

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



LAVALEF

Département du Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

MEMOIRE DE MASTER

En Génie Chimique

Thème :

**Etude technico-économique d'un projet de
bio-méthanisation des déchets fermiers**

Présenté par :

➤ Melle Asma CHELHA

Sous la direction de :

➤ Mr R.BOUARAB, Professeur, ENP

➤ Mr T.AHMEZ ZAID, Professeur, ENP

Soutenue publiquement le (21/06/2016)

Composition du Jury :

Présidente	Mme R. DERRICHE	Professeur, ENP
Promoteur	Mr R.BOUARAB	Professeur, ENP
Co-promoteur	Mr T.AHMED ZAID	Professeur, ENP
Examinateur	Mr A. SELATNIA	Professeur, ENP
Examinatrice	Mme Y.TCHOULAK	MAA, ENP

ENP 2016

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



LVALEF

Département du Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

MEMOIRE DE MASTER

En Génie Chimique

Thème :

**Etude technico-économique d'un projet de
bio-méthanisation des déchets fermiers**

Présenté par :

➤ Melle Asma CHELHA

Sous la direction de :

➤ Mr R.BOUARAB, Professeur, ENP

➤ Mr T.AHMEZ ZAID, Professeur, ENP

Soutenue publiquement le (21/06/2016)

Composition du Jury :

Présidente	Mme R. DERRICHE	Professeur, ENP
Promoteur	Mr R.BOUARAB	Professeur, ENP
Co-promoteur	Mr T.AHMED ZAID	Professeur, ENP
Examineur	Mr A. SELATNIA	Professeur, ENP
Examinatrice	Mme Y.TCHOULAK	MAA, ENP

ENP 2016

ملخص :

تساهم مخلفات الحيوانات لظاهرة الاحتباس الحراري بسبب انبعاثات الميثان التي تحدث في المباني الماشية وأثناء التخزين خارج. الهضم اللاهوائي لذلك تحديا للخطوط الرئيسية للطاقة المتجددة، للحد من انبعاثات الغازات المسببة للاحتباس الحراري ودخل إضافي. وتهدف هذه الدراسة إلى المساهمة في قطاع الثروة الحيوانية، والجوانب التقنية والبيئية والاقتصادية الهضم اللاهوائي لتقييم إمكاناتها وتعزيز تطوير لها.

الكلمات المفتاحية : الهضم اللاهوائي، والغاز الحيوي الزراعي، روث الماشية، التوليد المشترك للطاقة

ABSTRACT

Animal waste contributes to global warming because of the methane emissions that occur in livestock buildings and during storage outside. Therefore anaerobic digestion is a challenge for the livestock sectors with the aim of simultaneously producing renewable and clean energy, and reducing emissions of greenhouse gases. This option has another advantage since it can provide an additional income for the farmers. This study aims to contribute to the livestock sector, from the technical, environmental and economic aspects of anaerobic digestion in order to assess the wastes potential as a clean energy source.

Keywords: Anaerobic digestion, agricultural biogas, livestock effluents, cogeneration.

RESUME

Les déjections animales contribuent au réchauffement climatique du fait des émissions de méthane qui se produisent au niveau des bâtiments d'élevage et durant leur stockage à l'extérieur. La méthanisation représente un enjeu conséquent pour les filières d'élevage en matière de production d'énergie renouvelable, de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de complément de revenu. La présente étude vise à apporter à la filière d'élevage, les éléments techniques, environnementaux et économiques de la méthanisation en vue d'évaluer son potentiel et de favoriser son développement.

Mots-clés : Digestion anaérobie, méthanisation agricole, effluents d'élevage, cogénération

DEDICACES

« A ma très chère mère »

Affable, honorable, aimable

Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.

Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

REMERCIEMENTS

Je remercie d'abord Dieu tout puissant de m'avoir donné la force, le courage, la santé et la patience pour accomplir ce travail.

Je tiens à adresser mes vifs remerciements à Monsieur **R.BOUARAB**, Professeur à l'ENP, de m'avoir orienté dans le but de mener à bien ce travail et d'avoir accepté de m'encadrer tout au long de cette étude.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à Monsieur **T.AHMED ZAID**, Professeur à l'ENP, pour avoir encadré mon travail et pour ses précieux conseils.

J'adresse mes sincères remerciements au Professeur **R.DERRICHE** d'avoir fait l'honneur de présider le jury ainsi qu'à Madame **Y.TCHOULAK** et Monsieur **A.SELATNIA** de faire partie du jury et d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Pour **ma famille**, un simple merci ne suffit pas, je tiens à leur transmettre toute ma gratitude et ma reconnaissance pour leur encouragement, leur aide et réconfort.

Une mention spéciale pour ma camarade, **Sara Anfel DRIS** avec qui j'ai partagé de très bons moments, que cette amitié dure.

TABLE DE MATIERE

RESUME.....	2
DEDICACES	3
REMERCIEMENTS	6
TABLE DE MATIERE.....	5
NOMENCLATURE.....	7
TABLE DE FIGURES	8
LISTE DES TABLEAUX.....	9
INTRODUCTION GENERALE	10
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	13
1. Bio-méthanisation.....	13
1.1 Historique de la digestion anaérobie	13
1.2 Le méthane atmosphérique.....	13
1.3 Les déchets organiques méthanisables	14
1.4 Les différentes étapes de la digestion anaérobie	16
1.5 Les produits de la méthanisation	18
1.5.1 Biogaz.....	18
1.5.2 Digestat.....	20
1.6 Types des réacteurs et applications	21
1.7 Facteurs affectant la stabilité du processus de biogaz.....	23
2. La méthanisation à la ferme	27
2.1 Les substrats et les co-substrats de la méthanisation agricole.....	27
2.2 Les intérêts de la méthanisation à la ferme	31
2.3 Schéma général d'une installation de méthanisation agricole	32
2.3.1 Technologies utilisées	33
2.3.2 L'utilisation et valorisation du biogaz	36
2.3.3 Valorisation du digestat	38
2.3.4 La nécessité d'un suivi quotidien	39
2.3.5 L'amélioration des performances des installations	40

3.	Le montage de projet de méthanisation agricole	41
3.1	Les stratégies relatives aux installations de production de biogaz.....	41
3.2	Les facteurs de succès d'un projet	43
3.2.1	La qualification du gisement	43
3.2.2	La garantie des débouchés.....	43
3.2.3	La faisabilité technique.....	44
3.3	Point règlementaire	44
3.4	Analyse économique	45
	Etude technico-économique d'un projet de méthanisation à la ferme.....	47
1.	Localisation du projet	47
2.	Gisement du projet.....	47
3.	Etude technique du projet	49
3.1	Technologie utilisée	49
3.2	Paramètres de dimensionnement.....	50
3.3	Biogaz produit.....	51
4.	Etude économique.....	54
4.1	Frais d'investissement.....	54
4.2	Frais de fonctionnement.....	54
4.3	Recettes	55
5.	Conclusion	58
	CONCLUSION GENERALE	58
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	60

NOMENCLATURE

GES : Gaz à effet de serre

KWh é : kilo Watt heure électrique (unité d'énergie électrique)

KWh th : kilo Watt heure thermique (unité d'énergie thermique)

MS : Matière sèche ; déterminée par séchage à 105°C

Nm³ : Normal m³ ; correspond à un volume occupé par le gaz dans les conditions normales, c'est-à-dire à 273.15°K et 101325 Pa.

PCI : le Pouvoir Calorifique Inférieur d'un gaz (rapporté au volume de gaz sec) est l'énergie thermique (chaleur) minimale récupérable lors de la combustion.

pH : Potentiel d'Hydrogène.

TABLE DE FIGURES

Figure 1 : Schéma définissant les des produits/déchets méthanisables.....	15
Figure 2 : Grandes étapes de la digestion anaérobie. Tiré de Godon (2008, p. 62)	16
Figure 3: Exemple de potentiel méthanogène de différentes matières [18].....	29
Figure 4: Schéma général d'une installation de méthanisation	32
Figure 5: Unité de méthanisation agricole mésophile en infiniment mélangé.....	35
Figure 6: Digesteur type piston pour traiter des déchets agricoles	36
Figure 7: Schéma de la mise en œuvre de digesteurs en discontinu	36
Figure 8: Schéma de l'installation de l'unité de méthanisation	50
Figure 9: Rendement moyen d'une cogénérateur	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Composition moyenne du biogaz selon son origine.....	18
Tableau 2 Proportion de H ₂ S dans le biogaz selon le type de substrat [15].....	24
Tableau 3: Quelques dispositifs pour améliorer la performance des installations.....	40
Tableau 4: Les stratégies relatives aux installations de production de biogaz en fonction de leur capacité [22].....	41
Tableau 5: Production moyenne de déjection par espèce	47
Tableau 6 Gisement disponible selon les hypothèses retenues pour ce projet.....	48
Tableau 7 Potentiel énergétique moyen par type de déchet	48
Tableau 8: Production annuelle de biogaz du gisement.....	49
Tableau 9: Caractéristiques énergétiques du projet.....	52
Tableau 10: Frais d'investissement du projet	54
Tableau 11: Frais de fonctionnement	55

INTRODUCTION GENERALE

Les énergies renouvelables, en Algérie, n'ont pas connu une large utilisation. Elles sont plutôt confinées à l'état expérimental mise à part quelques timides applications dans le domaine de l'énergie photovoltaïque. Cette situation est due partiellement à la disponibilité des ressources énergétiques fossiles, à l'absence d'un cadre législatif gérant ce secteur sans oublier le manque d'implication politique et sociale vis à vis de la protection de l'environnement.

Actuellement, l'importance du coût de la consommation énergétique, la promulgation d'une loi pour la mise en place d'une politique nationale de maîtrise de l'énergie et la prise en charge des problèmes de l'environnement favorisent le recours à l'utilisation des énergies renouvelables. Parmi les différentes sources énergétiques renouvelables utilisées figurent celle de la biomasse, qui constitue un gisement en continuelle augmentation et présente une très large diversité de composition. Leur exploitation pour la production énergétique est d'autant plus intéressante qu'elle intervient également dans la préservation de l'environnement. C'est le cas du biogaz qui est directement utilisable ou transformé à travers la co-génération électrique.

La production d'énergie à partir de la matière organique de diverses origines : matière végétale, déjections animales,..., au moyen de procédés de fermentation anaérobie dans des digesteurs appropriés, permet une meilleure gestion des déchets, une préservation de l'environnement et un développement ainsi qu'une diversification des ressources énergétiques. Par ailleurs, cette matière organique, au niveau local, permettra de produire de l'énergie à moindre coût pour la cuisson, le chauffage, l'éclairage, et des engrais à haut potentiel fertilisant comme amendements pour les terres agricoles.

La production de biogaz dans le monde :

Selon « Planetoscope » une plateforme virtuelle qui calcule des statistiques mondiales relatives aux usages des énergies renouvelables par tout dans le monde, estime que la production mondiale de biogaz est en nette croissance de 7,6% par an. Une continuité de progression de 50,516 GWh à 130,321 GWh est prévue en 2025 [1].

Sur le marché mondial, l'Allemagne et les États unis prédominent avec des évolutions en production respectivement de 18,244 (GWh) en 2012 à 28,265 GWh en 2025 et de 9,072 GWh en 2012 à 20,936 GWh en 2025 [1].

La production de biogaz en Algérie :

Historiquement la production du biogaz en Algérie remonte à l'ère coloniale. En effet, les colons industriels ont utilisé le biogaz issu de la fermentation des déchets de bovins, conçu dans les années 50 par l'Institut National Agronomique (INA) afin de faire fonctionner leurs véhicules agricoles [2].

En ce qui concerne la production actuelle du biogaz en Algérie aucune estimation n'a été faite à titre principal. Néanmoins, certains ont été faits à titre d'expérimentation par le Centre de Développement des Énergies renouvelables (CDER) afin de mettre en évidence la faisabilité technique de ces projets en Algérie [2].

La mise en place d'un système de production du biogaz constitue un alignement stratégique dans le développement socio-économique du pays.

Dans ce travail de recherche, il s'agit de valoriser la matière organique générée par les activités agricoles à travers l'utilisation des déjections animales (bouses de bovins, fientes de volailles, crottins d'équidés,...) et résidus de culture en tant que substrats pour la production de biométhane, et par la suite l'utilisation de la matière organique comme engrais agricoles de très forte valeur énergétique.

La thèse est organisée en deux chapitres, en plus d'une introduction et une conclusion générale. Le premier chapitre constitue une synthèse bibliographique, expliquant, dans un premier lieu, le principe et différentes étapes de la méthanisation, un historique de sa mise en œuvre est présenté, ainsi que les différents types de déchets organiques qui peuvent être valorisés par ce procédé. De même, les principaux paramètres qui peuvent influencer le phénomène de la digestion anaérobie ainsi que les paramètres qui peuvent le contrôler sont traités. Dans un second lieu, une énumération des principales étapes d'un montage de projet de méthanisation à la ferme est développée, donnant les différentes stratégies développées avec quelques données économiques ainsi qu'un aperçu sur la réglementation algérienne.

Dans le second chapitre, une pré-étude simple de faisabilité d'un projet de méthanisation agricole est développée, expliquant l'intérêt technique et économique d'un projet de méthanisation traitant des déchets fermiers d'élevage et de résidus de culture.

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Bio-méthanisation

La biométhanisation, aussi appelée méthanisation ou digestion anaérobie, est la décomposition en l'absence d'oxygène de la matière organique. C'est un processus naturel fait par diverses populations de micro-organismes présents dans une multitude d'environnements. Dans la nature, on peut observer ce phénomène partout où il y a de la matière organique et une quantité insuffisante d'oxygène, comme dans les marais, les rizières et même dans le système digestif des mammifères et des insectes. Cette dégradation produit le biogaz, un gaz similaire au gaz naturel, formé principalement de méthane et de CO₂ [3]

1.1 Historique de la digestion anaérobie

Ce processus métabolique est l'un des plus anciens à être développés par les organismes. Il devait être présent il y a longtemps, lorsqu'il n'y avait pas massivement d'oxygène dans l'atmosphère et que la Terre était un milieu essentiellement réducteur. Des études estiment l'apparition des organismes méthanogènes entre -4,11 et -3,78 milliards d'années passées [4].

La production de méthane à partir de la matière putrescible est connue depuis des siècles. Vers 1630, Van Lemond découvre que la fermentation de la matière organique dégage un gaz inflammable. En 1776, Alessandro Volta démontre que le gaz émis par les marais est combustible. En 1787, Lavoisier prouve que ce gaz inflammable est le « gas hidrogenium carbonatrum », c'est-à-dire le même gaz qui sera appelé, à partir de 1865, méthane [5]. C'est probablement à cause de cette origine que le méthane est aussi connu comme « gaz des marais ». Si cette émission de CH₄ dans les marais est connue depuis longtemps, le rôle des micro-organismes dans ce processus n'a été découvert que bien plus tard. D'ailleurs, la compréhension complète de ce processus est, encore aujourd'hui, loin d'être achevée [6].

1.2 Le méthane atmosphérique

Outre son importance comme gaz combustible, le méthane est aussi un très important gaz à effet de serre (GES). Avec un temps de résidence d'environ 12 ans dans l'atmosphère et

une concentration, en 2005, de 1,774 ppm, il est considéré comme le deuxième gaz responsable du réchauffement du globe, tout de suite après le CO₂ [7].

Il est important de souligner qu'un kilogramme de méthane a une influence 21 fois plus importante qu'une même quantité de CO₂ pour le réchauffement climatique [5].

Le méthane atmosphérique a une origine essentiellement biologique, soit naturelle ou provoquée par l'homme. De 70 à 80 % des émissions totales de ce gaz sont causés par des microorganismes, dont les sols inondés et l'élevage sont les principaux responsables.

Les 20 à 30 % restants proviennent de l'exploration et de l'utilisation de combustibles fossiles, de la combustion de biomasse et des fuites de méthane géologique par fissures ou par volcans [4].

Les sources anthropiques représentent de 60 à 70 % des émissions globales. L'agriculture est l'activité la plus importante, étant responsable pour 20 à 50 % des émissions à cause des élevages des ruminants et des rizières. L'exploration minière, de pétrole et de gaz, contribue pour 10 à 20 % du total de méthane atmosphérique [4].

Quant aux déchets, ils ont une contribution allant jusqu'à 5 % des émissions mondiales de GES. De cette quantité, le méthane émis par des sites d'enfouissement est la source la plus importante, suivie par les émissions de ce gaz dues aux eaux usées. Dans ce calcul ne sont pas prises en compte les émissions causées par le transport des matières, mais seulement par les gaz émis directement par les rejets [8].

1.3 Les déchets organiques méthanisables

En général, presque toute la matière organique non-toxique peut être traitée par méthanisation, sauf la matière ligneuse et fibreuse comme le bois. Chaque matière n'est pas aussi facilement méthanisable qu'une autre et, en fonction de la concentration en composants organiques, la production potentielle de méthane est différente d'un produit frais à l'autre. Le taux de matière sèche distingue les produits méthanisables liquide des produits méthanisables solides.

Le schéma ci-dessous, **figure 1**, met en évidence les différentes sources de produits/déchets méthanisables.

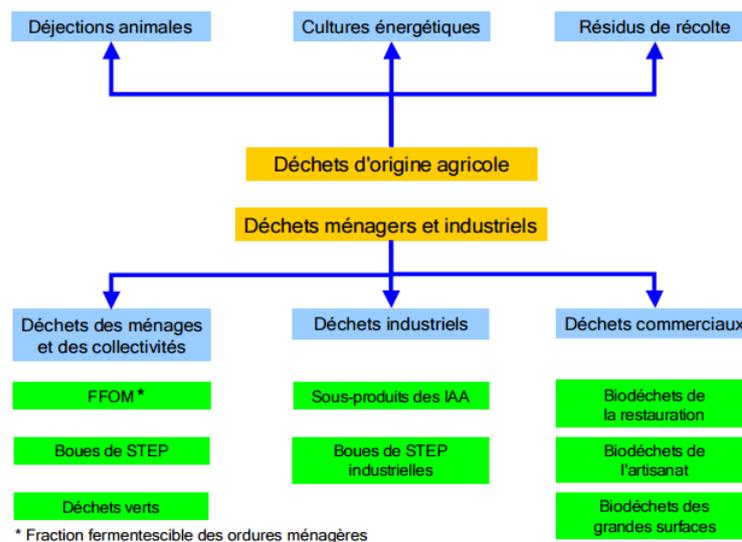


Figure 1 : Schéma définissant les des produits/déchets méthanisables

Deux groupes principaux pourraient être définis, notamment les déchets ménagers/industriels et les déchets d'origine agricole. Ceux-ci se subdivisent en déjections animales, en cultures énergétiques et résidus de récolte. Les 3 sous-groupements des déchets ménagers et industriels sont les déchets des ménages et des collectivités, les déchets industriels et les déchets commerciaux.

Il faut noter que, les déjections animales seules ne sont pas des matières à très fort potentiel méthanogène. En revanche, elles apportent les bactéries nécessaires à la dégradation de la matière organique et favorisent la stabilité de la digestion anaérobie. Les cultures et résidus de cultures sont faciles à stocker et ont un bon potentiel méthanogène du fait de leur teneur en carbone élevée et de leur facilité à être assimilées par les bactéries.

Les déchets agro-alimentaires, quant à eux, ils représentent un fort potentiel méthanogène mais obligent à mettre en place une phase d'hygiénisation pré digestion afin de garantir l'innocuité du futur digestat et de protéger la flore bactérienne du digesteur.

Pour ce qui est des déchets issus des collectivités, ils sont également intéressants du point de vue du potentiel méthanogène mais ils nécessitent une bonne gestion du tri en amont afin de garantir l'absence d'éléments non fermentescibles dans le digesteur (plastique, métaux, ligneux). Une réelle dynamique territoriale doit être mise en place pour que les déchets des collectivités puissent être valorisés.

1.4 Les différentes étapes de la digestion anaérobie

La digestion anaérobie se déroule selon une succession de quatre étapes distinctes, chacune avec sa population microbienne caractéristique. Les extrants produits par chaque population deviennent les intrants pour la population suivante. De cette façon, les molécules complexes sont métabolisées jusqu'à leur minéralisation, c'est-à-dire leur transformation en méthane et en CO₂. Ces étapes sont : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse [8]

La **figure 2** illustre les diverses étapes de la digestion anaérobie :

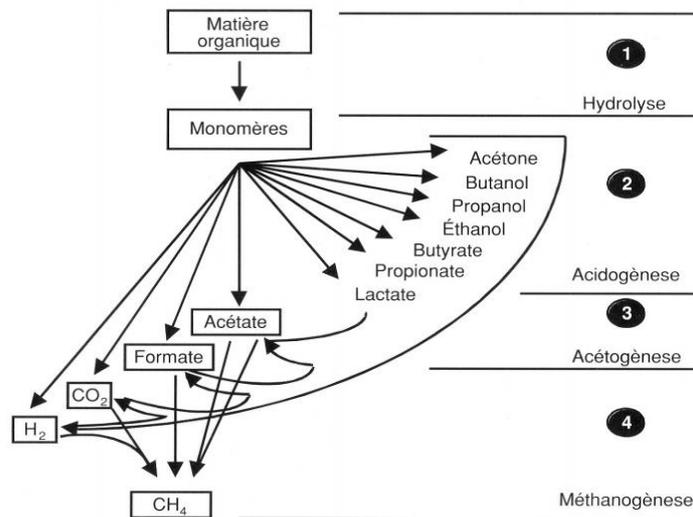


Figure 2 : Grandes étapes de la digestion anaérobie. Tiré de Godon (2008, p. 62)

1.4.1 Hydrolyse

Lors de l'hydrolyse, les macromolécules organiques sont transformées en produits plus petits. En ce sens, les composés de haut poids moléculaire, comme les polysaccharides, les lipides, les protéines et les acides nucléiques, sont convertis en substances simples. Cela donne origine aux monosaccharides, comme le glucose, aux acides gras, aux acides aminés et aux bases azotées [8].

1.4.2 Acidogénèse

Dans l'acidogénèse, les monomères de l'étape antérieure sont convertis en acides gras volatils, en alcools, en acides organiques, en hydrogène et en CO₂. C'est une phase qui se

déroule entre 30 et 40 fois plus rapidement que l'hydrolyse. À la fin s'y retrouvent l'éthanol et les acides acétique, propionique, butyrique, valérique et lactique.

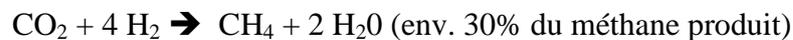
1. 4. 3 Acétogénèse

L'acétogénèse unifie et simplifie la filière chimique, car les substances originaires des processus antérieurs y sont transformées en acétate, en H₂ et en CO₂. Cette étape précède celle de la méthanogénèse.

1. 4. 4 Méthanogénèse

C'est la dernière étape de la minéralisation des substances organiques. Ici, les acétates, les formates, le H₂ et le CO₂ sont transformés en méthane. Habituellement, cette phase est la plus délicate de la digestion anaérobie, parce que les organismes méthanogènes sont plus sensibles aux variations de pH et ont un taux de croissance plus lent que celui des organismes des autres étapes [9].

Réduction du CO₂ :



Décarboxylation de l'acide acétique :



1. 4. 5 Autres réactions

D'autres réactions se déroulent durant la digestion anaérobie, en utilisant les substances non carbonées pour les réactions. C'est le cas de l'utilisation des sulfates comme source d'énergie pour l'oxydation des acétates, de l'éthanol, du propionate et du butyrate. Ces réactions créent l'ion hydrogénosulfure HS⁻ comme sous-produit. De plus, des réactions d'oxydation de l'ammonium et de dénitrification peuvent se produire en milieu anaérobie, dégageant l'azote moléculaire N₂. Finalement, certaines molécules xénobiotiques, des micropolluants, peuvent être hydrolysées en conditions anaérobies, ce qui fait de ce processus une étape importante pour le traitement de la pollution récalcitrante [8].

1.5 Les produits de la méthanisation

Lors de la transformation de la matière organique, la digestion anaérobie produit le biogaz et le digestat – la partie résiduelle du processus. Si le biogaz a une importante fonction comme source d'énergie, le digestat, quant à lui, peut être utilisé comme amendement des sols.

1.5.1 Biogaz

A. Composition du biogaz

La composition du biogaz varie selon les matières digérées et le temps de traitement. Habituellement, la concentration de méthane se situe entre 50 et 80 %, 60 % étant la valeur la plus fréquemment rapportée par les usines. En plus du méthane, l'autre gaz principal formé est le CO₂. Les gaz présents en faibles concentrations sont le H₂S, le NH₃ en plus de la vapeur d'eau jusqu'à son point de saturation. Ces derniers gaz doivent être traités selon l'utilisation prévue pour le biogaz afin de ne pas endommager les équipements [9].

Tableau 1 : Composition moyenne du biogaz selon son origine [10]

Composants	Décharge d'ordures ménagères (MO 80%) <i>production naturelle sans aspiration</i>	Décharge d'ordures ménagères (MO 80%) <i>production forcée avec aspiration</i>	Décharge d'ordures ménagères (50%-50%) <i>production forcée avec aspiration</i>	Ordures ménagères triées (en digesteur)	Boues de stations d'épuration (en digesteur)	Lisier de bovins ou d'ovins (en digesteur)	Distillerie (en digesteur)
CH₄ % vol	50 - 58	30- 55	25 - 45	50 - 60	60 - 75	60 - 75	68
CO₂ % vol	25 - 34	22 - 33	14 - 29	38 - 34	33 - 19	33 - 19	26
N₂ % vol	18 - 2	26 - 6	49 - 17	5 - 0	1 - 0	1 - 0	-
O₂ % vol	1- 0	8 - 2	8 - 5	1 - 0	< 0,5	< 0,5	-
H₂O % vol	4 (à 30°C)	4 (à 30°C)	4 (à 30°C)	6 (à 30°C)	6 (à 30°C)	6 (à 30°C)	6 (à 30°C)
Total % vol	100	100	100	100	100	100	100

B. Stockage du biogaz [10]

A l'échelle de la ferme, le biogaz peut être stocké dans des gazomètres à basse pression, soit à l'eau (type cloche), soit sec (type ballon gonflable).

A l'échelle industrielle, le méthane peut être liquéfié et transporté en l'état (méthanier) ou mis en réserve dans des poches souterraines, tout comme le gaz naturel.

C. Utilisations du biogaz

Plusieurs utilisations sont envisagées pour le biogaz. Il peut être simplement brûlé, si les seuls buts de la digestion sont le traitement et la stabilisation des matières putrescibles.

Cette destruction du méthane est importante à cause de la puissance de réchauffement du méthane comme GES, donc sa transformation en CO₂ à plus faible puissance de réchauffement est souhaitable. En revanche, l'utilisation de son énergie à des fins utiles est fréquemment mise en œuvre. Dans les petites usines, sa combustion est employée pour le chauffage du système. Dans les usines de plus grande taille, où l'investissement le justifie, la cogénération est beaucoup plus fréquente. Dans ces centres, le biogaz est transformé en électricité et en chaleur, qui sont utilisées pour l'usine et/ou sont commercialisées. Il est important de noter que la chaleur est un sous-produit de la génération d'électricité par les unités génératrices, donc la production de ces deux sources d'énergie n'est pas concurrentielle, mais complémentaire [8].

Finalement, une autre utilisation importante du biogaz est sa purification et son emploi comme gaz naturel. Pour cela, le CO₂ et les autres gaz contaminants doivent être éliminés afin d'augmenter le taux de méthane du gaz. Ensuite, il est comprimé puis inséré dans le réseau de distribution ou employé comme combustible pour les voitures.

D. Epuration du biogaz

A la sortie du digesteur, le biogaz renferme, outre le méthane, des quantités appréciables de gaz carbonique et d'hydrogène, des traces d'azote, d'oxyde de carbone, sulfure d'hydrogène, d'ammoniac ainsi que hydrocarbures et de l'eau.

L'épuration du biogaz permet de [11] :

- Améliorer le calorifique ;
- Diminuer le volume stockage.
- Supprimer l'effet corrosif dû à la présence de l'H₂S, CO₂ et l'H₂O ;
- Supprimer les mauvaises odeurs dus à la présence d'H₂S.

L'épuration consiste en l'élimination principalement de trois composées [12]: le gaz carbonique, le sulfure d'hydrogène et l'eau.

Il y a plusieurs façons de purifier le biogaz. Parmi les procédés de traitement du biogaz, la plus poussée est celle qui consiste à l'épurer de façon à atteindre les normes du gaz naturel. L'épuration du biogaz pour atteindre les normes du gaz Natural peut s'effectuer de différentes manières : absorption dans une liquide ; adsorption sur un solide, etc.

La présence d' H_2S dans le biogaz le rend corrosif pour les métaux. La combustion de l'hydrogène sulfure produit de l'acide sulfurique, composé très corrosif pour les appareils de chauffage, les cuisinières, les moteurs, etc. [13]

L'épuration de sulfure d'hydrogène peut se faire par un passage sur de la limaille de fer, cette technique est simple à mettre en œuvre : il s'agit de faire circuler le gaz à travers une masse épurant d'oxyde de fer. La régénération du produit est possible mais délicate à réaliser. On peut également faire l'épuration de l' H_2S en le piégeant dans l'eau et de la chaux.

On peut aussi éliminer le sulfure d'hydrogène et même le gaz carbonique par lavage à l'eau. Le CO_2 et l' H_2S sont très solubles, dans l'eau, le CH_4 est peu soluble. La solubilité des gaz dans l'eau croît lorsque la pression augmente et quand la température diminue. Un laveur est généralement constitué de deux étages, un pour l'épuration de gaz, et l'autre pour la régénération de l'eau par aération. La mise au point de ces appareils est assez délicate ; car il faut déterminer les débits de gaz ; d'eau ; le volume du laveur et la qualité du garnissage utilisé. Il est préférable que la pompe de recyclage de l'eau de lavage soit en acier inoxydable sous peine d'être très rapidement corrodée [13].

Quant à l'épuration de l'eau, elle peut se faire par condensation, c'est au niveau du gazomètre de stockage qu'elle peut intervenir. Mais on peut faire cette déshydratation par passage du gaz dans une colonne sèche remplis de chlorure de calcium ou de chaux vive.

1. 5. 2 Digestat

Le digestat est un résidu semblable à l'humus, partiellement stable et riche en composants organiques. Le digestat est le produit résidu de la méthanisation, composé de matière organique non biodégradable (lignine), des matières minérales (azote, phosphore) et

de l'eau. Dans le cas de l'utilisation des intrants solides pour la biométhanisation, il a, à la sortie du digesteur, une consistance pâteuse et émet souvent des odeurs désagréables.

L'excès de liquide peut être extrait pour réalimenter le système en eau et en microorganismes spécialisés et/ou pour minimiser les quantités de matières à être transportées. Dans plusieurs cas, la fraction solide du digestat est ensuite compostée et le résultat utilisé comme amendement des sols. La partie liquide, l'éluât, peut être utilisée directement comme fertilisant liquide à cause de sa richesse en éléments nutritifs [8].

1.6 Types des réacteurs et applications

Contrairement à ce qui se passe dans la digestion aérobie, où un fort dégagement de chaleur est produit, la digestion anaérobie est faiblement exothermique [13]. Pour cette raison, une bonne isolation thermique des réacteurs, et parfois des systèmes de chauffage, sont essentiels pour une production optimale de biogaz.

Dans la plupart des cas, cet apport d'énergie thermique est fourni par la combustion du méthane produit par l'installation elle-même [14] Il est estimé qu'un tiers de l'énergie produite par le biogaz est utilisé pour réchauffer le digesteur [15]

En ce qui concerne le choix du type de matériau pour la fabrication du digesteur, les matières utilisées sont le béton, l'acier et les constituants polymériques. L'acier et le béton sont néanmoins les matériaux les plus couramment utilisés.

Pour l'isolation, on distingue deux types de matériaux utilisés, le premier d'origine synthétique et le second d'origine naturelle. Le premier est le matériau le plus répandu. Il ne faut pas sous-estimer dans l'installation l'isolation car son efficacité est nécessaire pour éviter les fuites de gaz et les pertes de chaleur [16].

Les procédés de méthanisation peuvent se classer en fonction de la température des réactions, de la teneur en matière sèche du substrat et selon le fonctionnement des digesteurs.

A. Selon la température

La digestion anaérobie prend place dans une des trois plages distinctes de température, selon l'apport en chaleur qui est fourni au système. Cette température est maintenue constante tout au long de la digestion et les microorganismes propres à cette condition se développent dans le réacteur.

Mode psychrophile : lorsque la température est inférieure à **15°C**. C'est la méthode la moins coûteuse de méthanisation. Par contre, elle est la moins efficace, avec de faibles productions de biogaz [14].

Mode mésophile : entre 30 et 40 °C, avec une température optimale de fonctionnement de **35°C**. C'est le mode le plus utilisé, à cause de sa stabilité et de sa bonne production de biogaz [14]. De plus, les microorganismes mésophiles sont plus robustes et plus tolérants aux variations de température, donc plus indiqués pour les digesteurs avec des caractéristiques moins contrôlées [9].

Mode thermophile : entre 50 et 65 °C, avec un optimum se situant autour de **55 °C**. Il est de plus en plus utilisé pour le traitement de résidus solides. Des températures plus élevées permettent l'amélioration de la vitesse de l'hydrolyse et une meilleure dégradation du substrat. En addition, les températures élevées ont un pouvoir destructeur des germes pathogènes. Par contre, ce sont des systèmes plus sensibles aux substances toxiques et aux variations de température. De plus, la nécessité d'un apport plus important d'énergie thermique le rend moins intéressant d'un point de vue énergétique. Finalement, les cultures thermophiles peuvent nécessiter un mois ou plus pour établir une nouvelle population [9].

B. Selon la teneur en matière sèche du substrat

Les digesteurs peuvent être classés selon la concentration en eau du substrat organique à traiter. De cette façon, on utilise les dénominations :

Procédés à voie humide : la teneur en matières sèches est inférieure à 15 %. Ce sont des procédés utilisés principalement pour la méthanisation des boues d'épuration, du lisier ou d'autres intrants liquides. Dans le cas des résidus solides, leur dilution doit être faite dans le but d'obtenir une concentration de 10 à 15 % de matières solide [14].

Ces réacteurs ont une meilleure homogénéisation du substrat, ce qui augmente la digestion. Par contre, le besoin de cuves plus grandes augmente le coût des réacteurs et du chauffage du substrat [9].

Procédés à voie sèche : la teneur en matières sèches est comprise entre 20 et 50 %. Ces systèmes sont utilisés principalement pour le traitement des résidus solides qui sont mis dans le réacteur sans importants ajouts d'eau. La consistance du milieu de fermentation est pâteuse ou semi-solide [14]. Une plus grande concentration du milieu permet l'utilisation de réacteurs moins grands, donc moins coûteux. Par contre, cette concentration accrue nécessite des pompes spéciales et cause plus de stress mécaniques aux équipements [9].

C. Selon le fonctionnement des réacteurs

Le flux des matières dans les digesteurs varie selon la technologie utilisée, c'est-à-dire selon les modes d'alimentation et d'évacuation des réacteurs. [9] et [14].

Procédé en mode continu : les digesteurs sont alimentés en continu, avec une quantité entrante de matières équivalente à celle évacuée : ce sont les systèmes les plus utilisés. Comme il y a un apport continu de matières fraîches, toutes les étapes de la digestion anaérobie se déroulent sans interruption. De cette façon, la production de méthane est constante.

Procédé en mode discontinu (batch) : les digesteurs sont remplis et, après la fin de la digestion, vidangés. Les réactions de méthanisation se produisent en séquence et la production de méthane prend la forme d'une cloche. À la fin de la digestion, lorsque le dégagement du biogaz chute ou devient nul, le réacteur est vidé et un nouveau lot y est introduit.

Procédé en mode discontinu séquentiel (SBR) : système qui combine les deux modes afin de maximiser les avantages de chacun.

1.7 Facteurs affectant la stabilité du processus de biogaz

Les facteurs affectant la production de biogaz sont principalement basés sur les conditions opératoires ainsi que l'alimentation du digesteur. Les conditions de fonctionnement telles que le pH et la température influencent directement les micro-

organismes. Les perturbations par l'alimentation incluent la composition et la concentration de déchet, et les composés toxiques et les inhibiteurs.

1.7.1 Le substrat

Le type et la composition du substrat déterminent directement le rendement de biogaz. En anaérobie le substrat d'alimentation est souvent mesuré en termes de la demande chimique en oxygène totale (DCO) ou en termes de solides volatils totaux (SV).

Un lisier de porc ou un effluent de volaille donnera un gaz beaucoup plus riche en méthane qu'un fumier moins riche en azote obtenu à partir d'un élevage bovin. Ainsi le rapport C/N caractéristique de chaque substrat est un facteur de la composition du biogaz obtenu. Plus celui-ci est petit et plus le biogaz résultant est riche en méthane.

Or, une forte augmentation de l'apport en azote peut mener à une production accrue d'ammoniac, ce qui peut nuire aux microorganismes et inactiver la méthanisation [8].

Des études indiquent que la proportion désirable se situe entre 20 et 30, 25 étant le ratio idéal [9].

De plus, selon la qualité du substrat, le gaz obtenu sera plus ou moins riche en Hydrogène sulfuré (H_2S), qui est mélangé à l'eau et au dioxyde de Carbone rend le biogaz très corrosif.

Tableau 2 Proportion de H_2S dans le biogaz selon le type de substrat [15]

Types de substrat	Proportion de H_2S dans le biogaz
Fumier bovin	Moins de 0,3 %
Lisier de porc	De l'ordre de 0,7 %
Fientes de volailles	Proche de 1 %

Les caractéristiques du substrat utilisé pour la méthanisation s'avèrent donc être des paramètres importants de la valorisation énergétique de celle-ci. Il ne faut pas oublier que les caractères physiques du substrat (état, température, viscosité, ...etc) jouent beaucoup dans

l'élaboration du procédé. Il faudra ainsi tenir compte de ces considérations pour le choix du système et adapter celui-ci aux différents paramètres du substrat valorisé.

1.7.2 La température

La température a un effet direct sur les propriétés physico-chimiques de tous les composants dans le digesteur et affecte aussi la thermodynamique et la cinétique des processus biologiques.

Comme pour les autres processus biochimiques, l'élévation de la température engendre une augmentation de l'efficacité de la méthanisation. Le maintien de la température dans une de ces plages est essentiel pour l'efficacité du processus [9].

1.7.3 Le pH

Le pH est un des paramètres les plus importants pour la méthanisation et un contrôle accru de sa variation est fondamental pour le bon fonctionnement des réacteurs. Un pH stable indique un système en équilibre et une méthanisation performante. En revanche, des variations du pH, plus souvent sa diminution, sont signes de problèmes. Les bactéries méthanogènes sont très sensibles aux variations du pH : de petites altérations peuvent même menacer la production du gaz. À cause de cela, le contrôle de l'alcalinité est important afin de maintenir le pH dans les valeurs voulues [14]. Si la plage de fonctionnement acceptable d'un réacteur se situe entre 5,5 et 8,5, les valeurs idéales pour les microorganismes méthanogènes varient entre 7,0 et 7,2. La chute du pH en dessous de 5,0 est mortelle pour ces organismes [9] et même des valeurs proches de 6,0 causent souvent un arrêt du procédé.

Comme la digestion anaérobie est une séquence de réactions, chacune ayant des sous-produits différents, les uns peuvent influencer négativement les autres. Une surproduction des acides volatils par les organismes acidogènes peut mener à une baisse du pH et, conséquemment, à une inhibition de la méthanogénèse. Cela peut être une situation causée par un grand apport de matières fraîches au digesteur. En revanche, une surconsommation des acides pour la formation de méthane peut engendrer une augmentation du pH et un ralentissement de l'acidogénèse.

1.7.4 Degré d'humidité

L'humidité a une grande influence sur l'action des bactéries, principalement dans le cas où ces valeurs sont basses. Des études montrent que des taux d'humidité supérieurs à 60 % augmentent la production de gaz, qui atteint un maximum environnant 80 %. Au-delà de cette concentration, la production se stabilise dans ce plateau élevé. Ce principe est utilisé dans quelques lieux d'enfouissement, par la recirculation du lixiviat, pour accélérer la méthanisation des matières putrescibles et pour augmenter la production de biogaz [14].

1.7.5 Composés toxiques ou inhibiteurs

Les composés inhibiteurs sont l'un ou l'autre présent déjà dans le substrat ou produit pendant la dégradation. La plupart des inhibiteurs sont formés pendant la dégradation du substrat, tels que l'AGV, l'ammoniac et le sulfure. Quelques inhibiteurs sont présents déjà en substrat, tels que les métaux lourds.

Ammoniac (NH₃) : l'ammoniac en concentrations au-delà de quelques grammes par litre peut inhiber la phase méthanogène de la digestion anaérobie. Ces concentrations de NH₃ peuvent être causées par un apport élevé de matières riches en protéines, comme les restes d'élevage et les déchets agroalimentaires [14]. Par contre, une adaptation des micro-organismes à des doses plus élevées d'ammoniac, allant jusqu'à 5 g/l, peut être développée naturellement [13].

H₂S : des substrats riches en protéines sulfurées et en sulfates peuvent mener à une augmentation de la production de H₂S. Il est également toxique pour les microorganismes méthanogènes, en plus d'être corrosif pour les matériaux. La précipitation de certains cations avec les sulfures dissouts peut causer une carence d'éléments essentiels tels le nickel et le cobalt [14].

Substances toxiques : les hydrocarbures aliphatiques chlorés et les acides gras à longue chaîne sont les substances organiques les plus toxiques pour la digestion anaérobie. À propos des éléments inorganiques, les plus toxiques sont les cations comme le sodium (Na⁺), le potassium (K⁺) et les métaux lourds comme le cuivre, le nickel, le zinc et le plomb, en plus du NH₃ et du H₂S [14].

2. La méthanisation à la ferme

2.1 Les substrats et les co-substrats de la méthanisation agricole

En principe, plusieurs types de biomasse peuvent être utilisés pour produire du biogaz. Dans le cas d'installations de production de biogaz agricole, la matière première, ou substrat, utilisée comprend :

- Le matériel végétal frais ou ensilé (ex. : maïs, herbe, céréales, betterave ou trèfle)
- Les excréments animaux (tels que le lisier ou le fumier)
- Les résidus de la production agricole ou alimentaire (ex. : restes d'aliments pour le bétail, balle, petit lait, glycérine, paille)
- Les matériaux résiduels (ex. : déchets ménagers organiques)

Le choix de substrat est influencé par les capacités technologiques et microbiologiques de l'installation, la disponibilité du substrat, les conditions juridiques et la stratégie de l'opérateur [17].

2.1.1 Caractéristiques des substrats [17]

Les déjections animales, malgré leurs faibles pouvoirs méthanogènes, les fumiers et lisiers, présentent des caractéristiques physico-chimiques indispensables à l'activité bactérienne. Le lisier apporte les bactéries nécessaires à la digestion de la matière organique et stabilise le pH du milieu. Le fumier a un taux de matière sèche élevé et peut servir de support aux bactéries à l'intérieur du digesteur.

Les résidus de culture (paille, issus de céréales...) présentent souvent une teneur en carbone intéressante pour la méthanisation.

Les cultures dédiées (maïs, herbe, sorgho...) ont l'avantage de posséder de bons potentiels méthanogènes. Néanmoins leur développement aurait pour conséquence de déséquilibrer les marchés alimentaires.

Les co-substrats viennent en complément des substrats précédemment cités dont le potentiel méthanogène est souvent insuffisant pour assurer la rentabilité du projet. Ces

matières peuvent provenir d'Industrie Agroalimentaire (graisses, huiles...), de collectivités (tonte de pelouse, boues de station d'épuration...).

L'utilisation des résidus et déchets des industries agroalimentaires, des collectivités, des restaurants, de cantines dépend de leur localisation, idéalement dans un rayon d'une quarantaine de km. Certains de ces déchets (abattoirs par exemple) sont soumis réglementairement à des prétraitements (ex : hygiénisation).

2. 1. 2 Pouvoir méthanogène

Le pouvoir méthanogène est une mesure de laboratoire qui permet d'estimer la quantité maximale de méthane que l'on peut espérer produire dans un méthaniseur à partir d'un substrat. Il est révélateur de la teneur en matière organique du substrat, de sa biodégradabilité et de sa composition chimique.

C'est le volume maximal de méthane produit par une tonne de matière fraîche. Celui-ci dépend principalement :

- de la teneur en matière organique : plus le taux de matière organique est élevé, plus le volume de biogaz produit sera important ;
- de la composition de la matière organique : les graisses sont plus méthanogènes que les protéines ou les hydrates de carbone.

Ces deux critères permettent d'avoir un regard critique sur les matières disponibles, cependant, il faut noter que les potentiels méthanogènes des différents gisements ne s'additionnent pas forcément, il faut au préalable vérifier l'équilibre alimentaire du mélange.

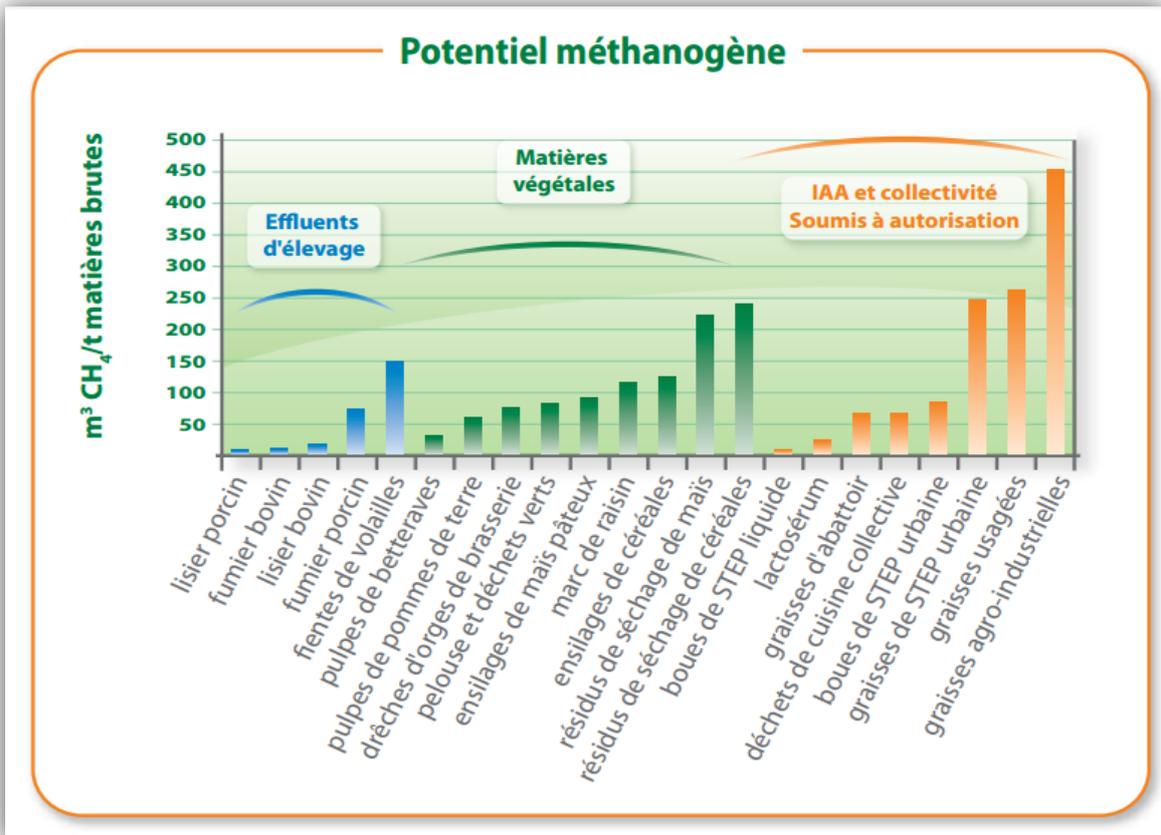


Figure 3: Exemple de potentiel méthanogène de différentes matières [18]

2. 1. 3 Effluents d'élevage

Le volume de déjections produit par un animal dépend essentiellement de son niveau d'ingestion qui est en lien avec le niveau de production de l'animal.

Les conditions d'élevage (mode de logement, alimentation) et les pratiques de l'éleveur (niveau de paillage) déterminent les grandes catégories de déjections : les solides (fumiers) et les liquides (lisiers, purins).

La consistance des fumiers a une incidence directe sur la hauteur moyenne du tas et donc sur la surface de stockage de la fumière.

En règle générale, on peut distinguer [18]:

- Le fumier très compact: fumier issu de la litière accumulée (en stabulation aire paillée intégrale par exemple).

- Le fumier compact: fumier issu de litière en stabulation pente paillée ou en étable entravée.
- Le fumier mou: fumier issu de raclage des logettes ou d'aire d'exercice paillée par exemple.
- Le lisier: il est issu des raclages quotidiens des aires de vie des animaux où le paillage est en général compris en 0 et 2 kg de paille maximum par animal et par jour.

Le volume de purin issu de ces fumiers varie en fonction de leur nature.

Un certain nombre de situations peuvent aboutir à des déjections ne relevant pas de ces catégories. Ces déjections qualifiées de « fumier très mou » ou « lisier pailleux » compliquent la gestion sur le site d'exploitation et lors de l'épandage. Il convient donc d'éviter au maximum ce genre de situation en mettant en place des systèmes adaptés (augmentation ou à l'inverse suppression du paillage, tri des déjections, systèmes d'égouttage, séparateur de phase...). Une réflexion appropriée avant tout investissement est nécessaire (type de déjection, paille, surface potentiellement épandable...).

Concernant les autres types d'effluents, on peut distinguer :

- Les lixiviats: ils sont générés par la pluie tombant sur une fumière. La couverture de cette fumière permet d'éviter le stockage de ces lixiviats.
- Les eaux brunes: ce sont les effluents produits sur les aires d'exercice non couvertes. Dans les bâtiments couverts, le volume d'eaux brunes se limite généralement aux aires de transfert non couvertes (surface bétonnée intermédiaire utilisée pour le raclage située entre le bâtiment d'élevage et la fumière ou la fosse).
- Les effluents de salle de traite:
 - Les eaux blanches sont générées lors du lavage de la machine à traire et du tank à lait. Les volumes produits dépendent du type d'installation de salle de traite (épi, traite arrière, roto...).
 - Les eaux vertes sont issues du lavage des quais et de l'aire d'attente. Le volume à stocker varie en fonction de la méthode de nettoyage et de l'équipement utilisé.
- Les jus de silo: ils concernent principalement les ensilages d'herbe ou de maïs à faible taux de matière sèche (généralement en dessous de 27% de MS).

2. 2 Les intérêts de la méthanisation à la ferme [19]

2. 2. 1 Les intérêts pour les agriculteurs

- Création d'activité, revenus complémentaires stables (vente d'électricité).
- Couverture des besoins de chaleur dans un contexte d'augmentation du coût de l'énergie.
- Amélioration des engrais de ferme (meilleure assimilation par les plantes, réduction des odeurs, réduction de la dépendance aux engrais minéraux)
- Valorisation des équipements de stockage des effluents (fosses à lisiers).
- Diversification des débouchés pour les cultures dérobées et résidus de cultures qui peuvent être méthanisés.
- Renforcement du lien agriculture/territoire suite à la création de services pour la collectivité.

2. 2. 2 Les intérêts pour les collectivités locales

- Attractivité économique accrue en lien avec l'utilisation de la chaleur.
- Gain en autonomie énergétique du territoire.
- Maîtrise des coûts de traitement des déchets : réduction des coûts de transport, réduction des coûts liés à la redevance "déchets".
- Réduction des odeurs liées au stockage et à l'épandage des effluents d'élevage.
- Intégration paysagère maîtrisable : enfouissement des cuves ou aménagements paysagers par exemple.
- Création d'activités autour de la construction et l'exploitation de l'installation biogaz.

2. 2. 3 Les intérêts pour l'environnement

Réduction des émissions de gaz à effet de serre grâce :

- au captage des émissions de méthane qui se produisent naturellement au cours du stockage des déjections animales,
- à la valorisation énergétique du méthane capté (sous forme d'électricité, de chaleur ou de biométhane) en substitution d'une autre énergie potentiellement productrice de gaz à effet de serre (gaz naturel, fioul...),

- à la substitution des engrais minéraux dont la production est très consommatrice en énergie fossile par des engrais renouvelables (retour au sol de la matière organique des bio-déchets),
- à la réduction du transport de déchets.

2.3 Schéma général d'une installation de méthanisation agricole

Les digesteurs et les modalités de la digestion anaérobie peuvent présenter de nombreuses variantes : technologie employée, temps de rétention, critères de chauffage et de brassage,...

En général, une unité de méthanisation comprend au minimum les équipements suivants, nécessaires au déroulement du processus : pré-fosse d'alimentation en effluent liquide (1), trémie d'alimentation en substrat sec (2) digesteur anaérobie (3), stockage du biogaz (4), co-générateur (5), réseau d'eau chaude (6), réseau électrique (7).

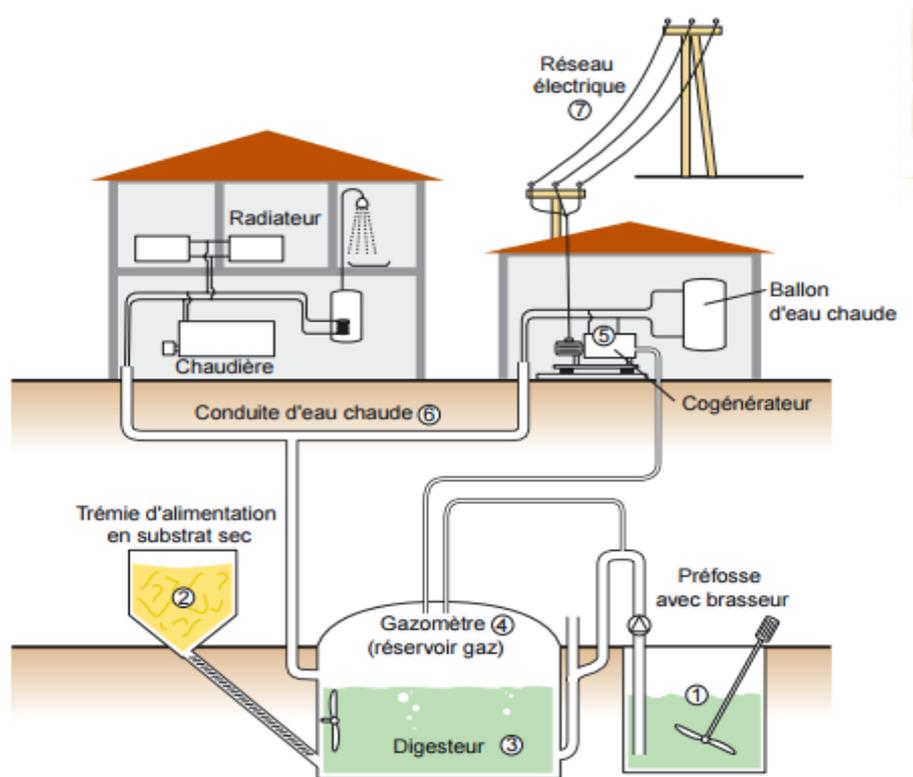


Figure 4: Schéma général d'une installation de méthanisation

2. 3. 1 Technologies utilisées [19].

Le mode de méthanisation le plus usité est celui de **l'infiniment mélangé** dans lequel l'intrant frais côtoie du digestat plus mature. Le système du **piston** constitue une alternative : la méthanisation a alors généralement lieu dans un cylindre disposé horizontalement sans qu'il y ait mélange entre l'intrant frais (qui entre par l'une des extrémités) et le digestat plus âgé (qui sort par l'autre).

L'alimentation par batch est bien plus rare, et s'applique plus aisément à la méthanisation de substrats solides.

Les digesteurs sont systématiquement brassés afin d'homogénéiser les nutriments, la température, d'optimiser le travail des bactéries méthanogènes et d'éviter la formation d'un chapeau de masse solidifiée à la surface, ce qui empêcherait l'évacuation du biogaz.

Plus la teneur en matières sèches est élevée plus le brassage doit être puissant. Les techniques de brassage sont mécaniques (agitateur) ou hydrauliques (injection de biogaz ou recirculation de digestat). Elles sont d'orientations variées (horizontale, verticale ou oblique), fixes ou mobiles, de vitesses variées (lente ou rapide). La vitesse de brassage est un élément important, les microbiologistes s'accordent pour dire qu'un brassage trop rapide détruit les agrégats de matières organiques et par là même, nuit à la vie symbiotique des bactéries acétogènes et méthanogènes.

A. Le process mésophile en infiniment mélangé

La méthanisation en voie liquide mésophile (38-42°C) est le process le plus couramment utilisé en méthanisation agricole.

Type de digesteur : La fermentation se déroule dans un digesteur généralement cylindrique où un milieu favorable au développement des bactéries est maintenu : absence d'oxygène, température constante, pH neutre. Le digesteur est étanche aux gaz et aux liquides. Il est, chauffé, isolé et son contenu brassé. Il peut être enterré ou hors sol. Il est généralement en béton ou en acier inox.

Les intrants : La matière à traiter est introduite tous les jours dans le digesteur. Une quantité équivalente est extraite par surverse ou par pompage.

La matière sortante, le digestat, est évacuée vers une fosse de stockage.

Les matières y séjournent le temps nécessaire à leur dégradation (40 à 60 jours).

La teneur en matière sèche (MS) au sein du digesteur doit rester en dessous de 12% pour obtenir un mélange pompable et brassable. Il est possible d'introduire des matières à forte teneur en MS. Elles sont diluées par des apports en matières liquides ou une recirculation du digestat. La teneur maximale en MS de la ration en entrée est de 18%.

Tableau 3: Mode de stockage et d'introduction selon le type de substrat

Type de matière	Mode de stockage	Mode d'introduction dans l'installation
Matière liquide	Cuve ou préfosse	Pompe : Le type de pompe est à définir en fonction de la nature des matières (à galet, à lobe, broyeur). La préfosse peut servir de stockage pour des matières liquides extérieures à l'exploitation. Dans ce cas, prévoir un stockage tampon d'une dizaine de jours de façon à limiter les à-coups de composition de la ration lors de l'alimentation du digesteur
Matière solide	Silo avec récupération des jus	Trémie : Un chargeur alimente la trémie au moins une fois par jour. L'incorporation dans le digesteur s'effectue au moyen d'un piston ou d'une vis sans fin, elle est programmée (par exemple : 10 min toutes les 4 heures).

Chauffage et isolation : La fermentation anaérobie ne dégage pas de chaleur contrairement au compostage. Pour un développement maximal, les bactéries doivent vivre entre 38 et 42°C et sans choc thermique. Il est donc nécessaire d'isoler et de chauffer le digesteur. L'isolant (sol, mur, plafond) peut être constitué de plaques posées à l'extérieur du digesteur ou de mousse projetée à l'intérieur du digesteur et protégée de la masse en fermentation par un enduit. Le chauffage peut être assuré par un réseau de chaleur fixé à

l'intérieur du digesteur ou coulé dans le béton. Chauffer le sol a peu d'intérêt car le dépôt – inévitable - d'inertes (sable...)

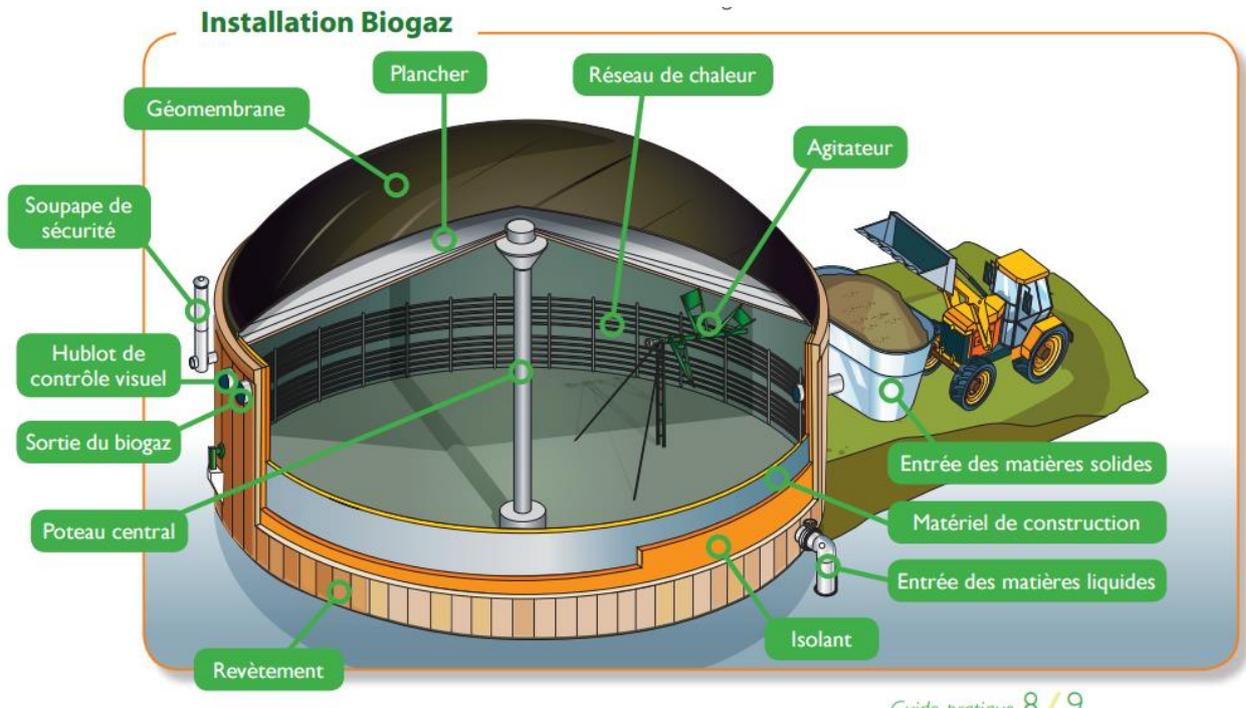


Figure 5: Unité de méthanisation agricole mésophile en infiniment mélangé

B. Le digesteur piston

Ce digesteur accepte une charge en matière sèche plus forte qu'un digesteur classique (jusqu'à une MS de 25-30%) et requière un chauffage moindre. Le temps de séjour, l'expression du potentiel méthanogène et le niveau d'automatisation sont équivalents. [20]

Dans cette stratégie, c'est un système cylindrique où le substrat avance sous l'influence de pales. Il est représenté sur la **figure 6**:

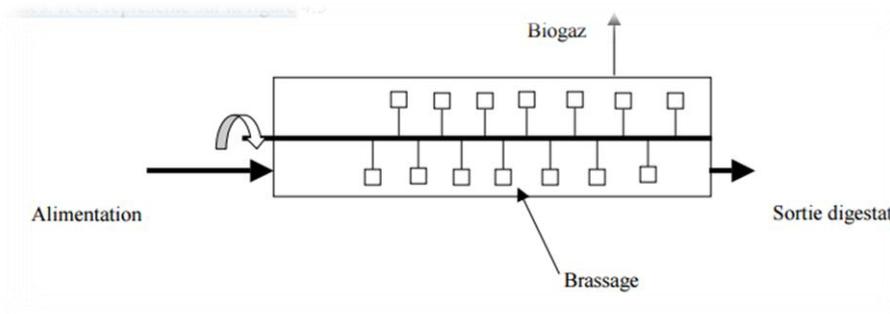


Figure 6: Digesteur type piston pour traiter des déchets agricoles

C. La méthanisation discontinue en voie sèche

Ce mode de digestion est peu développé. Des entreprises se positionnent sur cette technologie mais les retours d'expériences sont encore peu nombreux. Plusieurs digesteurs (silo ou caisson), quatre au minimum, sont placés en parallèle. Ils fonctionnent en même temps mais sont chargés en différé (par exemple 1 tous les 10 jours) de manière à produire un volume globalement constant de biogaz. La bonne gestion du percolât est un des facteurs clés de réussite. Le mélange de matière introduit doit être chargeable au chargeur (>25% de MS). [20]:

Les temps de séjour sont de 1 à 2 mois. Le schéma de fonctionnement est reporté ci-dessous sur la **figure 7** :

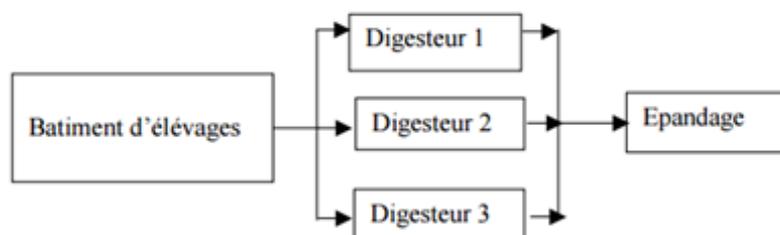


Figure 7: Schéma de la mise en œuvre de digesteurs en discontinu

2. 3. 2 L'utilisation et valorisation du biogaz

Le biogaz est composé majoritairement de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2). L'énergie provient du méthane. Le biogaz est toxique et corrosif : d'où l'importance de garantir la sécurité des personnes et éviter l'usure prématurée du matériel (principalement du moteur).

Epuration : La désulfuration est généralement réalisée par l'injection d'un petit débit d'air directement dans le stockage de biogaz ce qui génère une fixation biologique du soufre sur les parois libres du digesteur. L'eau est éliminée par condensation.

Stockage : Le biogaz est stocké à pression atmosphérique en général dans une géomembrane fixée au-dessus du digesteur ou du post digesteur. La capacité de stockage est d'environ 5 heures ; c'est un stockage tampon utilisé pour les petites maintenances de la cogénératrice ou les surproductions ponctuelles de biogaz.

La sécurité sur le site : Le site doit disposer d'un dispositif de destruction du biogaz dans le cas où celui-ci ne pourrait être utilisé (ex : torchère). Des soupapes de sécurité sont installées au niveau des rétentions de gaz. Une zone de sécurité de 1 à 3 mètres doit être identifiée autour des rétentions de biogaz, de la torchère et des soupapes de sécurité. Les canalisations de biogaz et les vannes sont placées à l'extérieur des bâtiments.

Le biogaz est explosif, corrosif et toxique (présence d'hydrogène sulfuré) : il réduit le niveau d'oxygène, ce qui restreint la respiration, l'Hydrogène sulfuré détruit les tissus olfactifs (odorat) et les tissus des poumons, et devient inodore à mesure qu'augmente la concentration. Par conséquent, une ventilation adéquate et un minimum de précautions doit être pris pour éviter un risque d'asphyxie pour les personnes.

Et pour minimiser les risques d'incendie et d'explosion, des appareils électriques adaptés près de la « zone gaz », une surveillance constante des fuites, et l'utilisation des matériaux non corrosifs sont à prévoir: pas de flammes nues devraient être utilisées à proximité d'un digesteur et le matériel électrique doit être de qualité satisfaisante, normalement l'épreuve des explosions.

Une bonne aération, des précautions adaptées et équipements appropriés de protection permettant de minimiser les dangers associés à la production de biogaz, ce qui en fait un bon serviteur plutôt que d'un mauvais maître. [20]

La valorisation du biogaz la plus courante : la cogénération

Le module de cogénération est constitué d'un moteur qui entraîne une génératrice de courant électrique (alternateur). La chaleur est prélevée sur le système de refroidissement du bloc moteur et les fumées ce qui permet la production d'eau chaude à 90°C. Il est envisageable de produire de la vapeur en récupérant uniquement l'énergie des fumées.

Deux types de moteur peuvent être utilisés : moteur à gaz : ne fonctionne qu'au biogaz ; moteur dual fioul : une petite quantité de fioul (environ 5 % de l'énergie primaire consommée) est injectée pour enflammer le mélange air/ biogaz. Le rendement électrique est meilleur que pour un moteur gaz, particulièrement pour des petites puissances, mais les coûts de fonctionnement, non négligeables, sont plus importants.

Valorisation de la chaleur : La première des utilisations de la chaleur est le chauffage du digesteur (20 à 30 % de la chaleur produite). 80% de la chaleur produite est donc disponible pour d'autres usages [15].

Les exploitations agricoles utilisent de la chaleur pour : les élevages hors sol (porc, volailles...), les productions végétales (serres, champignonnière...), les ateliers de transformation (fromagerie, charcuterie...), le séchage de fourrages, de récoltes, de bois, de plaquette... Ces usages peuvent être couverts, pour tout ou partie, par la chaleur produite par une installation biogaz. Lorsque la chaleur issue du biogaz se substitue à une autre source d'énergie, cela génère des économies pour l'exploitation.

D'autres utilisations sont possibles, comme l'utilisation de la chaleur pour le chauffage de maisons, de bureaux, d'industries agroalimentaires... Ces utilisateurs doivent se trouver à proximité immédiate de l'unité ou être reliés par un mini-réseau de chaleur. Toutefois, un réseau de chaleur dispersé n'est pas favorable à la rentabilité du projet du fait d'investissements élevés au regard des recettes.

2. 3. 3 Valorisation du digestat

Le digestat est un amendement et un engrais complet dont la valeur agronomique est supérieure à celles des matières entrantes. Au terme d'un processus de méthanisation mésophile de 40 à 60 jours, les matières organiques résiduelles, les minéraux dissous et l'eau constituent le digestat. Il est stocké dans une fosse, directement reliée au digesteur.

Le digestat est désodorisé par rapport aux matières entrantes du fait de la destruction dans le digesteur des matières organiques responsables des nuisances olfactives.

La méthanisation réduit les germes pathogènes (effet température/temps de séjour) et affecte le potentiel de germination des graines d'adventices présentes dans les déjections. La

valeur amendante est conservée. En effet, la fraction ligneuse, déterminante pour la fabrication de l'humus des sols n'est pas attaquée.

Le digestat brut a l'aspect d'un lisier mais il est plus facile à épandre car plus fin, plus homogène et plus fluide que du lisier non traité. La valeur fertilisante est améliorée. Les quantités totales en nutriments N, P, K sont conservées. En revanche, l'azote, initialement organique, se retrouve majoritairement sous forme ammoniacale, forme plus assimilable par les cultures et plus facile à doser. Par contre, cet azote ammoniacal est plus volatile, d'où la nécessité : de bien dimensionner les fosses de stockage selon la réglementation et de les couvrir et d'épandre le digestat en fin d'hiver et au début du printemps, avec un pendillard.

Certains agriculteurs font un traitement dit de "séparation de phase" qui permet d'isoler : n une fraction solide concentrée en matière organique et en éléments phosphatés, utilisable comme amendement de fond, n une fraction liquide riche en azote ammoniacale, substituable aux engrais minéraux [15].

2.3.4 La nécessité d'un suivi quotidien

Les différentes familles de bactéries sont interdépendantes : les "rejets" des unes sont les aliments des autres, mais ils peuvent, dans certaines conditions, inhiber la chaîne de dégradation. Le travail de l'exploitant consiste à maintenir l'équilibre au sein de cette chaîne de dégradation en apportant dans le digesteur une alimentation stable et équilibrée, conjuguée à une surveillance des paramètres du milieu. Cette surveillance passe par :

- Un suivi quotidien des différents paramètres du milieu (pH, température, composition du biogaz...) avec des appareils de mesure contrôlés et étalonnés régulièrement ;
- Des analyses régulières des matières entrantes, de la matière en digestion, du digestat pour vérifier le niveau de dégradation ou la présence d'inhibiteurs.

Le processus de digestion anaérobique dépend d'une population mixte de bactéries d'origine en grande partie inconnue, mais venant souvent d'excréments animaux, toutes les précautions d'hygiène doivent être prises pour la manipulation du contenu du digesteur.

Cela contribue aussi à réduire au minimum la propagation des odeurs qui peuvent accompagner le processus de digestion. Le processus de digestion aide à réduire le nombre de pathogènes (causant des maladies), les bactéries, en particulier à des températures de

fonctionnement plus élevés, mais la nature biologique du processus doit être gardée à l'esprit [20].

2.3.5 L'amélioration des performances des installations

Les constructeurs/entreprises proposent des dispositifs pour augmenter le potentiel méthanogène ou réduire le temps de séjour. Dans tous les cas, il est nécessaire d'analyser le coût à l'investissement et au fonctionnement en comparaison du gain réel [21].

Tableau 4: Quelques dispositifs pour améliorer la performance des installations

Dispositif	Principe et objectifs	Remarques
Installation thermophile	Température de digestion comprise entre 48°C et 60°C pour réduire le temps de séjour tout en conservant le potentiel méthanogène	Risque biologique accru, augmentation des besoins en chaleur du process
Lamineur, broyeur... et autres prétraitements	Rendre accessible une nouvelle fraction de matière fermentescible pour les bactéries. Exemple : broyer des pépins de raisin ou des noyaux pour accéder à l'amande généralement riche en graisse	Coût au regard de l'augmentation effective du potentiel méthanogène
Hydrolyse	Cuve aérobie à pH acide où se déroule uniquement l'hydrolyse. Le but est de mieux maîtriser l'apport en acides gras volatils (AGV), et de réduire le temps de séjour dans le digesteur	Stockage supplémentaire A priori pas de perte de potentiel méthanogène
Enzymes	Ajout d'enzymes à la matière fraîche de façon à simplifier le travail des bactéries	Enzymes utilisées stables et non dégradées au cours de la digestion

3. Le montage de projet de méthanisation agricole

La méthanisation est une excellente solution de traitement de déchets, or un projet méthanisation doit être réfléchi ; l'investissement financier et le temps de travail pendant la phase de fonctionnement sont importants dès le départ. En effet l'alimentation du digesteur, le contrôle des paramètres physicochimiques de ce dernier et l'entretien de l'installation représentent une charge de travail pouvant représenter jusqu'à une heure par jour. Pour la conception, les démarches administratives et la construction d'une unité de méthanisation, il faut compter deux à trois ans minimum.

Les études sont effectuées en deux phases ; la première regroupe des pré-études simples pour déterminer si les éléments fournis par le porteur de projet sont suffisants à la poursuite du projet. Cette période est généralement assortie d'une phase d'information, de formation et de voyages d'études au profit d'un porteur de projet. Les secondes sont les études de faisabilité. Elles sont très importantes. Les études de faisabilité sont les bases du projet, car elles doivent déterminer si celui-ci est viable. L'acquisition de l'unité de méthanisation ne doit surtout pas mettre le maître d'ouvrage en difficulté, y compris à long terme. Elles englobent des sujets divers et variés. Elles touchent aussi bien les domaines techniques que ceux de l'environnement, mais aussi le domaine du foncier, de la sécurité, du juridique, du financier, du sanitaire et de l'économie.

3.1 Les stratégies relatives aux installations de production de biogaz en fonction de leur capacité

Tableau 5: Les stratégies relatives aux installations de production de biogaz [22]

Installations de production de biogaz	Faible capacité < 100 kWe	Capacité moyenne 100-500 kWe	Grande capacité > 500 kWe
Types d'exploitation agricole adaptée	Petites exploitations. Fermes d'élevage uniquement. Fermes cultivant	Grandes exploitations. Fermes avec une production de cultures arables (engrais vert)	Série de grandes fermes à proximité les unes des autres. Potentiel de coopération

<p>Inconvénients</p>	<p>principalement des espèces pérennes, pour la production fruitière, par exemple.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coût spécifique au type d'installation élevé (€/kWe). - Agriculteur en charge de la gestion. - Faible efficacité énergétique de l'unité de cogénération. 	<p>plus importante. Production horticole à plus grande échelle, par exemple</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tributaire d'un approvisionnement externe en biomasse. - Problème éventuel d'utilisation de la chaleur résiduelle. - Possibles frais de transport. - Accords de coopération avec les fournisseurs de biomasse à prévoir 	<p>autour d'une installation commune de production de biogaz</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coût par kWe plus élevé. - Frais de transport. - Procédure d'obtention du permis de construire plus coûteuse et plus longue. - Nécessité d'établir des accords de coopération. - Disponibilité nécessaire de la biomasse correspondant à la taille de l'installation
<p>Avantages</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Très bonne intégration à la configuration de la ferme. - Utilisation de sa propre biomasse (autonomie). - Pas de frais de transport. - Affectation locale de la chaleur résiduelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût spécifique au type d'installation moins élevé (€/kWe). - Efficacité énergétique de l'unité de cogénération plus élevée. - Participation possible de salariés aux opérations. 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité de développer des ventes d'énergie plus optimales, par ex. valorisation pour le réseau de distribution. - Emploi d'un exploitant spécialisé.
<p>Stratégies</p>	<p>Concepts d'installation à monter soi-même ou bien clé en main.</p>	<p>Installations clés en main appropriées. Approvisionnement en biomasse biologique</p>	<p>Configuration personnalisée de l'installation financièrement</p>

garanti grâce à des abordable.
accords auprès de Étude possible de
fournisseurs. stratégies alternatives en
Importation de matière de marketing
biomasse
conventionnelle
pendant
la période de
transition.

3.2 Les facteurs de succès d'un projet

Afin de garantir le succès d'un tel projet, plusieurs facteurs sont à considérer [15] :

3.2.1 La qualification du gisement

Avant toute chose, une bonne définition du gisement est nécessaire afin de s'assurer :

- De réunir une quantité de matière apportant un potentiel méthanogène suffisant (>200-300 tMS par an, soit environ 30 kWe),
- Une production de déchets la plus constante possible sur l'année,
- Disposer d'un gisement de déchets autre que les effluents d'élevages peut impacter fort e-ment la production d'énergie (et donc la rentabilité du projet) car les déchets type résidus de culture, déchets d'industries agroalimentaires, des déchets des collectivités, ont en général un potentiel méthanogène plus élevé que celui des déjections.
- D'avoir un gisement dont la logistique (y compris collecte) est maîtrisée, afin d'avoir des distances de transport des matières réduites,
- D'avoir un gisement bien caractérisé (impacts sur la technique et le bilan financier du projet),
- D'anticiper des évolutions de ce gisement (quantité et qualité),
- De s'assurer de la qualité des déchets entrants (besoins de prétraitement, impossibilité d'épandage du digestat)

3.2.2 La garantie des débouchés

Une analyse approfondie des débouchés est nécessaire afin de s'assurer :

- D'avoir un débouché énergétique permettant une bonne valorisation du biogaz (notamment la chaleur dans le cas d'une cogénération et le biométhane dans le cas de l'injection sur le réseau),
- D'avoir des débouchés pour l'utilisation du digestat (surfaces agricoles, contraintes spécifiques),
- De trouver un terrain d'implantation à proximité du ou des débouchés énergétiques, et des débouchés matière, afin d'avoir des distances de transport des matières réduites,
- De modifier la gestion de l'épandage des engrais de ferme (calendrier, type d'équipements, type de cultures...),
- De disposer d'une solution alternative à mettre en place en cas de contamination passagère du digestat.

3.2.3 La faisabilité technique

Une analyse technique du projet est nécessaire afin de s'assurer :

- De la technologie à mettre en œuvre,
- Des pré-traitements éventuels :
 - éliminer les matériaux indésirables (inertes, plastiques, métaux...),
 - homogénéiser le substrat avant son introduction en digesteur (broyage par exemple),
 - éventuellement l'humidifier (procédés en voie liquide).
- Des post-traitements éventuels :
 - déshydrater le digestat,
 - compléter sa fermentation et son hygiénisation (maturation),
 - conditionner le digestat en vue de son écoulement final.
- Des sous-produits à éliminer : la fraction liquide excédentaire est celle qui n'est pas recyclée par le process lui-même. Lorsqu'elle ne peut être valorisée telle quelle comme fertilisant liquide, elle est traitée en station d'épuration ou sur site.
- De la capacité d'auto-financement de 15 à 20% de l'investissement,
- De la capacité de faire le suivi de l'installation au quotidien (1 à 2 heures par jour).

3.3 Point réglementaire

C'est dans un contexte de préoccupations énergétiques et environnementales, qu'en 2011 l'Algérie s'est dotée d'un programme destiné au développement des énergies renouvelables.

La politique nationale de promotion et de développement des énergies renouvelables est encadrée par des lois et des textes réglementaires. Les principaux textes régissant les énergies renouvelables sont :

- la loi sur la maîtrise de l'énergie,
- la loi sur la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable,
- la loi sur l'électricité et la distribution publique du gaz, avec son corollaire le décret exécutif relatif aux coûts de diversification.

Le producteur d'électricité, à partir des installations citées ci-dessous, peut bénéficier de primes à travers la vente de son électricité à un tarif d'achat garanti. Il est entendu par primes au titre des coûts de diversification, de la production d'électricité, le revenu pouvant couvrir les surcoûts engendrés par la production de l'électricité renouvelable ou de cogénération, tout en assurant une rentabilité financière de l'installation de production, grâce au tarif d'achat garanti qui lui est applicable. [23]

3.4 Analyse économique

3.4.1 Détermination des investissements

- stockage du substrat et co-substrat
- alimentation du digesteur,
- digesteur,
- stockage du biogaz,
- valorisation du biogaz (moteur ; échangeur ; chaudière ;),
- raccordement au réseau,
- raccordement à un éventuel réseau de chaleur,
- ingénierie,
- frais bancaires (intérêts ; amortissements),

3.4.2 Détermination des recettes et coûts d'exploitations

Détermination des éventuelles recettes

La détermination de l'ensemble des recettes envisageables et les chiffrer (recette pour le traitement de matière organique, vente de biogaz, vente de chaleur, vente d'électricité,)
ainsi que les économies possibles (notamment en fertilisants).

Coûts d'exploitation prévisionnels

- Consommations énergétiques annuelles (électricité ; combustible d'appoint ;)
- Autoproduction et/ou achat des cultures énergétiques
- Frais de transport des substrats, co-substrats, biogaz, chaleur,
- Frais d'analyse des produits entrant et sortant (biogaz, digestat)
- Frais d'entretien
- Assurance
- Personnel

Plan de financement prévisionnel

-Démarchage auprès des différents financeurs pour les solutions retenues afin de déceler le mode de financement le plus acceptable

Etude technico-économique d'un projet de méthanisation à la ferme

1. Localisation du projet

Une unité de méthanisation agricole peut être installée dans la Wilaya de Blida, dans la région de Bouinan, qui est une région à caractère agricole, ou l'unité de méthanisation traitera des effluents d'élevage ainsi que des déchets agricoles.

2. Gisement du projet

Pour cela, un gisement est proposé, constitué d'un effectif bétail de 80 bovins et 400 ovins et de divers déchets agricole (déchets de récolte, ensilage d'herbe, déchets vers, menues pailles).

Ce gisement est réparti sur plusieurs fermes de la région de Bouinan.

2.1 Quantification du gisement

La production potentielle des déjections est estimée, en se référant à la bibliographie [24], pour la production annuelle par espèce, à :

Tableau 6: Production moyenne de déjection par espèce

Espèces	Kg/tête/jour	Tonnes/tête/an
Bovins	41	15,0
Ovins	2,8	1,02

Concernant les déchets agricoles ou résidus de culture (paille, issus de céréales...), une quantité de **500 tonnes** annuelle est estimée.

Un tableau récapitulatif de la quantité de déchets traitée par méthanisation est présenté ci-dessous :

Tableau 7 Gisement disponible selon les hypothèses retenues pour ce projet

Types de déchet	Production journalière (Kg)	Production annuelle (t)	% de tonnage
Déjections bovines	3280	1200	57
Déjections ovines	1120	400	19
Déchets agricoles	1370	500	24
Totale	5770	2100	100

2.2 Caractéristique du gisement

On admet des valeurs moyennes de %MS pour les déjections bovines de l'ordre de 13%, pour les déjections ovines de l'ordre de 25% et pour les déchets agricoles, une valeur moyenne est estimée à 40% environ [24].

Le potentiel énergétique est calculé en appliquant aux quantités de matières sèches, un volume de biogaz produit. Les rendements sont présentés dans le **tableau 8** suivant. Il faut noter que ce potentiel comprend un chiffre global et que celui-ci peut varier de cas en cas [25].

Tableau 8 Potentiel énergétique moyen par type de déchet

Type de déchets	% de MS	m ³ de biogaz/kg de MS
Déjections bovines	13	0,200
Déjections ovines	25	0,135
Déchets agricole	40	0,800

Si on estime que la quantité des intrants et que la production de biogaz est constante durant tout l'année, on obtient les résultats portés dans le **tableau 8** suivant :

Tableau 9: Production annuelle de biogaz du gisement

Types de déchet	Quantité des intrants (t)	Volume de biogaz journalier (m ³)	Volume de biogaz annuel (m ³)
Déjections bovines	1200	85,5	31 200
Déjections ovines	400	37,5	13 500
Déchets agricoles	500	438,4	160 000
Totale	2100	461,4	204 700

3. Etude technique du projet

3.1 Technologie utilisée

La méthanisation développée dans ce projet est en phase sèche discontinue adaptée aux déchets solides, étant donné que la teneur moyenne de MS calculée est supérieure à 20%.

L'installation se compose de digesteurs en béton fonctionnant de manière discontinue et dans lesquels les déchets à traiter sont intégrés. Ces derniers, subissent pendant un temps de séjour donné une digestion anaérobie produisant biogaz et digestat.

Le biogaz est, après épuration, envoyé vers un module de cogénération pour produire de l'électricité et de la chaleur.

L'électricité est injectée sur le réseau et vendue à un distributeur.

Une partie de la chaleur est utilisée pour maintenir le digesteur à 38°C, le reste est injectée dans un réseau de chaleur et vendue.

Le digestat peut être épandu à l'aide d'un épandeur à fumier sur un périmètre d'épandage.

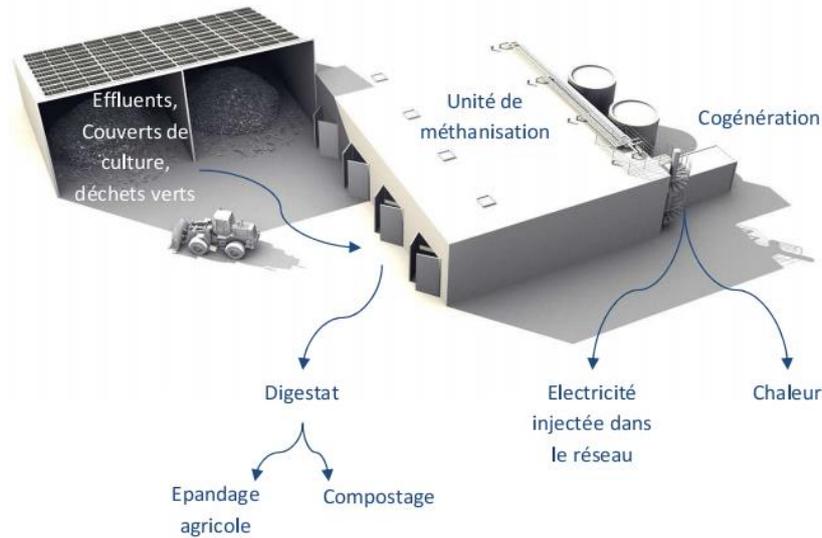


Figure 8: Schéma de l'installation de l'unité de méthanisation

L'installation est opérée en mode discontinu, c'est-à-dire que le digesteur est rempli en une fois, suivi par une phase de production de biogaz.

Ensuite le digesteur est complètement vidé en une fois. La production de biogaz issue d'un seul digesteur en mode discontinu n'est donc pas constante. Pour obtenir une production continue de biogaz, plusieurs digesteurs sont opérés parallèlement avec un décalage entre les phases d'opération. Un digesteur est en train de produire du biogaz, tandis qu'un autre est en train d'être rempli.

Un côté du digesteur est construit en pente, pour faciliter son remplissage et sa vidange par tracteur. Toute la production journalière des déchets est directement vidée dans le digesteur jusqu'au moment où le digesteur soit plein.

3.2 Paramètres de dimensionnement

Les digesteurs de 120 m^3 chacun de forme cubique (hauteur = 3m, largeur = 7m, longueur = 5 m) réalisés en béton sont isolés et chauffés afin de maintenir la biomasse à une température constante et homogène de 38°C . Un système d'aspiration et de récupération des percolât permet de maintenir une humidité à l'intérieur du tas et de favoriser le développement bactérien nécessaire à la production de biogaz.

Une fosse cylindrique à percolât de 25 m³ de forme cylindrique (hauteur = 2m, diamètre = 4m) réalisé en béton et agitée, isolée et chauffée, équipée d'un gazomètre double peau. Elle est connectée à chaque garage afin d'inoculer les différents tas au cours de leur fermentation.

Nombre de digesteurs : 3 (2 digesteurs en marche, 1 en remplissage)

Volume moyen des intrants par digesteur : 86,5 tonnes

Temps de séjour par digesteur : 45 jours

Temps de remplissage par digesteur : 15 jours

Volume du digesteur : 100 m³

Volume de la fosse de percolât : 25 m³

3.3 Biogaz produit

On estime un rendement moyen d'une cogénératrice comme il a été rapporté par une étude de l'ADEME [15], (voir figure 9) :

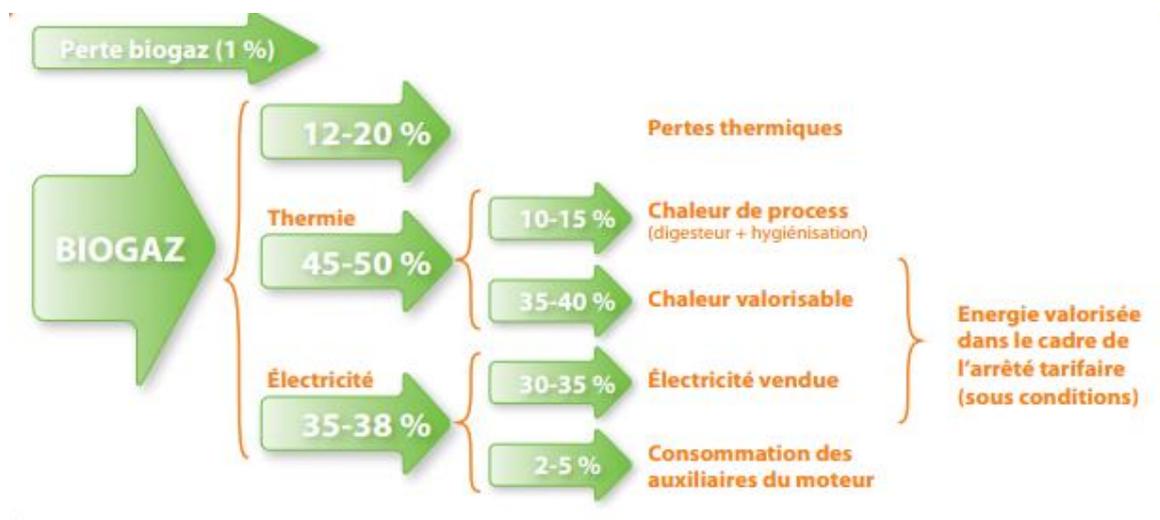


Figure 9: Rendement moyen d'une cogénératrice

Les caractéristiques énergétiques du projet sont détaillées dans le **tableau 9** suivant :

Tableau 10: Caractéristiques énergétiques du projet

Quantité de biogaz annuelle	204 700 (Nm³)
Composition du biogaz en CH₄	60 (%)
PCI du Méthane	9,94 (kWh/Nm³)
Temps de fonctionnement du moteur	8000 h/an
Rendement électrique	38 (%)
Rendement thermique	45 (%)
Energie électrique produite	464 (MWh é/an)
Energie électrique produite	550 (MWh th/an)
% d'énergie électrique à vendre	35 % (3% restant pour le moteur)
Energie électrique à vendre	427,3 (MWh é/an)
Chaleur du digesteur utilisée	122 (MWh th/an) (environ 10 %)
Chaleur valorisable	427,3 (MWh th/an)

Stockage du biogaz

Le gazomètre double membrane permet de stocker et d'homogénéiser le biogaz produit dans l'ensemble des deux digesteurs en marche. Un volume de stockage maximal est prévu à 150 Nm³ ce qui correspond à une capacité de stockage de 12 heures en fonctionnement normal. C'est un stockage tampon utilisé pour les petites maintenances de la cogénératrice ou les surproductions ponctuelles de biogaz.

Traitement et valorisation

Le biogaz produit contient en moyenne 60% de méthane. Une grande partie du reste de sa composition est du dioxyde de carbone.

Du sulfure d'hydrogène est présent en faibles concentrations (de 200 à 2500 ppm), ce gaz nécessite d'être éliminé de façon à limiter les risques de corrosion du moteur de l'unité de cogénération.

De l'eau est également présente en quantité non négligeable dans le biogaz. Sa présence entraîne une diminution du pouvoir calorifique du biogaz et une dégradation prématurée du moteur de cogénération.

Désulfuration biologique

Un système de micro injection d'air dans le ciel gazeux des digesteurs permet de créer un milieu favorable aux bactéries lithotrophes qui réduit l' H_2S en S_2 et en eau. La pose d'un filtre en charbon actif en amont du groupe de cogénération est également possible.

Séchage par refroidissement

Un sécheur biogaz situé dans le container de cogénération permet de diminuer l'humidité relative du biogaz à moins de 1% afin de limiter une dégradation prématurée des pistons.

Cogénération

Le biogaz, une fois épuré, est envoyé vers le groupe de cogénération.

Le moteur retenu pour traiter la quantité de biogaz produite est un moteur de 58 kW électriques et 69 kW thermiques.

Torchère

Le site doit disposer d'un dispositif de destruction du biogaz dans le cas où celui-ci ne pourrait être utilisé, une torchère de secours à flamme d'une puissance de 20 kW permet de brûler le biogaz excédentaire doit être installée.

De même, des soupapes de sécurité sont installées au niveau des rétentions de gaz.

4. Etude économique

4.1 Frais d'investissement

Le chiffrage lié à l'investissement est basé sur les informations fournies par Methajade, concepteur et installateur d'unités de méthanisation [26]:

Tableau 11: Frais d'investissement du projet

Equipements de l'installation	Prix de vente (euro)	% d'investissement
Digesteurs	45 000	62,0 %
Fosse et équipement de percolât	10 500	14,5 %
Traitement de gaz et cogénération	8 000	11,0 %
Equipements électriques, de gaz, de sécurité, etc	9 000	12,5 %
Investissement total	72 500	100 %

4.2 Frais de fonctionnement

D'après l'étude de l'ADEM [15], on peut estimer les charges de fonctionnement dans le **tableau 11** ci-dessous. Les coûts de fonctionnement sont rapportés au tonnage d'intrant, à la puissance et à l'investissement réalisé.

Main-d'œuvre Prévoir : de 1h (30 kWe) à 3h30 (500 kWe) par jour pour la conduite et l'entretien courant de l'installation. Le type de matières entrantes joue sur le temps de travail : apport de matières solides et apport de matières extérieures à l'exploitation (réception, contrôle).

Entretien et réparation : Compter 2 à 3% par an de l'investissement (hors cogénération) pour le fonctionnement des pompes, brasseurs, introduction de matière... Sur la partie cogénération, les coûts sont proportionnels à l'énergie électrique produite, compter 18 € / MWhé produit.

Approvisionnement en substrats : L'introduction des matières entrantes (2 €/t) génère des coûts de matériel et de transport qui peuvent être conséquents en fonction du contexte local.

Autres : Il est également nécessaire de compter les analyses annuelles (matières, digestat...) une éventuelle assurance spécifique, les frais financiers et les frais de gestion administrative.

Tableau 12: Frais de fonctionnement

Poste	Charge moyenne	Coût annuel
Transport des intrants	2 € / tonne d'intrants	4 200 €
Entretien et maintenance des équipements	2 % de l'investissement	1 500 €
Moteur de cogénération	18 € / MWh é produit	10 000 €
Total		15 700 €

4.3 Recettes

Le tarif d'achat d'électricité à partir d'une énergie renouvelable, d'après le décret [23], est estimé environs à 50 euro/MWh électrique.

Avec 427,3 MWh é produit les recettes annuelles seraient de **21 365 euro**.

Pour ce qui est de la chaleur, une production annuelle de 427,3 (MWh th/an) est à valoriser. Si on estime le prix d'achat à 40 euro/MWh thermique, les recettes annuelles seraient de **17 092 euro**

Au total, les recettes annuelles sont estimées environs à 38 500 euro.

A ces recettes principales, s'ajoutent d'autres gains plus difficilement chiffrables, tels que l'économie d'engrais minéraux, le confort d'épandage, la diminution des odeurs...

Pour être rentable, une installation doit montrer au moins un EBE positif.

L'excédent brut d'exploitation (EBE) est obtenu en soustrayant les frais d'exploitation au total des recettes, ce qui donne un EBE de 22 800 euro.

Une méthode pour contrôler la rentabilité est le calcul d'un Temps de Retour Brut (TRB). Celui-ci est élaboré uniquement lorsque le résultat net EBE affiche un montant positif.

Ce TRB est calculé comme suit : $TBR = \text{Coûts d'investissement} / \text{EBE}$

Le Temps de Retour Brut est calculé à 3,2 ans.

5. Conclusion

Cette première estimation a permis de montrer une rentabilité positive et un retour sur investissement sur 3 ans. Mais ceci reste théorique et typiquement hypothétique, étant donné, que nous avons estimé, d'abord, une quantité d'intrants constante durant toute l'année, alors que celle-ci est difficile à appliquer sur le terrain. Ensuite, nous avons fait l'hypothèse que le reste de l'électricité produite, qui n'est pas utilisée par l'installation, est injectée dans le réseau électrique et vendue ainsi que toute la chaleur produite par la cogénération est valorisée et vendue sur un réseau de chaleur. Or, cette démarche est assez délicate et nécessite l'installation d'un réseau d'injection assez coûteux et qui n'est pas pris en compte dans cette étude.

De même, cette étude n'a pas pris en compte, l'étude et l'entassement du terrain, la formation du personnel et les divers frais administratifs et législatifs.

Les effluents d'élevage ne sont pas en eux-mêmes très méthanogènes, compte tenu de leur faible teneur en carbone. En outre, la moitié seulement du carbone est transformée en méthane, selon un processus assez lent (un à deux mois de fermentation). Par conséquent, le seul traitement des effluents d'élevage produit peu d'énergie. Cette faible production est à mettre en regard des investissements nécessaires, qui sont élevés et qui donc peuvent être plus

facilement amortis avec l'incorporation d'autres matières organiques fermentescibles ou « co-substrats » comme les déchets alimentaires.

Le biogaz se stocke, mais de façon limitée par les capacités construites (un à trois jours tout au plus sans faire tourner le générateur électrique ; au-delà, il faut se résoudre à brûler en torchère le gaz non utilisé). La forme aujourd'hui privilégiée de valorisation est la production d'électricité, qui peut facilement être exportée sur le réseau. La cogénération sur place offre cependant un rendement électrique faible (35%). La chaleur co-produite est mal valorisée, sauf cas particulier, compte tenu des besoins très variables en chaleur, de l'impossibilité de la stocker, et de l'absence en règle générale de réseaux de chaleur.

La valorisation optimale de l'énergie serait obtenue par la vente de biogaz mais celui-ci doit être préalablement traité et il n'est pas encore accepté sur les réseaux.

Ce travail nous a permis d'appréhender la grande complexité de la valorisation des déchets fermiers. Outre la difficulté potentielle d'avoir un personnel qualifié pour l'exploitation rigoureuse du digesteur. Se pose aussi les questions de viabilité relatives aux tailles des exploitations qu'il conviendra de cibler. Enfin, la viabilité d'une filière ne peut se concevoir qu'avec l'accord et l'engagement de plusieurs acteurs pour que l'ensemble de la chaîne de valeur puisse fonctionner.

CONCLUSION GENERALE

La biométhanisation permet de transformer la matière organique en énergie, tout en préservant son potentiel fertilisant, aussi bien du point de vue de la matière organique que des éléments minéraux. Elle constitue donc une voie de valorisation énergétique de produits tels que les déjections d'élevage et les résidus de culture dont le retour au sol est indispensable. La biométhanisation offre donc une solution de valorisation énergétique de la biomasse qui, loin d'être en concurrence avec les impératifs agronomiques, est au contraire en synergie avec ceux-ci.

Le développement des unités de méthanisation et de valorisation énergétique de biogaz doit se faire en mobilisant massivement les secteurs industriels, les secteurs agricoles et les collectivités locales.

La valorisation des déchets organiques et principalement les déchets fermiers pour la production de biogaz pourrait être considérée comme une solution économique, décentralisée et écologique à ces problèmes à travers une autonomie énergétique et un développement agricole durable des zones rurales.

En Algérie, la volonté est présente pour mettre en place une politique et une législation concernant les énergies renouvelables, les énergies solaires et éoliennes sont déjà bien connues et sont en train de se développer.

Néanmoins, pour encourager le développement d'installations de production d'énergies renouvelables, un système financier et fiscal approprié et incitatif doit être mis en place. Pour l'instant, il n'existe aucune information autour de ce sujet.

Quatre conditions cadres pourraient être définies étant importantes pour réussir un développement de la filière du biogaz en Algérie :

1. Présence en quantités suffisantes de la matière organique méthanisable et les possibilités de les mobiliser.
2. Volonté politique ; présence législation et mesures incitatives (financières).
3. Rentabilité économique des installations de biogaz.
4. Fiabilité technique des installations de biogaz.

Dans cette étude, des hypothèses sont adoptées reposant sur l'expérience des autres pays en la matière. Ces pays ont mis au point des batteries de textes législatifs et de mécanismes de soutien pour baliser et rendre possible l'émergence de ces filières de bioénergie, qui ont toutes comme objectifs, l'autonomie des exploitations et la réduction des nuisances (mauvais odeurs, émissions des GGES, ...etc).

Pour songer à l'implantation massive de ce genre de valorisation dans notre pays, des recherches pilotes sur place s'avère être une étape primordiale pour montrer la fiabilité technique d'une installation de biogaz agricole à plus grande échelle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Production mondiale de biogaz, Planetoscope, consulté le 22/05/2016, disponible sur le site : <http://www.planetoscope.com/Source-d-energie/1575-production-mondiale-de-biogaz.html>)
- [2] N. Laskri, O. Hamdaoui et N. Nedjah. Traitement et valorisation des déchets par procédé de digestion anaérobie: production du biogaz. Revue des Energies Renouvelables, Numéros Spéciaux, Colloque International sur les Energies Renouvelables CER. 2007.
- [3] Görish, U. et M. Helm. La production de biogas. 2006. Paris: ULMER, 120 p
- [4] Brodeur, C. 2008. Biomasse agricole : biogaz et biocombustibles. Groupe AGÉCO. [En ligne]. [http://www.aqme.org/AxisDocument.aspx?id=1094&langue=fr&download=true&document=Catherine_Brodeur_\(AGECO\).pdf](http://www.aqme.org/AxisDocument.aspx?id=1094&langue=fr&download=true&document=Catherine_Brodeur_(AGECO).pdf) .
- [5] Chanakya, H. N. and R. Moletta "Technologies émergentes de biométhanisation de la biomasse végétale en Inde." L'Eau, l'Industrie, les nuisances 287, (2005).
- [6] Brauman, A., Fonty, G. et Roger, P. La méthanisation dans les écosystèmes naturels et cultivés. In Moletta, R., La méthanisation (2008). Paris, Éditions Tec & Doc. (chap. 2, p. 9-59).
- [7] Cascades (s.d.). Énergie Biogaz. In Cascades. Environnement, (Page consultée le 8 avril 2010). [En ligne]. http://www.cascades.com/papiers/biogaz_environnement.php
- [8] de La Farge, B. Le biogaz : procédés de fermentation méthanique. (1995). Paris, Masson. (Collection Ingénierie de l'environnement).
- [9] Ostrem, K. Greening Waste: Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes. (2004). Mémoire de maîtrise, Columbia University, New York.
- [10] A, Demeyer, F. Jacob, M. Jay, G. Menguy et J. Perrier, ' La Conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies', Edition Tec & Doc, 1980, pp. 213-215
- [11] A.Touzi, S. Igoud, S. Kehal, I. Tou, M. Bennouna et M. Slaim, 'Installation d'unité de production de biogaz à partir des déchets animaux : impact sur le développement de l'agriculture de montagne', Troisième Journées Scientifiques de l'INRAA, Bejaia, 2011

- [12] A, Demeyer, F. Jacob, M. Jay, G. Menguy et J. Perrier, ' La Conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies', Edition Tec & Doc, 1980, pp. 213-215.
- [13] B.D La Farge, 'Le Biogaz, Procédé de fermentation méthanique', Edition Masson, 1995, 237p
- [14] Bernet, N. et Buffière, P. Caractérisation de la mise en œuvre de la méthanisation. In Moletta, R., La méthanisation. (2008). Paris, Éditions Tec & Doc. (chap. 4, p. 87-113).
- [15] Aile, Solagro, Ademe, Trame. 2006. La méthanisation à la ferme. [En ligne]. <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?id=38550&p1=1&ref=12441>
- [16] M.PIDOUX ; « agriculture et effet de serre » édition D.A Environnemet, ANGERS, 2000
- [17] ROUEZ M., Dégradation anaérobie de déchets solides : caractérisation, facteurs d'influence et modélisation. Thèse INSA de Lyon, Ecole doctorale de chimie de Lyon, spécialités Sciences & Techniques du Déchet. 2006, 259 p.
- [18] Burton, C.H. et C. Turner. Manure management : treatment strategies for sustainable agriculture. 2003. United Kingdom: Silsoe Research Institute, 451 p.
- [19] O. Théobald, C. Schubetzer. La méthanisation en agriculture: technologies utilisées, intérêts économiques et environnementaux. Journées AFPPF – Prairies, élevage, consommation d'énergie et GES, 2006.
- [20] R. Moletta, Le biogaz « à la ferme », Rédigé pour RECORD, 2003.
- [21] Suivi expérimental de l'installation de méthanisation du GAEC du Bois Joly, APESA, Biomasse Normandie, ADEME 2010
- [22] M. Tersbøl et L. Malm, Financial Performance of Organic Biogas Production. SUSTAININGAS Report D 3.1, 2013
- [23] Décret exécutif n° 13-218, Les conditions d'octroi des primes au titre des coûts de diversification de la production d'électricité, 18 juin 2013.
- [24] Brassard, P., L. Hamelin, P. Singh et S. Godbout. Déjections animales, 2012. Révision de l'AGDEX 538 / 400.27

[25] I. Tou, S. Igoud et A. Touzi, Production de Biométhane à Partir des Déjections Animales, Rev. Energ. Ren : Production et Valorisation – Biomasse, (2001) 103-108 103

[26] J. MARTIN, METHAJADE, Energie De la biomasse, Projet n°20130590, 13 mai 2013