient de 100 l (type poubelle) ou sur une bâche plastique. **L'échantillon global** doit représenter un volume d'environ 50 litres.

Elaboration de l'échantillon final

L'échantillon global donnera lieu, après réduction par quartage à l'obtention de **l'échantillon final** qui sera envoyé au laboratoire pour analyse. Le volume de l'échantillon final ne devra **pas être inférieur à 5l**.

Le schéma suivant illustre la démarche à mettre en oeuvre

Schéma de principe de l'échantillonnage d'un lot représentatif



Elaboration de la fiche d'échantillonnage

Pour chaque prélèvement d'échantillon, établir une **fiche d'échantillonnage** permettant d'identifier sans ambiguïté le lot échantillonné:

- nom de l'installation (ou du lieu) d'échantillonnage
- date de prélèvement ;
- identification du lot ;
- âge du produit depuis la mise en tas ;
- nom de la personne qui a échantillonné ;
- numéro de téléphone pour contact éventuel.

▪ **Conditionnement des échantillons finaux**

L'échantillon final doit être conditionné dans un récipient (seau plastique) ou dans un sac plastique (suffisamment solide pour ne pas être déchiré dans le transport/manutention). Le récipient sera étiqueté avec un numéro d'échantillon. Chaque récipient est à mettre dans un carton pour envoi et doit être accompagné de sa fiche de renseignements (fiche d'échantillonnage).

▪ **Envoi des échantillons**

L'envoi peut se faire par messagerie classique (type colissimo de La Poste, permet un suivi de la livraison) en s'assurant d'un délai de livraison inférieur à 48 heures.

Test de potentiel méthanogène

Objectif et domaine d'application

Le test de potentiel méthanogène permet de déterminer la production maximale de biogaz d'un échantillon de biomasse. On mesure la vitesse de production de biogaz (cinétique de fermentation) et la composition en méthane (CH₄) et dioxyde de carbone (CO₂). Ce test peut être réalisé sur différents échantillons de biomasse : effluents d'élevages (lisiers, fientes, fumiers...), déchets agroalimentaires (résidus ligno-cellulosiques, graisses, boues ...), déchets de collectivités (biodéchets, boues de STEP...), cultures énergétiques (plante entière, ensilage, foin...), tout autre résidu ou sous-produit organique.

Principe général

Les tests sont réalisés dans des réacteurs anaérobies d'une capacité de 500 ml. Fermés hermétiquement, les fermenteurs sont maintenus à 39°C dans un bain thermostaté et agités régulièrement (ou 55°C si flore thermophile). Chaque réacteur est muni d'un système d'enregistrement permettant la mesure du volume de biogaz produit au cours du temps ainsi que l'analyse de sa composition en CH₄ et CO₂.



Référence normative

Il n'existe pas une norme relative au test de potentiel méthanogène. La méthode mise au point s'appuie sur les références issues de la littérature scientifique et sur plus de 15 années de pratiques.

Informations pratiques

Pour s'assurer d'un bon déroulement de la méthanisation, on utilise un inoculum anaérobie adapté. L'essai de fermentation se poursuit jusqu'à observer une production de biogaz nulle. Trois essais sont réalisés pour chaque échantillon de biomasse. Moyenne et écart type sont établis. Les résultats sont donnés en volume de biogaz par unité de masse de produit exprimé par rapport au produit brut, à la matière sèche et à la matière organique. Les volumes de biogaz sont ramenés aux conditions normales de température et de pression et exprimés en normo-litre. La composition est donnée en pourcent de CH₄ et de CO₂. Sont calculés le degré de biodégradation anaérobie (en % de la matière organique initiale) ainsi que le pouvoir calorifique du biogaz (kWh/Nm³) et de la biomasse (kWh/t). La courbe de production est fournie ainsi qu'un positionnement du produit en terme de production de biogaz par rapport à une gamme d'échantillons.

Commentaire

Selon le produit étudié la quantité totale de biogaz produite par varier en fonction de la composition de la matière organique. Des différences plus ou moins importantes peuvent exister selon les produits dans la composition du biogaz et notamment la teneur en méthane qui impacte directement sur le pouvoir calorifique et donc sur l'énergie disponible valorisable. Ainsi la connaissance de la production réelle de biogaz (quantité et qualité) est importante pour valider l'étude de faisabilité d'un projet.

Exemple de rendu de résultat :

Courbe de production de biogaz de l'échantillon
(exemple d'un résidu de séchoir de graines - cas du colza)

