

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 du Futures

MEMOIRE DE Master

En Génie Chimique

Thème :

**Etude de faisabilité d'une installation de
méthanisation de déchets de bovins**

Présenté par :

➤ Melle Sara Anfel DRIS

Sous la direction de :

➤ Mr R.BOUARAB, Professeur, ENP

➤ Mr T.AHMED-ZAID, Professeur, ENP

Soutenue publiquement le (21/06/2016)

Composition du Jury :

Présidente

Mme R. DERRICHE

Professeur, ENP

Promoteur

Mr R.BOUARAB

Professeur, ENP

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



LAVALEF

Département du Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

MEMOIRE DE Master

En Génie Chimique

Thème :

**Etude de faisabilité d'une installation de
méthanisation de déchets de bovins**

Présenté par :

➤ Melle Sara Anfel DRIS

Sous la direction de :

➤ Mr R.BOUARAB, Professeur, ENP

➤ Mr T.AHMED-ZAID, Professeur, ENP

Soutenue publiquement le (21/06/2016)

Composition du Jury :

Présidente

Mme R. DERRICHE

Professeur, ENP

Promoteur

Mr R.BOUARAB

Professeur, ENP

Promoteur

Mr T.AHMED-ZAID

Professeur, ENP

Examinateur

Mr A. SELATNIA

Professeur, ENP

Examinatrice

Mme Y.TCHOULAK

MAA, ENP

ENP 2016

ملخص

إنّ مكافحة التغيرات المناخية تشكل تحدّ كبير, ما أدى إلى ظهور تكنولوجيات لإنتاج الطّاقة الخضراء. من بين هذه التكنولوجيات, نجد التّخمير اللاهوائي, الذي يعتمد على قدرة البكتيريا اللاهوائية على إنتاج الغاز الحيوي و هذا الأخير يحتوي على نسبة لا بأس بها من الميثان

يهدف هذا العمل لإنجاز دراسة مبدئية لقابلية إنشاء محطة إنتاج الغاز الحيوي انطلاقا من مخلفات الأبقار في ولاية سطيف. المشروع صمّم لمعالجة 11500 طنّ. الغاز الحيوي الناتج عن التخمير اللاهوائي لهذه المواد يقوم بتغذية محرك لتحويل الطّاقة ب 240 kW. الكهرباء الناتجة عنه تُسوّق.

التوليد المشترك للطاقة, الماشية الروث, الهضم اللاهوائي: الكلمات المفتاحية

Abstract

The fight against climate change is a major challenge which has allowed the development of some technologies to produce green energy. These technologies include anaerobic digestion, this technology benefit from the metabolic performance of anaerobic bacteria to produce biogas more or less concentrated methane.

This work aims to develop a preliminary feasibility study approach for implementing a biogas plant project cattle manure in a region such the province of Setif. The project is being developed to treat 11,500 tons. The biogas produced by the anaerobic digestion of the substrate fed to a co-generation engine 240 kilowatts in which electricity is to be sold.

Key words: anaerobic digestion, cattle manure, cogeneration.

Résumé

La lutte aux changements climatiques est un défi d'envergure qui a permis l'essor de quelques technologies de production d'énergie verte. Parmi ces technologies, on trouve la méthanisation, celle-ci profite de la performance métabolique de bactéries anaérobies pour produire un biogaz plus ou moins concentré en méthane.

Ce travail a pour objectif d'élaborer une démarche d'étude de faisabilité préliminaire d'implantation d'un projet de centrale de méthanisation de déjections bovines dans une région type de la wilaya de Sétif. Le projet est élaboré afin de traiter 11 500 tonnes. Le biogaz produit par la méthanisation de ce substrat alimente un moteur de co-génération de 240 kW dont l'électricité doit être vendue.

Mots clés : méthanisation, déjections bovines, cogénération.

À mes très chers MAMANS et tante FADIA

*Je dédie ce travail à ma très chère mère, en témoignage de mon profond respect,
mon grand amour et*

toute ma gratitude pour les sacrifices que tu m'as consenti.

Tu m'as donné toute l'attention et tout l'amour qu'un être puisse espérer.

Aucun de mes mots ne saurait exprimer l'ampleur de ma reconnaissance.

*Intelligente, accueillante, sage, sont tes qualités. Mon amour pour toi est
grand, et tu*

me donnes la joie de vivre.

À ma tante bien aimée,

*Qui grâce à elle j'ai pu finir ce travail, merci pour tes instructions, ton
soutien.*

Que le tout puissant vous accorde une longue vie.

*Vos prières et vos conseils m'ont toujours accompagné et ont éclairé mon
chemin.*

Puisse le tout puissant vous accorder meilleure santé et longue vie.

Remerciements

C'est avec un grand plaisir que je tiens à exprimer toute ma gratitude à tous ceux qui ont contribué de à la réalisation de ce mémoire.

Je tiens tout d'abord à remercier monsieur R.BOUARAB, Professeur à l'école nationale polytechnique d'Alger, d'avoir proposé et dirigé ce travail.

Mes vifs remerciements s'adressent à monsieur T.AHMED ZAID, Professeur à l'école nationale d'Alger d'avoir accepté de diriger ce travail.

*Je tiens aussi à adresser 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 de ce travail.*

Table des matières

<i>Remerciements</i>	6
Liste des figures	11
Liste des tableaux	12
Introduction	14
<i>Chapitre 1 : synthèse bibliographique</i>	16
1. La production de bovin en Algérie	17
1. 1. Evolution des effectifs bovins	17
1.2 Répartition géographique des effectifs bovins	18
1. 3 Les différents types de déchets de bovin	18
1. 3. 1. Le lisier	18
1. 3. 2. Le fumier	18
1. 3. 3. Les lixiviats	19
2. La méthanisation	20
2. 1. Un processus microbiologique efficace	20
2. 2. Un processus maîtrisé d'un point de vue technologique	21
2. 3. Technologies de méthanisation	22
2. 3. 1. Bassin anaérobie couvert	22
2. 3. 2. Digesteur « Plug-flow »	23
2. 3. 3. Digesteur infiniment mélangé	23
2. 4 Paramètres influençant la biométhanisation	24
2. 4. 1. La température	25
2. 4. 2. Le pH	25
2. 4. 3. L'alcalinité	25
2. 4. 4. L'agitation	26
2. 4. 5. Le potentiel d'oxydoréduction	26
2. 5 Pertinence de la méthanisation	26
2. 6 Les perspectives de la méthanisation	28
2. 6. 1. Une autonomie énergétique	28
2. 6. 2. Un développement économique du territoire	28
2. 6. 3. Une valorisation sociale du monde agricole et forestier	28
2. 6. 4. Des retombées environnementales	28
2. 6. 5. Des avantages agronomiques	30

2. 7.	Principe d'une unité de méthanisation	30
2. 7.1.	Description du flux de matière au sein de l'unité de méthanisation	30
	<i>Chapitre 2 : étude de faisabilité du projet de méthanisation</i>	33
1.	Expériences d'exploitation de la méthanisation	34
2.	Cas de l'Algérie.....	36
3.	Problématique.....	38
3. 1.	Localisation : source d'approvisionnement, logistique et intérêt de la filière	39
3. 2.	Localisation de la centrale de méthanisation.....	39
3. 2. 1.	Situation géographiques de la wilaya de Sétif	40
3. 3.	Identification des sources d'approvisionnement de déchets de bovin	41
3. 4.	Identification des sites d'implantation potentiels.....	43
4.	Investigation technique	45
4.1.	Portrait global du projet.....	45
4.2.	Entreposage	46
4.3.	Stratégie de collecte et coûts de transport des déjections.....	47
4.4.	Système de méthanisation	48
4. 4. 1.	Le digesteur.....	48
4. 4. 2.	Le système de chauffage	49
4. 4. 3.	Agitation du milieu	49
5.	Infrastructures et coûts du digesteur.....	49
5. 1	Construction du digesteur.....	49
5. 2	Consommation de Chaleur du digesteur	50
5. 3	Consommation du système d'agitation	50
6.	Production du biogaz.....	51
7.	Valorisation énergétique du biogaz.....	52
7. 1.	Dimensionnement.....	53
7. 1.1.	L'énergie pouvant être produite par le biogaz en un an	53
7. 1. 2.	L'énergie valorisable en un an	53
7. 1. 3.	L'énergie fournie par le biogaz en une heure et choix du moteur.....	53
8.	La production annuelle d'énergie.....	54
9.	Analyse économique de l'installation	55
9. 1.	Coût d'investissement initial.....	55
9. 2.	La durée de retour sur investissement	55

9. 2. 1 .le gain annuel de l'installation	56
9. 2. 2 le temps de retour sur investissement.....	56
Conclusion.....	57
Références bibliographiques	58
Annexe 1 : cout de construction du digesteur	64
Annexe 2 : Calcule du coût système de chauffage.....	65
Annexe 3 : le coût d'investissement initial	66
Annexe 4 : Le retour sur investissement	66

Liste des figures

Figure 1: voie de dégradation des substrats carbonés en conditions anaérobies	20
Figure 2 Déroulement de la méthanisation, source Idex	21
Figure 3 : Cycle de vie des matières méthanisées.	29
Figure 4 : Schéma de principe d'une usine de méthanisation territoriale	31
Figure 5 : Digesteur de méthanisation parfaitement agité.....	37
Figure 6 : Relief de la région de Sétif	40
Figure 7 : Schéma de principe du projet de méthanisation de lisier	46
Figure 8 : digesteur type fosse infiniment mélangé	48
Figure 9 : Schéma du procédé Valogra	49
Figure 10 : Schéma de la station de valorisation du biogaz	52

Liste des tableaux

Tableau 1 : Evolution des effectifs 2003-2010 (10 ³ têtes)	17
Tableau 2: potentiel méthanogène des différents types de déjections bovines	19
Tableau 3 :Efficacité environnementale des options de gestion des déjections animales.....	26
Tableau 4 Nombre d'unités animales en inventaire et quantité de déchets générée par commune :	42
Tableau 5 : la production de bovin en inventaire à l'intérieur du rayon d'approvisionnement de cinq kilomètres	44
Tableau 6 :cout annuel de transport du substrat	47
Tableau 7 : cout de la consommation énergétique pour l'agitation	51
Tableau 8 : production annuelle et caractéristiques du biogaz par la centrale	51
Tableau 9 : caractéristique du moteur de co-génération, production d'électricité	54



Introduction

Introduction

L'année 2008 marque l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto. Alors que la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre est dorénavant au cœur de l'actualité et des préoccupations des populations de la planète, les sources d'énergie renouvelables, dites vertes, semblent avoir le vent dans les voiles. Dans certains pays tels que les États-Unis, l'Union Européenne et même aujourd'hui en Algérie, cette tendance a poussé les agences de production et de distribution d'énergie, et les gouvernements, à établir des plans d'intégration de l'énergie verte.

L'utilisation du biogaz est l'une des plus vieilles sources d'énergie considérée verte. Issu de la décomposition en anaérobie de biomasse, le biogaz se compose essentiellement de méthane (CH₄) (de 50 à 85 %), de gaz carbonique (CO₂), de quantité variable d'eau et d'hydrogène sulfuré dans différentes proportions selon le substrat utilisé [1]. Théoriquement, toutes les matières organiques, telles que les déjections animales, les résidus de table, les résidus d'abattoir, les boues d'eaux usées, les fruits et les légumes, peuvent être utilisées pour générer du biogaz. La technologie de la digestion anaérobie est utilisée pour optimiser la production de biogaz à partir de la biomasse. Le biogaz permet de remplacer l'utilisation de combustible fossile non renouvelable pour produire de l'électricité, de la chaleur ou de l'énergie mécanique [2]. Plusieurs installations dans le monde ont démontré que cette technologie pouvait jumeler le traitement de matières résiduelles organiques et la production d'énergie [3].

Des projets d'ampleur de méthanisation ont été annoncés pour la gestion environnementale des matières résiduelles organiques dans le monde. Cette technologie prometteuse pour la réduction des impacts environnementaux des déjections animales et des matières résiduelles organiques peut-elle être implantée en Algérie sous forme de grand projet centralisé à l'image des centrales en fonction au Danemark depuis plus d'une vingtaine d'années ? La table est mise pour de petits projets de méthanisation en Algérie. Comment, dans quels contextes et sous quelles conditions ? Cet essai rédigé dans le cadre de l'obtention du titre de master 2 en génie chimique, a pour objectif général d'élaborer une démarche d'étude de faisabilité préliminaire d'implantation d'un projet d'une installation de méthanisation de déchets de bovin à une région type de l'Algérie.

L'étude doit démontrer la faisabilité ou la non-faisabilité du projet et dans quelle mesure.

À travers l'étude de faisabilité, quatre objectifs spécifiques orientent la démarche principale.

- 1) Élaborer un cas d'implantation d'un projet de méthanisation de déchets de bovin, jumelé à la production d'électricité en cogénération dans une région type de Sétif possédant un potentiel important d'élevage.
- 2) Relever les aspects économiques, sociaux et environnementaux d'un projet d'une installation de méthanisation.
- 3) Déterminer la faisabilité selon la viabilité économique, la réduction des impacts environnementaux des déchets de bovin et la valorisation efficiente de l'énergie et de la matière fertilisante.



Chapitre 1 : synthèse bibliographique

1. La production de bovin en Algérie :

L'étude de la situation de l'élevage bovin en Algérie, ne peut se faire que dans son contexte naturel, celui de l'agriculture. En effet, la progression de l'élevage est liée au développement de l'agriculture dans son ensemble; car, il est impossible de dissocier élevage, agriculture et sylviculture [4]. Ainsi, l'activité agricole est souvent combinée avec l'élevage et l'exploitation des forêts, ceci correspond aux systèmes agro-sylvo-pastoraux traditionnels [5].

En Algérie, l'élevage ovin prédomine, il représente 78% du total des effectifs (Figure2), suivi par les caprins 14%, puis l'élevage bovin qui représente seulement 6% de l'effectif globale dont 58% des vaches laitières [6]. Selon Auriol, 1989, l'élevage des bovins est exploité principalement pour la traction animale que la viande et le fumier.

1. 1. Evolution des effectifs bovins

Le tableau 1 représente l'évolution des effectifs des animaux d'élevage entre 2003 et 2010. 78 pourcent de l'effectif est constitué par le cheptel ovin, 14 pourcent par les caprins, les bovins ne représentent que 6 pourcent des effectifs. Les régions steppiques et présahariennes détiennent 80 pourcent de l'effectif total constitué essentiellement par le cheptel ovin.

La race principale bovine locale est la race brune de l'Atlas qui est subdivisée en 4 races secondaires [7]: la Guelmoise à pelage gris foncé vivant en zone forestière ; la Cheurfa à robe blanchâtre que l'on rencontre en zone préforestière ; la Chélifienne à pelage fauve ; la Sétifienne à pelage noirâtre adaptée à des conditions plus rustiques.

Tableau 1 : Evolution des effectifs 2003-2010 (10³ têtes) [7]

Année	2003	2004	2005	2006	007	2009	2010
Bovin	1560	1614	1586	1607	1633	1682	1747
Vaches BLM*	192	199	204	208	216	229	915
Vaches BLA**	640	645	624	639	643	652	915

*BLM: Bovins laitiers modernes / **BLA: Bovins laitiers améliorés

1.2 Répartition géographique des effectifs bovins

La répartition de l'élevage bovin est fonction de l'altitude. Il prédomine jusqu'à 1500m dans les plaines et les vallées. Au delà de 1500 m, on rencontre des ovins, des caprins et rarement des bovins en saison hivernale car ces bovins transhument vers les piedmonts à la fonte des neiges [6]. En effet, cet élevage est cantonné dans le nord du pays où il représente 53% des effectifs, par contre il ne représente que 24.5% et 22.5% dans les régions centre et ouest (Figure5). Cela est expliqué par la richesse des régions d'est par les prairies dues à une forte pluviométrie [8].

1.3 Les différents types de déchets de bovin

Le volume de déjections produit par un animal dépend essentiellement de son niveau d'ingestion, celui-ci est en lien directe avec le niveau de production de l'animal, d'autre part les modes de stabulation des bovins sont extrêmement complexes et aboutissent à la production de produits très différents, allant du lisier dilué au fumier très compact.

Les quantités et la composition des déjections varient également selon les types d'animaux, le type d'alimentation, le niveau de paillage... [9]

En règle générale, on peut distinguer :

1.3.1. Le lisier

Constitué de déjections animales mélangées présentant un faible taux de matière sèche. Il peut contenir un peu de paille ou des restes d'alimentation, 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.

1.3.2. Le fumier

Il est le résultat du mélange dans le bâtiment des déjections animales avec de la paille (ou une litière de copeaux, de sciures...), ce qui donne un effluent assez sec, facilement manipulable et stockable. Il est stocké après raclage sur une plate-forme. On distingue plusieurs types de fumier :

- **Fumier très compact** : il est issu de la litière accumulée (en stabulation aire paillée intégrale par exemple).
- **Fumier compact** : il est issu de litière en stabulation pente paillée ou en étable entravée.
- **Fumier mou** : il est issu de raclage des logettes ou d'aire d'exercice paillée par exemple.

Ainsi le volume de purin issu de ces fumiers varie en fonction de leur nature, en d'autres termes un certain nombre de situations peut aboutir à des déjections ne relevant pas de ces catégories.

D'autre part ces déjections possèdent un potentiel méthanogène assez important qui permet de qualifier ce type de biomasse comme source d'énergie renouvelable.

Tableau 2: potentiel méthanogène des différents types de déjections bovines [10]



	Matière organique kg Matière Organique/ tonne matière brute	Potentiel biométhanogène Nm ³ CH ₄ /tonne de matière organique	Potentiel biométhanogène Nm ³ CH ₄ /tonne de matière brute
Lisier (MS 3 – 11%)	50	293	14,7
Fumier mou (MS <=18%)	144	232	33,3
Fumier compact (18% < MS < 25%)	173	240	41,6
Fumier très compact (MS >=25%)	236	203	47,7

Concernant les autres types d'effluents, on peut distinguer : [9]

1. 3. 3. 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.

L'intérêt que les excréments de bovidés offrent sur le plan bioénergétique relève de quelques considérations quantitatives à propos du niveau « consommateurs primaires » représentés par le bétail. En effet, les bovidés domestiques absorbent par jour (dans des conditions de charge normales), approximativement 2000 Kcal/m² soit 1/8 de la productivité primaire. Mais ils en rejettent 1250 Kcal/m² sous la forme de matières organiques non assimilées c'est-à-dire d'excrétas. En d'autres mots, plus de la moitié de ce qui est ingéré par

le bétail est rejeté à la surface du sol sous la forme de déjections. Celles-ci, distribuées de manière dispersée, constituent donc un stock permanent de petites unités d'énergie potentielle. En plus de leur richesse en matières organiques les déjections offrent au sol quantité de bioéléments indispensables au sol [11].

2. La méthanisation

2. 1.Un processus microbiologique efficace

La méthanisation (également appelée digestion anaérobie) est un processus biologique de transformation de la matière organique en molécules simples en l'absence d'oxygène. Elle aboutit à la production de la forme la plus réduite du carbone le méthane. Le gaz issu de la méthanisation appelé biogaz et est un mélange entre méthane (CH_4) et dioxyde de carbone (CO_2).

La digestion anaérobie est réalisée par un écosystème microbien en condition d'anaérobiose stricte et en milieu réducteur (potentiel redox inférieur à -320 mV) [12].

La production de biogaz est ainsi réalisée grâce à une association de différents microorganismes qui décomposent les composés organiques. On peut donc résumer l'enchaînement des réactions microbiennes sous la forme de 3 étapes présentées sur la figure suivante :

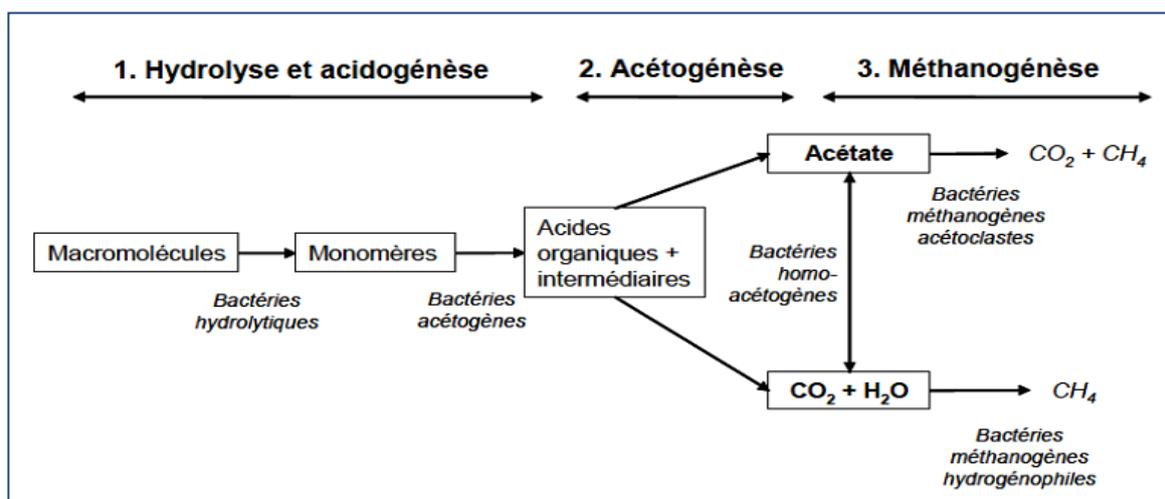


Figure 1 : voie de dégradation des substrats carbonés en conditions anaérobies [13]

L'hydrolyse est la phase où les polymères qui constituent la matière organique (MO) sont dégradés en monomères. Puis ces monomères sont utilisés dans l'étape d'acidogénèse, ce qui permet la fabrication d'acides organiques. Ces derniers sont des substrats pour l'étape d'acétogénèse qui est l'étape de transformation des composés issus de la phase précédente en précurseurs directs du méthane : l'acétate, le dioxyde de carbone et l'hydrogène. L'acétate est susceptible d'être dégradé en CO₂.

La dernière étape est réalisée par les bactéries méthanogènes (hydrogénophiles ou acétoclaste selon le substrat qu'elles utilisent), qui produisent le biogaz. Tous les produits carbonés peuvent servir de substrats à la digestion anaérobie, cependant l'efficacité de la réaction dépend de la structure de ces produits. En effet, si le composé contient des molécules fortement résistantes à la dégradation, comme la lignine, le rendement de la production de biogaz sera faible [14]. Pour une même teneur en matières organiques le rendement sera d'autant plus élevé que la matière organique sera dégradable.

2. 2. Un processus maîtrisé d'un point de vue technologique

La méthanisation génère une modification profonde de la matrice organique, comme l'illustre la Figure 2. Le carbone le plus facilement accessible (lipides, glucides) est dégradé en biogaz et en digestat. Celui-ci est constitué des composés résiduels de la digestion anaérobie

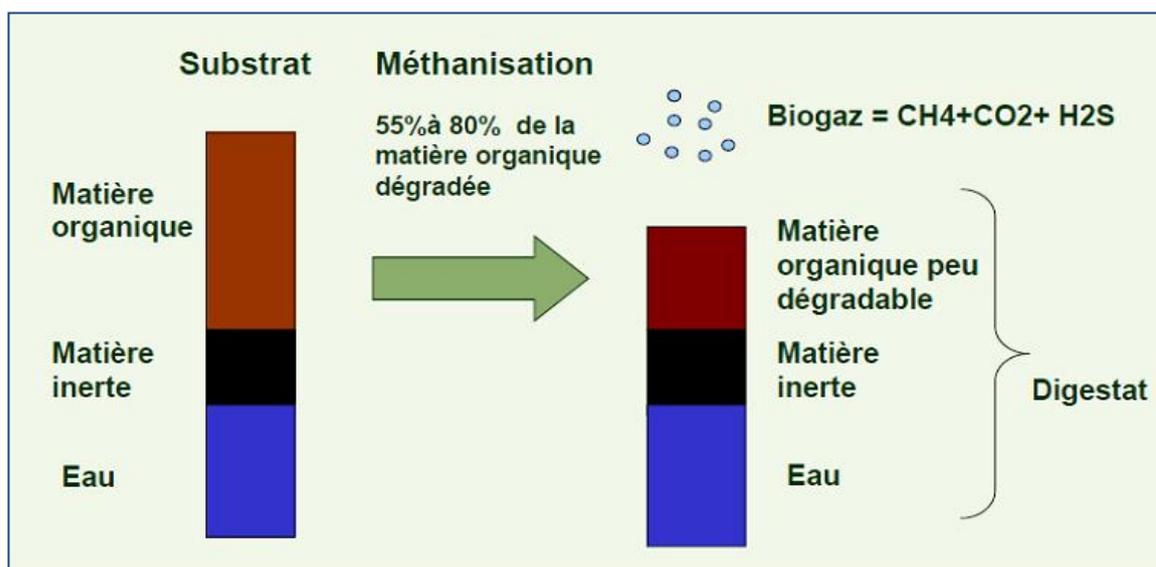


Figure 2 Déroulement de la méthanisation, [2]

La matière organique (MO) est potentiellement dégradable par des êtres vivants. On peut la mesurer quantitativement comme la matière volatilisée lors du séchage à haute température. Selon sa biodégradabilité, une part plus ou moins importante de la MO (de 50 à 90 %) est transformée en biogaz par les micro-organismes. Ce processus microbiologique a été maîtrisé au sein de réacteurs biologiques appelés méthaniseurs. Il s'agit d'un réacteur anaérobie alimenté en substrats organiques, agité de manière homogène. Il est équipé d'un système de récupération d'une part du biogaz et d'autre part du digestat. Il existe plusieurs technologies de méthanisation :

2. 3. Technologies de méthanisation

Tout projet de méthanisation repose sur des technologies de digestion anaérobie. Il existe sur le marché mondial plusieurs technologies optimisées par différentes compagnies telles que Valorga, Lipp, Kompogas, Bio-Terre Systems et quelques autres. À la base, tout système de méthanisation est constitué de quatre composantes. Le digesteur (également nommé bioréacteur), l'entreposage de l'affluent et de l'effluent, le système de collecte et de traitement du biogaz et le système de combustion selon le mode de valorisation du biogaz [15]. L'élément clé de cette technologie demeure le digesteur. Une description sommaire des particularités des technologies de digesteur existantes est présentée ci-dessous.

2. 3. 1 Bassin anaérobie couvert

Le principe du bassin anaérobie couvert consiste en une fosse, un bassin ou un étang aux parois étanches qui, tout comme son nom l'indique, est couvert ou même partiellement couvert. Pour être considéré comme un traitement par méthanisation et non simplement une structure d'entreposage couverte, l'installation doit d'abord être intégrée aux trois autres composantes du système de méthanisation. De plus, les conditions du milieu dont la charge organique d'alimentation, le pH, la température et le niveau de dilution doivent faire l'objet d'un suivi afin de maintenir les conditions de digestion anaérobie [15]. Puisque le bassin couvert est généralement exposé aux variations de température externe, la température du bassin doit être maintenue par un système d'échange de chaleur.

Le temps de rétention nécessaire au traitement varie de 60 à 360 jours ce qui implique de larges bassins pour traiter les résidus d'une seule ferme. La fraction que représente l'alimentation est minime en comparaison au contenu total du bassin dans lequel la charge organique a déjà été réduite. Cela permet d'alimenter le système avec des déjections à forte

teneur en solides totaux. Le tout se traduit en une faible charge organique du volume en digestion soit de 0,05 à 0,2 kg de DCO/m³/jour. [2].

Ce système a pour avantage d'être moins coûteux tant au niveau de l'investissement qu'au niveau de l'opération comparativement aux autres modèles de digesteur et son design est simple.

Toutefois, il nécessite beaucoup d'espace au sol par m³/an de déjection à traiter à cause du temps de rétention du traitement. De plus, les fluctuations saisonnières de température rendent instable la production de méthane [2].

2. 3. 2. Digesteur « Plug-flow »

La particularité de ce concept est l'alimentation du substrat mélangé avec une part d'inoculum. Le tout est introduit dans le digesteur par une extrémité, ce qui a pour effet d'entasser le contenu du digesteur et de pousser le digestat qui ressort à l'autre extrémité. Cette technique réduit le brassage ce qui assure, malgré une alimentation continue, un temps de rétention suffisant de la matière avant sa sortie. Cette technique est utilisable seulement avec des substrats organiques dont la teneur en solides totaux est élevée soit de 11 à 14 %. Ce type de système n'est pas approprié pour les déjections fortement diluées tel que le lisier. Le taux d'alimentation organique doit se situer entre 1 et 6 kg de DCO/m³/jour et le temps de rétention de traitement joue de 18 à 20 jours [2].

Ce traitement a l'avantage et l'inconvénient d'être adapté seulement aux substrats riches en matières sèches.

2. 3. 3. Digesteur infiniment mélangé

Le digesteur infiniment mélangé consiste en un réservoir fermé, généralement cylindrique, dans lequel le substrat y est continuellement homogénéisé [2]. Le brassage peut se faire mécaniquement ou par la réinjection des biogaz au fond de la cuve. L'alimentation peut se faire par cycle ou en continu et l'efficacité de la digestion est préservée en conservant une partie des boues activées du cycle précédent. Le taux d'alimentation peut varier de 1 à 10 kg de DCO/m³/jour et le temps de rétention de traitement joue de 5 à 20 jours [2].

Ce système a l'avantage d'être adaptable à un large spectre de teneur en solides totaux (3 à 10 %) et à plusieurs types de substrats. Cependant, l'agitation continue, si trop forte, peut réduire l'efficacité de digestion qui demande un minimum d'immobilisation nécessaire

au travail des bactéries. Le système de brassage augmente les coûts d'investissement initial, ainsi que les coûts d'opération et d'entretien, surtout dans le cas du brassage mécanique [2].

Cependant il existe 2 types de méthanisation en fonction du régime de température appliquée :

- **Méthanisation thermophile (température 55°)** : les matières sont dégradées plus rapidement que dans les autres types de méthanisation mais le méthaniseur est sensible aux variations de température. Si le chauffage du digesteur n'est pas parfaitement constant, on assiste à une diminution rapide de la production de biogaz (populations microbiennes très sensibles).
- **Méthanisation mésophile (température 35°)** : c'est le type de méthaniseur classique car l'exploitation est réputée comme étant « robuste » face aux conditions pH et température à appliquer.

Les caractéristiques des substrats utilisés lors de la méthanisation déterminent le pourcentage de matière sèche en entrée et donc si le procédé sera en condition humide (10-20% MS) ou en condition sèche (30-40% MS). Les traitements en amont des intrants ou en aval du digestat peuvent aboutir à des installations plus complexes et permettant de traiter les matières de manière plus poussée. Par exemple une hygiénisation des intrants avant le processus de méthanisation pour éviter les contaminations ou un post traitement du digestat pour sa valorisation sont envisageables.

2.4 Paramètres influençant la biométhanisation

La méthanisation est un processus biologique complexe qui nécessite certaines conditions pour se réaliser correctement, il se déroule en enceinte fermée (appelée digesteur, fermenteur, ou réacteur) généralement calorifugée afin d'y maintenir une température constante.

Les principaux paramètres pris en compte sont :

2. 4. 1. La température

Généralement entre 30 et 40°C, on parle alors de procédés mésophiles. Il existe un second type de procédé, dit thermophile, où la température se situe en 45 et 60°C. Ce dernier procédé est plus rapide que le premier mais aussi plus fragile. [16]

2. 4. 2. Le pH

Le pH optimum de fonctionnement est proche de la neutralité et donc à des valeurs comprises entre 6,5 et 8,5. Le pouvoir tampon du milieu joue un rôle important pour maintenir la stabilité du système. Il est parfois nécessaire de corriger ses variations dans l'alimentation par ajouts de produits correcteurs (soude ou acide phosphorique par exemple). [17]

2. 4. 3. L'alcalinité

Dans un digesteur, on trouve deux types d'alcalinité : celle due aux AGV et celle due aux bicarbonates.

L'alcalinité due aux bicarbonates de calcium doit être relativement élevée pour bien fonctionner. On considère, en général, qu'il est nécessaire d'avoir au moins à 1000 mg/L d'alcalinité (exprimée en CaCO_3) dans un réacteur qui fonctionne bien [17]. Le carbonate joue non seulement le rôle de pouvoir tampon mais contribue aux équilibres des diverses formes du gaz carbonique dissous. Un effluent chargé en azote organique va produire dans le digesteur de l'azote ammoniacal, qui contribuera à générer de l'alcalinité, permettant ainsi un fonctionnement plus stable du digesteur.

D'autre part la détermination de la concentration en Acides Gras Volatils permet de s'assurer que les réactions de dégradation se déroulent correctement. En effet, la principale cause d'acidification du milieu se situe au niveau de l'accumulation d'acides gras volatils. Une concentration en AGV inférieure à 3 g/l est préconisée [18].

Cependant dans la digestion des déchets solides, et en particulier dans les digesteurs fonctionnant en voie sèche, des taux d'AGV supérieurs (5 g/L) peuvent être constatés, sans affecter le rendement de dégradation. Le rapport AGV/TAC est également important ; il est conseillé qu'il demeure inférieur à 0.8 [19]

2.4.4. L'agitation

Une bonne agitation permet de maintenir les matières solides en suspension, d'éviter la formation de mousse ou de croûte, d'accroître la surface d'échange, d'assurer le transfert de chaleur et de faciliter le dégagement des bulles de biogaz.

2.4.5. Le potentiel d'oxydoréduction

Ce paramètre représente l'état de réduction du système, il affecte l'activité des bactéries méthanogènes. Ces bactéries exigent en effet, outre l'absence d'oxygène, un potentiel d'oxydoréduction inférieur à 330 mV pour initier leur croissance.

2.5 Pertinence de la méthanisation

Souvent les producteurs animaliers, dont les producteurs de bovins, font face à quatre grands défis : le contrôle des odeurs, la gestion des déjections, la protection de l'environnement et demeurer concurrentiels. Plusieurs options sont envisageables pour chacun de ces défis, mais rares sont celles qui, tout comme la méthanisation, peuvent concilier les quatre.

Une étude de l'Environmental Protection Agency des États-Unis (2002) a comparé les 10 avantages environnementaux et économiques de la gestion des lisiers par méthanisation (tableau 1.1). Il en est ressorti que toutes les technologies de méthanisation assurent un excellent contrôle des odeurs, une réduction élevée des GES et une bonne protection de la qualité de l'eau.

Options	Contrôle des odeurs	Réduction GES	Protection qualité de l'eau	Fenêtre de coût ⁽²⁾ (\$/UA)
Lagune couverte (DA) avec étangs d'entreposage ouvert	E	H	B	150-400
DA infiniment mélangé	E	H	B	200-400
«Plug-flow» avec réservoirs d'entreposage ouverts	E	H	B	200-400
Étangs aérés avec étangs d'entreposage ouverts ⁽¹⁾	B-E	H	J-B	200-450
Étangs de traitement et d'entreposage en série	J-B	F	B	200-400
Étangs de traitement et d'entreposage combinés	P-B	F	J-B	200-400
Étangs et réservoirs d'entreposage	P-B	M-H	P-F	50-500

Tableau 3 : Efficacité environnementale des options de gestion des déjections animales [20]

Légende : P = pauvre, J = juste, B = bon, E = excellent, F = faible, M = moyen, H = élevé,

(1) L'énergie nécessaire à l'aération des étangs augmente la fenêtre de coût de 35 à 50 \$ par UA.

(2) La fenêtre de coût n'inclut pas les coûts annuels d'opération et de maintenance.

Le traitement des déjections animales par digestion anaérobie réduit et contrôle les odeurs de deux façons. D'abord, les microorganismes fragmentent la matière complexe (lipides, protéines, etc.) en composés organiques volatiles (COV), puis convertissent, théoriquement, presque tous ces COV en méthane et en CO₂ si le temps de rétention est suffisant [15],[20],[21]. Plusieurs de ces COV, incluant les acides gras volatils qui sont en partie responsables des odeurs, sont ainsi éliminés par la méthanisation.

Paradoxalement, tout comme pour les COV, l'ammoniac (NH₄) et le sulfure d'hydrogène (H₂S), deux composés largement associés aux odeurs des déjections animales, sont issus de la décomposition de la matière organique en absence d'oxygène. Les conditions de la méthanisation favorisent la production de ces composés nauséabonds. Toutefois, le milieu fermé de la méthanisation permet de contenir leur émanation et de les neutraliser par le biais de divers procédés de filtration intégrés au système [22]; [23]; [24]; [25].

Plusieurs études, des organisations telles que la California Climate Action Registry [22] et l'Environmental Protection Agency Climate Leaders des États-Unis [26] reconnaissent la performance de la méthanisation en terme de réduction de GES. La nature et la quantité de GES émis par les déjections animales découlent des conditions dans lesquelles elles sont produites, collectées, transférées, entreposées, traitées et utilisées [22]

Les deux principaux GES en cause dans la production animale sont le méthane, 22 fois l'effet du CO₂, et le N₂O, 310 fois l'effet du CO₂. La méthodologie de calcul d'émission et de réduction des GES à la ferme de l'EPA Climate Leader, utilisée pour l'Inventory of U.S GHG Emission and Sinks : 1990-2004 réalisé par l'EPA [22], a permis d'estimer la performance de réduction de GES de la méthanisation de 95 % à 100 %. Cette performance est relative au niveau de base et du potentiel total d'émission de GES des déjections. Ce calcul tient compte des émissions du système de combustion et de l'utilisation occasionnelle de carburant pour alimenter ce dernier. Les émissions de CO₂ des déjections sont exclues du calcul, puisqu'il s'agit d'une source biogénique de GES [26]; [22].

2. 6 Les perspectives de la méthanisation [27]

2. 6. 1. Une autonomie énergétique

L'autonomie énergétique du territoire est souvent l'argument principal des porteurs de projet. La prise de conscience de l'épuisement des gisements des ressources fossiles, le coût actuel de l'énergie ainsi que la question de la dépendance en combustibles fossiles font émerger l'idée de la valorisation énergétique de la biomasse et ainsi contribuer, avec le concours d'autres énergies vertes, à l'autosuffisance énergétique des territoires ruraux.

2. 6. 2. Un développement économique du territoire

Les projets de valorisation énergétique de la biomasse ont des retombées économiques non négligeables pour les territoires :

- ◆ création d'emplois locaux et pérennes (insertion sociale des travailleurs en difficulté souvent favorisée),
- ◆ création d'une économie locale stable et non délocalisable,
- ◆ valorisation économique d'un "sous-produit",

2. 6. 3. Une valorisation sociale du monde agricole et forestier

La valorisation énergétique de la biomasse permet de revaloriser le statut de l'agriculteur au sein du territoire. En effet, en produisant la chaleur localement, à un prix attractif pour les habitants, l'agriculteur ou l'éleveur acquiert un nouveau statut social auprès des autres acteurs. [27]

2. 6. 4. Des retombées environnementales

Les retombées environnementales d'un tel projet sont nombreuses.

◆ Réduction des émissions de gaz à effet de serre

Les matières organiques en fermentation dans des conditions anaérobies (sans oxygène) émettent naturellement du méthane, dont l'effet de serre est 20 à 25 fois plus important que celui du CO₂ émis lors de la combustion de méthane. De plus, ce CO₂ fait partie du cycle de vie naturel de la biomasse et n'est pas d'origine fossile. En permettant de capter le méthane pour produire de l'énergie, la méthanisation permet de contrôler les émissions de gaz à effet

de serre dans l'atmosphère. L'utilisation de biométhane à la place du gaz naturel permet d'économiser du gaz naturel et remplace des émissions « **artificielles** » de CO₂ par des émissions « **naturelles** ».

◆ Production d'énergie renouvelable à l'échelle locale (production d'électricité ou réseau de chaleur)

L'énergie produite à partir du biogaz est une énergie renouvelable car le méthane n'est pas d'origine fossile comme dans le gaz naturel par exemple, mais produit à partir de déchets organiques. Plus important encore, il s'agit d'une énergie produite localement.

◆ Respect du cycle de vie des matières méthanisées

Pendant sa croissance, la biomasse puise des ressources dans le sol et capte du CO₂. Après méthanisation, la matière est retournée au sol qu'elle enrichit, limitant ainsi l'usage d'engrais chimiques.

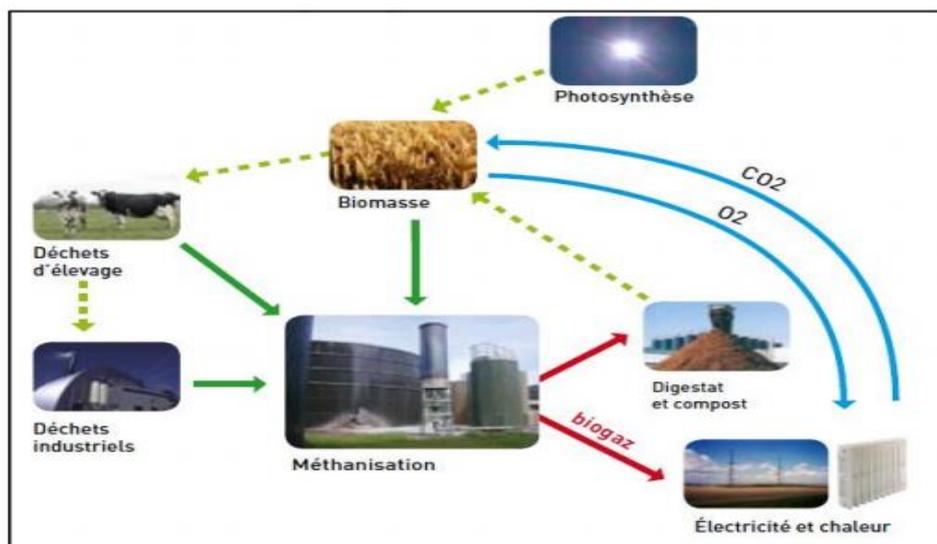


Figure 3 : Cycle de vie des matières méthanisées. [29]

◆ Autonomie énergétique et maîtrise du coût de l'énergie

Le biogaz constitue une énergie facilement stockable (gazomètre du digesteur, bouteilles de gaz, réseau de gaz), flexible, qui permet une production stable et prédictible sur court ou long terme. De plus, l'énergie produite grâce au biogaz est la seule énergie renouvelable valorisée sous forme multiple en remplacement du pétrole, du gaz naturel, du fioul, du nucléaire.

L'autonomie énergétique peut être améliorée grâce au développement des réseaux de chaleur collectifs à prix très compétitifs et ce, grâce aux déchets.

La méthanisation permet aussi l'optimisation des processus des industries agroalimentaires locales par l'utilisation de la chaleur pour la vaporisation d'eau, l'hygiénisation, la pasteurisation, le séchage, etc. Cela permet la diminution des coûts de traitement des déchets en interne et favorise la compétitivité.

Au niveau économique local, on peut référencer les bénéfices suivants :

- ◆ Réduction de l'achat des engrais par la valorisation du digestat.
- ◆ Revenus complémentaires par la production et la vente d'électricité ou de biométhane.
- ◆ Diversification de revenus pour les exploitations agricoles, et réduction des coûts d'intrants (engrais, phytosanitaires, énergie).
- ◆ Création de revenus pour les territoires ruraux : taxes.
- ◆ Création d'une économie et d'une dynamique de marché autour de la méthanisation.

2. 6. 5. Des avantages agronomiques

Le digestat issu de la méthanisation a une excellente qualité agronomique, meilleure que celle des matières non méthanisées; les éléments fertilisants sont sous forme minérale plus facilement assimilables par les plantes, ce qui améliore le rendement dans la plupart des cas. Le digestat intéresse donc fortement les agriculteurs parce qu'il évite des engrais azotés chimiques et a aussi une valeur amendante. Il présente aussi l'avantage d'être jusqu'à 98% moins odorant que la matière brute méthanisée. Les germes pathogènes sont réduits ainsi que les graines de mauvaises herbes. [28].

2. 7. Principe d'une unité de méthanisation

2. 7.1. Description du flux de matière au sein de l'unité de méthanisation

Une unité de méthanisation territoriale vise à rassembler tous types de déchets organiques afin de produire de l'énergie et de répondre aux problématiques locales de traitement des déchets. Le principe est résumé sur la Figure suivante:

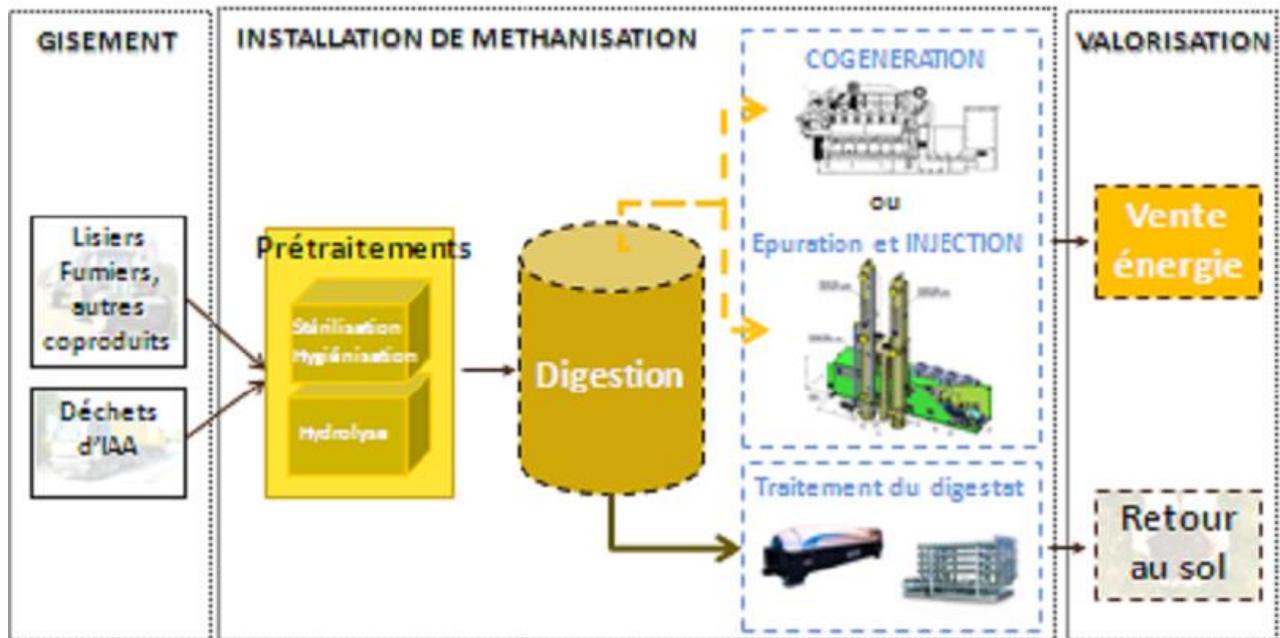


Figure 4 : Schéma de principe d'une usine de méthanisation territoriale, [30]

Dans le cas d'unité de méthanisation territoriale, il s'agit de traiter les effluents agricoles (lisiers, fumiers principalement) en co-digestion avec d'autres produits organiques provenant d'industries agro-alimentaires (sang, rebuts de fabrication, graisses...) ou de collectivités (déchets verts, déchets de restauration collective...).

Le temps de séjour moyen des substrats dans le digesteur se situe entre 20 et 40 jours selon le type de procédé choisi. Il résulte de cette étape deux produits à valoriser : le biogaz et le digestat. [30] :

La cogénération où le biogaz est brûlé et permet la production d'électricité et de chaleur. L'électricité est vendue sur le réseau au tarif réglementé par arrêté ministériel (arrêté du 1er septembre 2014 fixant les tarifs d'achat garantis et les conditions de leur application pour l'électricité produite à partir des installations utilisant la filière de cogénération). Notons que cet arrêté concerne la cogénération utilisant le gaz naturel comme énergie primaire et s'inscrit dans un souci d'efficacité énergétique.

- Ce tarif dépend de la puissance électrique développée et de la valorisation thermique de la chaleur issue de la cogénération. Plusieurs débouchés peuvent être développés : chauffage de bâtiments, alimentation en chaleur d'industries voisines, production de froid mais aussi l'autoconsommation de la chaleur pour le chauffage du digesteur (10 à 15% de la chaleur produite)...

- L'injection du biogaz dans le réseau. Cette solution dispose de nombreux avantages techniques (pas besoin de trouver un puits pour la chaleur) mais nécessite une purification préalable du biogaz. Le biogaz injecté doit respecter des normes de composition strictes qui imposent des procédés épuratoires poussés. Un arrêté fixant le tarif pour ce type de valorisation du biogaz est en cours d'élaboration par le Ministère chargé de l'Energie. [40]

Chapitre 2 : étude de faisabilité du projet de méthanisation

Jusqu'à ici, tous les bénéfices environnementaux du traitement par méthanisation ont été soulignés. Toutefois, ce ne sont pas les raisons pour lesquelles ce traitement se démarque des autres modes de gestion des déjections animales possibles. En effet, les mêmes études citées précédemment attribuent pratiquement les mêmes bénéfices environnementaux et le même niveau de performance au traitement par digestion aérobie (en présence d'oxygène). La distinction relève plutôt du fait que la méthanisation est actuellement le seul traitement promettant une excellente performance environnementale de dépollution et la possibilité d'un recouvrement partiel et même profitable des frais d'implantation, d'opération et d'entretien du système. Le tout grâce à la production de biogaz qui peut être utilisé comme source d'énergie renouvelable [2]; [30]; [24]; [31].

Selon le National Resources Conservation Service des États-Unis [2], la production de biogaz par méthanisation est évaluée théoriquement à 0,2 m³/jour par porc (30 à 35 m³ par cochon produit; Bio-terre Systems 2008a), à 0,4 m³/jour par bœuf et à 1,9 m³/jour par vache laitière. La technologie de méthanisation choisie, le temps de séjour dans le digesteur, la demande chimique d'oxygène (DCO) (indicateur de charge organique à l'alimentation) et la teneur en solides totaux du substrat influencent la concentration de méthane du biogaz, qui peut varier de 50 à 85 %, et la quantité de biogaz produite par jour. La détermination de ces données s'avère donc cruciale dans la préparation et l'évaluation d'un projet de méthanisation.

1. Expériences d'exploitation de la méthanisation

La méthanisation est restée une technologie encore peu exploitée dans les pays occidentaux jusqu'à la fin des années 90. La disponibilité des combustibles fossiles à bas prix, le soutien gouvernemental du développement nucléaire et d'autres raisons politiques et technologique ont depuis longtemps défavorisé l'option de la méthanisation sur le marché de l'énergie de l'Europe et de l'Amérique du Nord [37]. C'est dans certains pays en émergence tels que la Chine, l'Inde et le Népal qu'ont été implantées le plus grand nombre d'installations de méthanisation au cours des années 80 [33].

Aujourd'hui, La mise en place du marché de carbone, l'augmentation du cours du pétrole et l'adoption réglementaire de primes de rendement environnemental et d'avantages fiscaux pour les énergies vertes ont contribué au développement des installations de méthanisation. L'Allemagne se démarque avec environ 2 700 installations en milieu agricole dont 800 qui n'ont pour but que l'exploitation énergétique. Sur l'ensemble du territoire européen, on retrouve environ 1 500 usines qui traitent les boues d'épuration des stations d'eaux usées et près de 400 installations industrielles surtout concentrées aux Pays-Bas, en Belgique, en Autriche et en Allemagne.

Les installations collectives de traitement de déjections et des matières résiduelles ne comptent qu'une cinquantaine d'installations européennes dont 25 au Danemark [33]; [37]; [35].

L'une d'entre elles est la centrale collective de Lintrup au Danemark. Depuis 1990, elle traite en co-digestion 300 m³/jour de lisier (porc et vache) et 60 m³/jour de résidus organiques d'industries agroalimentaires. Cette centrale génère suffisamment d'énergie pour alimenter 60 % des besoins électriques et 40 % des besoins en chaleur des 4 200 habitants du village adjacent de Rodding [33];[35]. Elle est tenue et alimentée par 62 agriculteurs regroupés dans un rayon de 7,5 km de la centrale. Avec un capital d'investissement de 7,3 M \$ US et 0,55 M \$ US de coûts d'opération le bilan économique de cette centrale est mitigé.

La revente de l'énergie du biogaz (qui rapporte de 0,7 à 1 M \$ US/an), le service d'enlèvement et de gestion des déchets industriels (qui rapporte près de 200 000 \$US/an) et la revente du compost complètent les revenus de la centrale. En 1995, une étude danoise a démontré que sans les subventions gouvernementales, qui étaient encore de 20 % en 1997, et les exemptions de taxes, cette centrale ne serait pas soutenable économiquement. Pourtant, sa productivité de méthane par mètre cube de réacteur par jour surpasse les attentes et s'améliore toujours. À l'époque de l'étude danoise mentionnée, les frais de transport trop élevés était l'une des causes de la fragilité économique du projet, selon le gouvernement danois [33].

L'Allemagne pour sa part a privilégié le développement de la méthanisation en mettant en place un tarif de rachat de l'énergie renouvelable attractif. Cette politique a conduit à un développement important d'unités de petite dimension à l'échelle de

l'exploitation et de son environnement. On dénombre ainsi plus de 2000 unités de co-digestion réparties dans le pays.

2. Cas de l'Algérie

En Algérie, les projets de méthanisation sont introuvables, car il n'existe pas d'organisation ou de programme gouvernemental pour favoriser le développement de cette filière de traitement. Toutefois, quelques recherches de développement de technologies et d'expertises ont été réalisées par le Centre de développement des énergies renouvelables afin de mettre en œuvre des techniques de méthanisation des déchets organiques. A titre d'exemple, on peut citer l'expérience de méthanisation de bouses de vaches réalisée dans la région du MZAB ; l'objectif de ce travail expérimental était de valoriser les déchets issus de l'élevage bovin en utilisant les bouses de vaches comme substrat pour la production de biométhane et d'utiliser le digestat en fin de méthanisation comme engrais agricole.

- ◆ Le dispositif expérimental était constitué de deux principales cuves: La cuve de digestion appelée 'Digesteur', d'une capacité de 800 litres, réservée pour la digestion anaérobie du substrat organique. Elle était constituée de deux parties, la partie inférieure contenant le substrat, et la partie supérieure renfermant le biogaz.
- ◆ Le 'Gazomètre' à cloche utilisé pour le stockage du biogaz produit (figure 5). Il se compose d'un bâti extérieur formé par une cuve à fond plat à l'intérieur de laquelle coulisse, grâce à un joint hydraulique, une cuve à dôme, ouverte sur sa base pour le piégeage du biogaz :

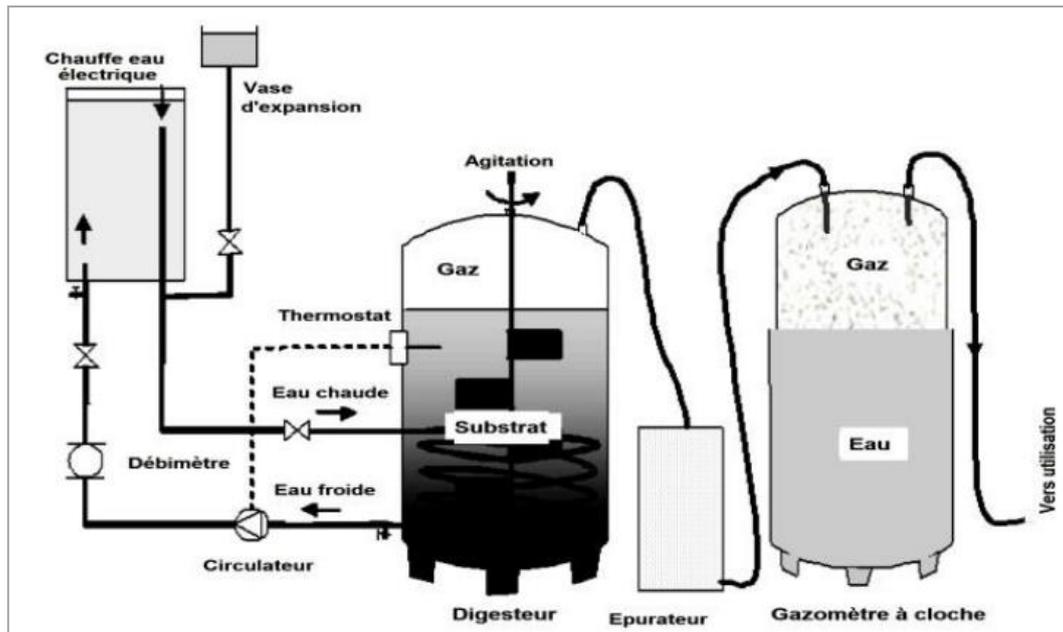


Figure 5 : Digesteur de méthanisation parfaitement agité [35]

- ◆ Le système de chauffage de l'installation était constitué principalement d'un chauffe-eau électrique pour l'eau chaude, d'un échangeur de chaleur de type serpentin immergé à l'intérieur du digesteur et d'un circulateur pour assurer la circulation de l'eau chaude dans le circuit de chauffage.
- ◆ La production de biogaz a été obtenue en fermentant 300 kg de bouses fraîches, diluées à raison de 100 %. La bouse de vaches utilisée contient 19 % de matière sèche. [35]
- ◆ Le maximum de production du méthane a été obtenu dès le 33^{ème} jour, avec 89 % de CH₄.

D'après les résultats obtenus, le temps de séjour optimal des bouses à l'intérieur du digesteur était de 33 jours, ce qui veut dire qu'une éventuelle alimentation du digesteur tout les 33 jours pouvait être envisagée pour avoir une production continue de biogaz jusqu'à 89% de CH₄.

3. Problématique

Comme nous l'avons montré précédemment, la digestion anaérobie est une technologie de dépollution efficace qui permet de récupérer le potentiel énergétique des déchets d'élevage. D'autre part, la diversité des technologies existantes de méthanisation et la variété des débouchés d'utilisation du biogaz et des résidus de digestion confèrent à cette option de traitement de la flexibilité. Cette flexibilité permet d'adapter le système aux besoins et aux objectifs du promoteur de projet. Elle implique toutefois de multiples variables et conditions à considérer pour faire du projet un succès, telles que l'ont démontré les expériences passées et les études consultées.

La région des hauts plateaux en Algérie, spécifiquement la wilaya de Sétif compte la plus grande concentration de bovin. Occupant la première place dans le pays en tant que producteur de lait frais avec plus de 245 millions de litres de lait en 2012 [37], elle possède un cheptel bovin de **131.180** têtes, dont **78.117** vaches laitières [38]. Grâce à son climat semi-aride, l'agriculture occupe une place importante estimée à 55% de la surface totale de la wilaya, les céréales occupent la quasi-totalité de la surface agricole utilisée, associée avec l'élevage ovin et bovin [40].

De ce fait la quantité des déjections produites par les vaches laitière peut a elle seule produire plus de 64 millions m³ CH₄/ans. Dans ce contexte, est-il envisageable d'exploiter la technologie de la digestion anaérobie en cogénération énergétique comme solution durable au traitement de déchets de bovins dans cette wilaya ?

Le présent document portera sur l'étude des conditions de faisabilité d'implantation d'un projet de méthanisation pour la valorisation des déchets de bovin et la production durable d'une énergie renouvelable.

Le cas étudié sera l'implantation hypothétique d'une centrale collective par un regroupement d'agriculteurs en coopérative. Cette centrale aurait le potentiel de traiter 11 500 tonnes/an de déchets de bovin de la région en, raison de disponibilité de la matière organique et, pour maximiser le taux de valorisation des déchets. Le biogaz généré serait valorisé par la cogénération d'électricité et de chaleur. L'électricité serait vouée à la vente et la chaleur/pression/vapeur serait utilisée pour le chauffage des bâtiments, du digesteur et pour la dessiccation des surplus de boues de digestion voués à l'épandage.

3. 1. Localisation : source d’approvisionnement, logistique et intérêt de la filière

Afin de localiser un site d’implantation potentiel pour une centrale de méthanisation, les premières étapes de développement du projet sont de recenser les substrats disponibles dans le secteur visé et de relever l’intérêt des exploitants. Dans le cadre d’un projet de centrale de méthanisation, l’approvisionnement est un des facteurs clés du développement et de la logistique du projet. Cette démarche d’analyse comporte plusieurs variables. Les sources d’approvisionnement sont multiples et doivent être répertoriées. Il faut connaître les volumes, la disponibilité et les propriétés physico-chimiques de chaque source [28]; [23].

L’intérêt des exploitants à participer au projet et les stratégies de transport des substrats préconisées par les exploitants complètent les éléments de base à investiguer. C’est pourquoi la recension et l’analyse des sources d’approvisionnement doivent précéder la conception et l’ingénierie préliminaire d’un projet de centrale de méthanisation. Sans quoi, les dimensions, la performance et les autres caractéristiques du digesteur et des procédés de valorisation du biogaz et des boues de digestion ne sauront être adaptées aux besoins réels, ce qui équivaldrait à tuer l’embryon dans l’œuf.

3. 2. Localisation de la centrale de méthanisation

Parmi les expériences existantes de centrale de méthanisation, plusieurs facteurs peuvent influencer le choix d’un site. Les quatre principaux facteurs retenus pour la localisation d’une centrale collective de méthanisation sont :

- L’approvisionnement et le transport des substrats,
- L’intérêt des producteurs de bovin à fournir le lisier,
- La disponibilité d’un espace pour cette vocation [25]; [23].

Dans le cadre de cette étude, seule une localisation préliminaire est effectuée, puisqu’il n’a pas été possible de sonder les producteurs. Nous sommes donc dans une approche de simulation.

3. 2. 1. Situation géographiques de la wilaya de Sétif

- **Relief**

Sétif est la capitale des hauts plateaux. La Wilaya de Sétif elle est caractérisée par un relief plat et une diversification des activités de production agricole, la wilaya est divisée en 3 zones (figure 5). [39]

- **Zone montagneuse** : elle occupe 43% de la superficie totale de la wilaya caractérisée par les montagnes plus de 1000m : montagne de Babor (2004m) qui s'étend sur une centaine de kilomètres, Hodna et Bibans, au sud djebel Boutaleb aferhane culminant à 1890m.
- **Zone des hautes plaines** : caractérisée par des altitudes faibles (900 à1000m), elle représente50% de la superficie totale, djebel Braou 1263m, et djebel aferhane 1442m.
- **Zone sud** : l'altitude ne dépasse pas 1000 m, elle est caractérisée par la présence des chottes: Chott EL Beida à Hammam Sokhna, Chott EL Melloul à Guellal et EL Frein à Ain lahdjar.



Figure 6 : Relief de la région de Sétif [36]

- **Le climat**

La wilaya de Sétif présente un climat méditerranéen [40] caractérisé par un hiver froid rigoureux et un été chaud et sec.

- **La température**

La température moyenne varie selon les saisons, elle est estimée à 6,1C° en janvier le mois le plus froid alors qu'elle est de 37,8C° en juillet le mois le plus chaud. Les variations des températures moyennes mensuelles montrent que les températures estivales sont les plus élevées, elles sont estimées de 32C° et 27 C° en mois de juillet et Aout respectivement, par contre les températures hivernales sont les plus basses, elles sont estimées de 5,3C° et 6,2C° aux mois de Janvier et Février.

Dans le projet présenté dans ce rapport, les procédés sont relativement classiques. Les intrants (effluents d'élevage) ont un pourcentage d'eau important, la voie humide est par conséquent retenue. La température du méthaniseur est d'environ 35°C car augmenter le chauffage pour se placer en méthanisation thermophile augmenterait les consommations de l'usine. Les digesteurs sont à alimentation continue : les substrats sont introduits de façon régulière soit par pompage soit par trémie selon la consistance. Une quantité de matière équivalente est extraite par surverse.

Le système continu en voie liquide est le plus répandu pour la biomasse agricole. Le système discontinu en voie semi-liquide n'est pas encore utilisé pour la biomasse agricole et est en développement pour les effluents industriels, à l'image des systèmes aérobies SBR (Sequenced Batch Reactor).

3. 3. Identification des sources d'approvisionnement de déchets de bovin

Pour collecter le maximum des données hétérogènes, une enquête a été effectuée sur 87 exploitations agricoles collectives et privées, situées dans 16 communes de Sétif (**tableau 4**) [35].

Tableau 4 Nombre d'unités animales en inventaire et quantité de déchets générée par commune [40] :

Région	Commune	Nombre d'élevage	Nombre de bovins	Nombre de vaches laitières	Quantité de déchets (tonne/jour)
Nord	Bougaà	4	50	29	3,372
	Maoklene	1	22	12	1,432
	Ain el kebira	5	86	40	5,128
	Dehamcha	2	34	16	2,04
	Ain abessa	2	50	30	3,44
	El Ouricia	5	108	60	7,104
Centre	Mezloug	7	115	58	7,164
	Sétif centre	18	299	187	21,088
	Bazar sakra	13	282	116	15,784
	Guelta zarga	2	114	66	7,68
	El eulma	5	71	45	5,048
	Ain arnet	5	52	30	3,496
Sud	Ain oulmene	5	65	41	4,608
	Hamame Soukhna	7	117	66	7,764
	Baida bordj	4	82	32	4,472
	Salah bey	2	32	22	2,392

Ces données, révèlent les zones où l'intensité de production est la plus forte et où il serait le plus intéressant d'implanter un projet de méthanisation.

Les statistiques de l'institut de recherche et de développement en agronomie (présentées à l'annexe 1) ont été utilisées pour l'estimation quantitative des déchets produits par secteur [42] (calcul à l'annexe 2).

3. 4. Identification des sites d'implantation potentiels

Afin d'identifier le secteur offrant un potentiel d'accueil pour une centrale de méthanisation d'une capacité de traitement d'environ 11 500 t/an de déchets, une carte de la répartition des unités animales par municipalité (données 2012) [39], a été utilisée.

Le but de ce travail n'est pas de cibler précisément le meilleur site d'implantation, mais plutôt de confirmer ou non qu'il existe des sites potentiels à l'implantation d'un projet de centrale de méthanisation dans la région de Sétif.

Carte 1 Localisation des exploitations dans la wilaya [39]



Une évaluation visuelle de la carte1 ainsi que du tableau 4, a permis de sélectionner cinq sites offrant un potentiel d'approvisionnement adéquat de la centrale dans un rayon de cinq kilomètres. La proximité des exploitations a également été considérée dans le but de réduire le fardeau de transport.

De plus la distance moyenne de transport des déjections animales pour les centrales recensées et décrites par Seadi [35] est de 5,58km. Par ailleurs, d'autres expériences décrites dans la littérature, particulièrement au Danemark, ont démontré que la rentabilité d'une centrale de digestion anaérobie tire partie d'une économie d'échelle (capacité de traitement élevée). En contre partie, les coûts de transport augmentent avec les distances d'approvisionnement et le tonnage [34].

D'après les données du tableau 4, nous pouvons constater que la zone où l'intensité de production est la plus forte se situe dans la région centre de la wilaya, où il serait le plus intéressant d'implanter un projet de méthanisation, avec 3 sites d'approvisionnement en substrat qui sont : **Mezloug, Sétif centre et Ain arnet.**

Le tableau suivant présente la production de bovin en inventaire à l'intérieur du rayon d'approvisionnement de cinq kilomètres et la quantité de déchets potentiellement accessibles.

Tableau 5 : la production de bovin en inventaire à l'intérieur du rayon d'approvisionnement de cinq kilomètres

Site	Nombre d'élevage	Quantité de déchets (t/jour)	Quantité de déchets(t/an)
Mezloug	7	7,16	2614,86
Sétif centre	18	21,08	7697,12
Ain arnet	5	3,49	1276,04
Total	30	31,7	11588,02

Ces estimations confirment que le site choisi à plus de 11 500 t/an de déchets comme source d'alimentation possible.

4. Investigation technique

L'analyse de la faisabilité d'implantation d'un projet de méthanisation repose en grande partie sur l'ingénierie préliminaire du projet. Dans cette section, le bloc opérationnel du projet est schématisé et fragmenté afin de détailler les principales activités que comporte le projet et d'en évaluer les coûts généraux, les impacts environnementaux et les aspects légaux. L'analyse passera en revue l'importation des substrats, les composantes d'un système de méthanisation, puis les composantes du groupe électrogène. Le tout permettra d'évaluer le bilan de masse, la production énergétique, les coûts d'investissement, d'opération et d'entretien, les revenus potentiels, les éléments de santé/sécurité, les impacts environnementaux et les caractéristiques des effluents.

4.1. Portrait global du projet

Le cas étudié est une centrale de traitement des déchets de bovins par méthanisation pour des fins de valorisation énergétique. Dans l'hypothèse de base, les substrats (11 500 tonnes de déchets) sont majoritairement produits hors du site de la centrale.

Les premières étapes dans la séquence des opérations du projet, sont l'entreposage, la collecte et le transport des substrats vers la centrale. Une fois à la centrale, les substrats servent à l'alimentation du ou des digesteurs à digestion anaérobie. À cette étape un contrôle et une préparation des substrats sont incontournables pour éviter la défaillance du système [2].

L'étape suivante, la digestion anaérobie des substrats, génère du biogaz qui doit être accumulé et traité avant sa conversion énergétique par cogénération. Une fois le processus de digestion complété le digestat (ou l'effluent) doit être entreposé et doit subir un traitement ce qui permettra d'augmenter son potentiel de valorisation et de revente ou de réduire les impacts environnementaux.

Le schéma illustré à la figure 3.1 présente les cinq principales activités d'une centrale de méthanisation et de production électrique.

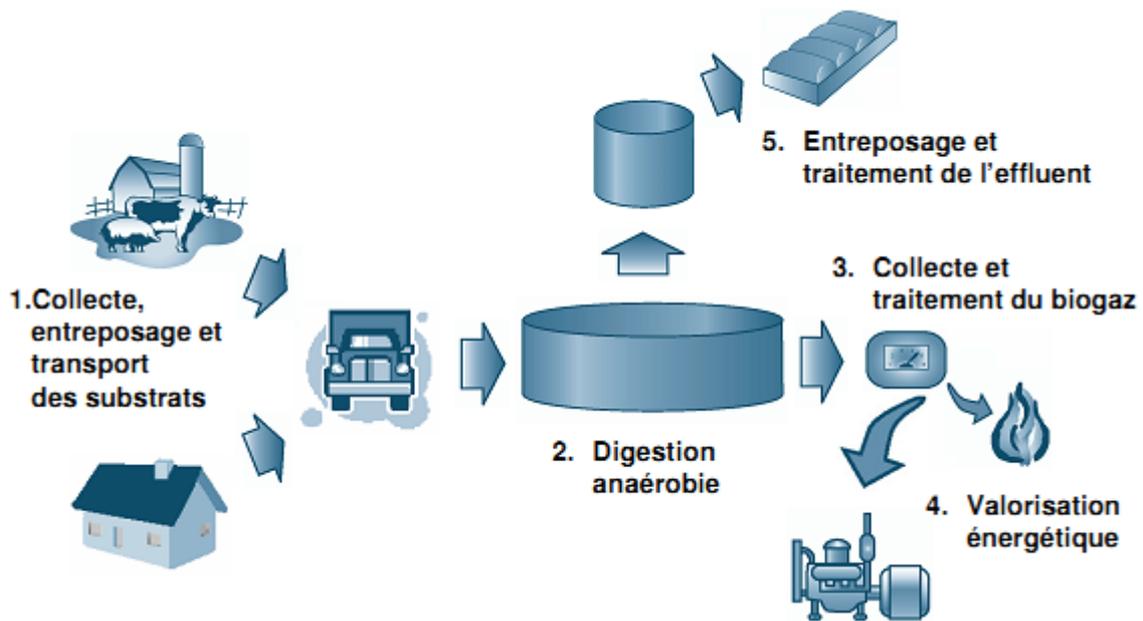


Figure 7 : Schéma de principe du projet de méthanisation de lisier [20]

4.2. Entreposage

L'entreposage du substrat sur les fermes s'impose et dépend de la stratégie de collecte. Selon les recommandations du programme AgSTAR [25], les déjections alimentées dans le digesteur doivent être fraîches (moins de sept jours) pour en soutirer le plein potentiel énergétique.

Dans le but de limiter les coûts d'investissement pour chacun des fournisseurs de déjections animales, il est préférable que les fermes participantes possèdent déjà des aires d'entreposage fermées, permettant d'accumuler deux jours et plus de production de lisier sans être dilué par la pluie [25].

Au niveau de la centrale, un réservoir d'accumulation permettant au minimum l'entreposage de deux jours de production de substrat en plus du volume de dilution doit être en place. Dans le cas présent, des infrastructures d'entreposage propres à chaque substrat sont à privilégier afin d'obtenir un mélange optimal et constant à l'alimentation, peu importe les fluctuations de l'approvisionnement.

4.3. Stratégie de collecte et coûts de transport des déjections

Dans le cas de ce projet, le transport par camion des déchets est préconisé étant donné que les déjections produites sont impliquées sur seulement dix kilomètres.

Les résultats établis sur les bases du tonnage transporté (déjection semi-liquide) par des camions de 5 tonnes, et de la distance parcourue sont présentés au tableau ci-dessous. Il est à noter que les constantes représentant le coût unitaire pour le chargement, le déchargement et le coût unitaire de transport sont issues des prix de service de compagnies privées de transport. Le tarif moyen de ces compagnies est de 750DA/10km pour une citerne de 5 tonnes.

Tableau 6 : Cout annuel de transport du substrat

Variable du calcul des couts de transport	Camion de 5 tonnes
"x" Quantité de substrat (tonne/an)	11500
"D" Distance maximale de transport (aller retour) par chargement (km)	10
"a" Cout unitaire de transport (DA/5tonnes/10KM)	750
« C »Cout de transport annuel (DA)	1725000

Le calcul est effectué selon l'équation :

$$C = x * a / 5$$

En utilisant les services de camion de 5 tonnes, 44 chargements par semaine seront nécessaires à l'importation du lisier à la centrale.

Une fois parvenues à la centrale, les déjections animales peuvent alimenter les digesteurs suivant une homogénéisation selon une dilution prédéterminés ou être entreposées dans le cas d'une alimentation périodique.

4.4. Système de méthanisation

Les éléments de base retrouvés dans une installation de digestion anaérobie peuvent être résumés :

- le bâtiment d'entreposage;
- le digesteur;
- le système d'échange de chaleur;
- la chaudière ou un groupe électrogène (dans le cas étudié);
- le système de collecte et de traitement des biogaz;

Dans cette section, seules les composantes intrinsèques au fonctionnement du digesteur sont étudiées. Elles correspondent aux aspects techniques de l'installation pour la réception, l'alimentation et la vidange du ou des digesteurs, le système de brassage, le système d'échange de chaleur et le digesteur.

4.4.1. Le digesteur

Dans le cas de cette étude, un digesteur de type fosse en béton hermétique est préconisé pour minimiser les coûts de l'installation.

Le stockage du biogaz se fait directement au dessus du digesteur sous une double membrane étanche.



Figure 8 : digesteur type fosse infiniment mélangé [42]

4. 4. 2. Le système de chauffage

Le chauffage interne réalisé par serpentins relié à une chaudière à gaz, avec isolation thermique, pour maintenir une température autour de 40°C (mésophile).

4. 4. 3. Agitation du milieu

L'homogénéisation du substrat est assurée par un système de recirculation du biogaz qui, consiste à envoyer le biogaz sous pression a travers des bouses situées au fon du digesteur, une séparation centrale oblige la matière à suivre un cheminement [44].

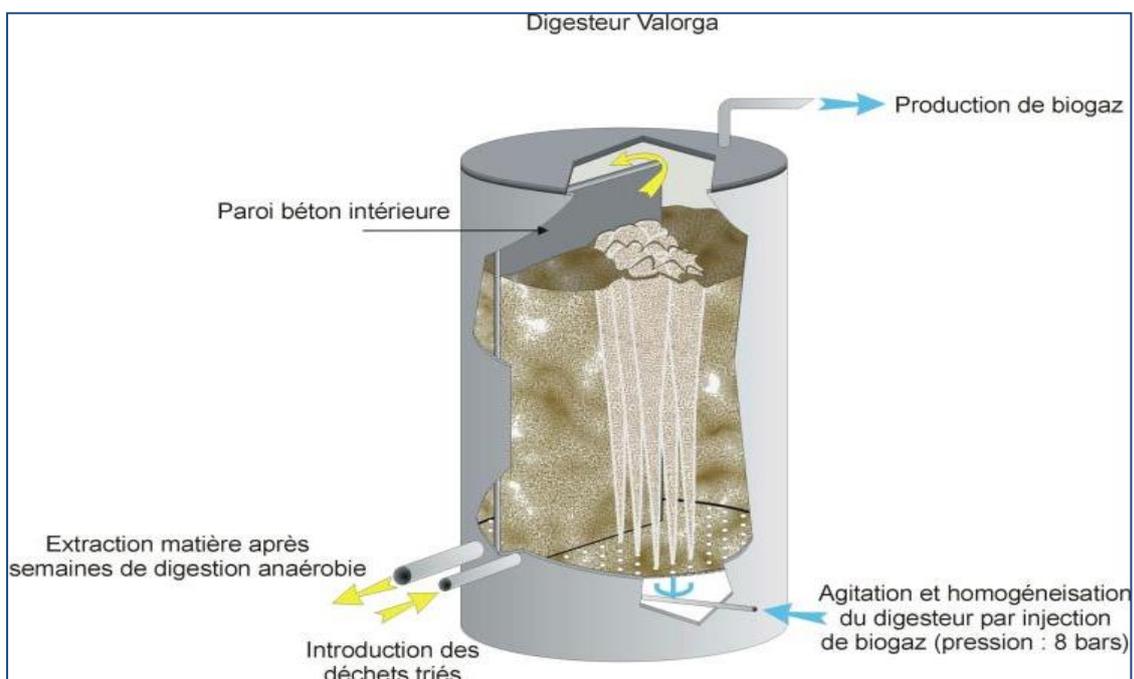


Figure 9 : Schéma du procédé Valogra [45]

5. Infrastructures et coûts du digesteur

5. 1 Construction du digesteur

Etant donné que les substances utilisées sont des déjections animales, nous avons choisis de suivre le mode de digestion adopté par l'équipe du CDER ; réalisée dans la région du M'ZAB qui, de part la simplicité de la technologie utilisée, possède un climat proche de la région visée pour l'implantation de l'installation [35].

Pour une charge annuelle de 11 500 tonnes, et un temps de séjour de 33 jours, le volume du digesteur est de 500 m³ (voir annexe2), dont le cout de construction a été estimé à **551003.5 DA (les calculs sont détaillés dans annexe 2)**

5.2 Consommation de Chaleur du digesteur

La consommation de chaleur du digesteur pour le chauffage du substrat, et maintenir une température moyenne de 40°C dans le milieu, constitue une demande non négligeable. Il est donc nécessaire d'estimer cette consommation, car cette chaleur sera fournie par la valorisation du biogaz.

Dans le digesteur de 500 m³, l'échangeur est constitué par un serpentin de 100 m de long en cuivre, résistant aux fortes pressions, aux températures et à la corrosion, classiquement utilisé pour la confection des planchers chauffants [43], ce choix a été effectué car le brassage est assuré par recirculation de biogaz.

Nous avons considéré que le digesteur est parfaitement mélangé, et que la chaleur apportée par le serpentin est égale à la chaleur transmise au milieu (y'a pas de pertes de chaleur). L'alimentation en eau chaude est assurée par une chaudière avec une capacité de 80KW. (Voire annexe 2 pour les calculs).

Le cout total d'achat du système de chauffage est estimé à **963773.7 DA** (sans maintenance), avec une consommation énergétique annuelle de **153 264.96 DA**.

5.3 Consommation du système d'agitation

La consommation électrique pour l'agitation peut s'évaluer grâce à des valeurs données par **R. Moletta (La méthanisation, 2011)**. On a ainsi une consommation de 50 à 100 kWh par tonne de MS introduite dans le digesteur pour une agitation par recirculation de biogaz. En prenant les valeurs pour 1 an on obtient donc les résultats suivants :

Tableau 7 : cout de la consommation énergétique pour l'agitation

Consommation agitation	Valeurs	Cout (DA)
Masse des déchets à l'entrée (11500t/an)	1380	/
Consommation basse (kwh)	69 000	332028
Consommation haute (kwh)	138000	664056

- ◆ Les couts de l'agitation sont calculés en prenant le prix du kWh =4.812 DA.

6. Production du biogaz

En fonction du ratio carbone/azote et de l'alimentation en solides totaux, en solides volatiles et en DCO, les performances de méthanisation du digesteur fluctueront. Le tableau 8 rassemble les données utilisées pour l'estimation de la production annuelle de biogaz attendue. [47]

Tableau 8 : production annuelle et caractéristiques du biogaz par la centrale

Quantité de substrat (tonne/an)	11500
Taux de matière solide (MS)	23%
Taux MO/MS	83%
Rendement de dégradation	60%
Potentiel méthanogène laboratoire (Nm ³ /tMO)	210
Quantité de CH ₄ (m ³ /an)	166 890.507
Valeur énergétique du biogaz (kwh/m ³ de méthane)	166 890.507

La valeur énergétique du biogaz a été estimée à 1kWh/m³ eq.CH₄.

7. Valorisation énergétique du biogaz

La forte teneur en méthane du biogaz en fait une source d'énergie très intéressante. En effet, il existe plusieurs techniques pour produire de l'énergie à partir du biogaz. Nous étudierons ici la valorisation par la production d'électricité et de chaleur (cogénération).

Afin de réduire les coûts de l'installation, nous n'avons pas prévu une unité d'épuration du biogaz à la sortie du digesteur, en considérant que le biogaz ne contient que de faibles volumes d'H₂S et d'eau [48], étant donné que ces gaz sont responsables de la dégradation des canalisations et des moteurs.

Après stockage, le biogaz peut être envoyé dans une unité de cogénération. Cette dernière brûle le biogaz pour produire de l'électricité et de la chaleur. Cette valorisation se fait dans un conteneur spécialement dédié (voir figure ci dessous). Pour la cogénération, on peut utiliser soit des moteurs à gaz soit des turbines à gaz. Nous choisirons la première solution car les moteurs à gaz ont de meilleurs rendements électriques pour des biogaz riches en méthane comme c'est le cas ici [49]. Ils présentent également des coûts d'investissements plus faibles [50].

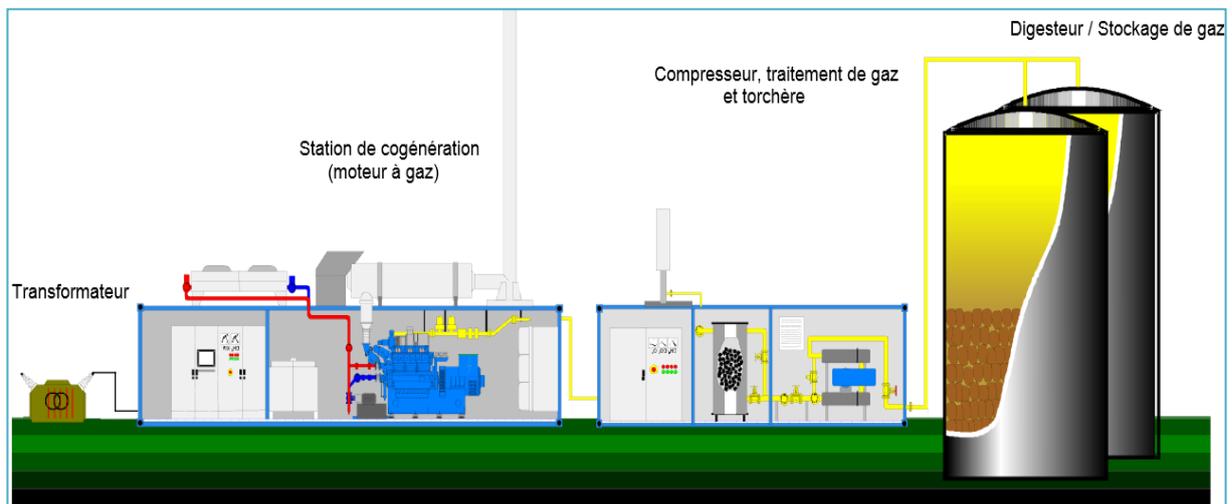


Figure 10 : Schéma de la station de valorisation du biogaz[53]

L'unité de cogénération se compose d'un moteur à gaz, d'un alternateur et de circuits de récupération de la chaleur. Le gaz est brûlé dans le moteur puis l'énergie mécanique du moteur est transformée en électricité par l'alternateur. L'énergie thermique produite par le moteur sur les circuits d'échappement, d'eau de refroidissement et d'huile de lubrification est récupérable pour une utilisation thermique ou industrielle.

7. 1. Dimensionnement

7. 1.1. L'énergie pouvant être produite par le biogaz en un an

Elle se calcule à partir du PCI du méthane. Il est de 9,94 kWh/m³ dans des conditions normales de température et de pression [51].

$$E_{\text{tot}} = \text{PCI}(\text{CH}_4) \times V(\text{CH}_4) = 9,94 \times 166\,890,507 = 1\,658\,891,6 \text{ kWh}$$

7. 1. 2. L'énergie valorisable en un an

On admet 5% de pertes d'énergie, afin d'être sûr que le moteur soit plutôt sur-alimenté que sous-alimenté [51]. L'énergie valorisable par le moteur est donc la suivante :

$$E_{\text{valo}} = 0,95 \times E_{\text{tot}} = 0,95 \times 1\,658\,891,6 = 1\,575\,947 \text{ kWh}$$

7. 1. 3. L'énergie fournie par le biogaz en une heure et choix du moteur

$$E_{\text{t=1h}} = \frac{E_{\text{valo}}}{(365 \times 24)} = 178 \text{ kWh/h} = 178 \text{ kW}$$

Un moteur de co-génération est conçu pour fonctionner entre 50% et 100% de sa charge nominale, avec un rendement optimal autour de 75%. On recherche donc un moteur d'une puissance d'environ 237 kW pour être proche de cet optimum [52].

Nous avons opté pour un moteur type : Méthane générateur de gaz 240KW par SINOTRACK STEYER avec système de co-génération qui coute environ **221 0501DA**.

Le constructeur indique pour ce moteur un rendement thermique de 45.5 %, un rendement électrique de 38,5 % et un taux de pertes de 16 % (rendement total de la cogénération : 84 %). De cela découle :

$$\text{La puissance électrique} = 0,385 \times 250 \text{ kW} = 96,25 \text{ kW}_{\text{el}}$$

La puissance thermique de : $0.455 \times 250 = 113.75 \text{ kW}_{th}$.

8. La production annuelle d'énergie

Nous pouvons donc calculer la production annuelle d'électricité et de chaleur.

$$E_{el} = E_{valo} \times 0,385 = 606\,739.6 \text{ kWh}_{el}$$

$$E_{th} = E_{valo} \times 0,455 = 717\,055.8 \text{ kWh}_{th}$$

En conclusion, pour valoriser le biogaz produit par le digesteur en cogénération, il faut installer un moteur dont les caractéristiques sont les suivantes :

Tableau 9 : caractéristique du moteur de co-génération, production d'électricité

Caractéristiques du moteur	Puissance	250kW
	Puissance électrique	96.25
	Puissance thermique	113.75
	Rendement cogénération	84%
	Rendement électrique	38.5
	Rendement thermique	45.5%
Production	Electricité	606 739.6 kWh_{el}
	Chaleur	717055.8 kWh_{th}

◆ La consommation d'énergie par l'unité de méthanisation

Pour ce faire nous avons retiré la consommation pour le chauffage du digesteur et l'autoconsommation de l'unité de méthanisation en électricité. Pour trouver l'électricité qui pourra être vendue et la chaleur qui pourra être utilisée.

La consommation d'électricité pour le brassage du digesteur (environ **69 000 kWh_{el}**) et la quantité de chaleur pour le chauffage du digesteur estimée à **341 640 kWh_{th}**.

En prenant aussi en compte la consommation électrique de la cogénération, on estime que l'auto-consommation électrique représente **10%** de l'énergie produite, soit **60673.96 kWh**.

Il en résulte donc que l'électricité destinée à la vente :

➤ $E_{el}(\text{vente}) = E_{el} \times 0,9 = 483\,965.64 \text{ kWh}_{el}$

➤ $E_{th}(\text{valorisation}) = E_{th} - 341\,640 = 375\,415.8 \text{ kW}_{th}$

Donc sur un an nous avons : $483\,965.64 \text{ kW}_{el}$ et $375\,415.8 \text{ kW}_{th}$ à valoriser.

◆ Valorisation thermique

Il existe diverses utilisations possibles de la chaleur produite par la cogénération [48] :

- Sous forme d'eau chaude : circuit d'eau chaude pour le chauffage des digesteurs ou des bâtiments, réseau de chaleur, traitement des lixiviats (CET).
- Production de vapeur à partir des gaz d'échappement pour le traitement des produits à méthaniser ou issus de la méthanisation, utilisation dans un process.
- Utilisation dans une installation ORC (Organic Rankine Cycle) pour une production complémentaire d'électricité.

9. Analyse économique de l'installation

9.1. Coût d'investissement initial

L'investissement pour le développement d'une filière de méthanisation est généralement conséquent. En effet, d'après les sources comme l'ADEME ou SOLAGRO, il se situe aux alentours de 1000 € par tonne de matière sèche traitée. Dans notre cas l'investissement initial de l'unité est évalué à **5 712 518 DA**. Cette estimation tient également compte des investissements pour l'unité de valorisation de biogaz (cogénération notamment). Hors de cette unité, l'investissement de départ s'élève à environ **3 502 017.16 DA**. (Voir annexe3)

Bien entendu, ces données ont été définies pour des unités de méthanisation en France métropolitaine, et il se peut que l'application sur la région de Sétif impose certaines difficultés supplémentaires pour l'analyse économique de notre filière.

9.2. La durée de retour sur investissement

Les données définies jusqu'à présent permettent de calculer le temps de retour sur l'investissement, principal critère de choix quant à la réalisation ou non du projet.

Le temps de retour sur l'investissement se définit comme le rapport de l'investissement sur le gain d'exploitation annuel.

Pour rappel, il s'agit de la durée nécessaire pour rentabiliser l'investissement. Au delà de cette période, tout le bénéfice généré par l'installation profite directement à l'investisseur.

Les meilleurs temps de retour se situent autour de 4 ans et varient en fonction de divers paramètres.

Dans notre cas les calculs sont effectués en prenant en compte que les frais de fonctionnement de l'installation, les tarifs supplémentaires provenant des impôts n'ont pas été considérés.

9. 2. 1 .le gain annuel de l'installation

Le gain de l'installation à été calculé en fixant les prix de l'électricité à 5et 4DA, pour le kwh électrique et thermique respectivement [54] :

Gain sur la vente de l'énergie totale (électrique+ thermique) =3 786 391.4 DA (voir annexe 4pour les calculs).

Le Gain d'exploitation annuel est calculé en soustrayant les frais de fonctionnement annuels de l'installation du gain de vent de l'énergie, celui-ci a été évalué à 1 793 876 DA.

9. 2. 2 le temps de retour sur investissement

De ce fait nous avons calculé le temps de retour sur investissement :

$$RI=5\ 712\ 518/1\ 793\ 876=3.2$$

Ainsi le retour sur investissement se fera sur une période de 3 ans et 2 mois.

Conclusion

Dans le cadre de cette étude, un projet de centrale de méthanisation a été élaboré dans le but de proposer une solution durable et adaptée au contexte régional, pour la valorisation des déjections bovines dans la wilaya de Sétif. Les fondements du projet et de la centrale sont : (a) de permettre une gestion environnementale centralisée de 11 500 tonnes de déjections brutes dans un rayon de cinq kilomètres des producteurs; (b) de produire de l'électricité par cogénération à partir du biogaz généré.

La faisabilité du projet a été évaluée en tenant compte de l'existence de site potentiel à l'implantation de la centrale, des coûts d'investissement, des coûts annuels d'opération, de maintenance et de transport, ainsi que des revenus potentiels de la centrale. Un site situé dans une zone à forte densité de production bovine s'est révélé intéressant sur le territoire des communes de Sétif.

L'investigation technique et la description des infrastructures ont permis d'estimer une fenêtre d'investissements nécessaires à ce projet à **5 712 518 DA** et des coûts annuels totaux de **1 793 876 DA**, ce qui nous a permis d'estimer un retour sur investissement sur une période de 3 ans et 2 mois.

Somme toute, les objectifs généraux et spécifiques du travail ont été atteints dans les limites des ressources et du contexte de rédaction de ce dernier. Des sources d'informations peu fiables ont permis d'élaborer un projet de méthanisation fictif et d'en évaluer la faisabilité.

Évidemment, dans le cadre d'un projet réel, les informations et les détails seraient plus précis et soutenus par une équipe d'experts et un budget pour l'élaboration du projet. Toutefois, dans l'ensemble, la démarche d'évaluation de la faisabilité et les aspects conditionnels à considérer demeurerait les mêmes.

Ainsi la réussite de l'implémentation d'une filière de bioénergie suppose la participation effective de plusieurs partenaires travaillant en phase pour éviter les nombreux écueils qui peuvent menacer son fonctionnement durable.

Références bibliographiques

[1] Macias-Corral, M., Samani, Z., Hanson, A., Smith, G., Funk, P., Yu, H. and Longworth, J.. Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure. *Bioresource Technology*[en ligne] .2008, vol. 99, p. 8288-8293.

Disponible sur :

<https://translate.google.dz/translate?hl=fr&sl=en&u=https://www.researchgate.net/publication/5368521_Anaerobic_Digestion_of_Municipal_Solid_Waste_and_Agricultural_Waste_and_the_Effect_of_Co-Digestion_with_Dairy_Cow_Manure&prev=search>

[2] Natural Resources Conservation Service (NRCS). An Analysis of Energy Production Costs from Anaerobic Digestion Systems on U.S. 2007. Livestock Production Facilities. Technical Note, U.S. Department of Agriculture, n°1, P33 p.

[3] Zhang, R., El-Mashad M., H., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C. and Gamble, P. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 2007. vol. 98, p. 929-935.

[4] BENABDELI K.,. Evaluation de l'impact des nouveaux modes d'élevage sur l'espace et l'environnement steppique: Cas de Ras El Ma (Sidi Bel Abbes - Algérie). In Rupture : Nouveaux enjeux, nouvelles fonctions, nouvelle image de l'élevage sur parcours. Options Méditerranéennes, Série A, Séminaires Méditerranéens,1997, n°39, 129-141.

[5] SKOURI M.,. La désertification dans le bassin Méditerranéen : Etat actuel et tendance. In : Etat de l'agriculture en Méditerranée. Les sols dans la région méditerranéenne : utilisation gestion et perspective d'évolution. Cahiers Options Méditerranéennes1997, vol 2, P2337.

[6] NADJRAOUI D.,FAO Country pasture : Forage resource Profiles: Algeria.

Disponible sur :

<<http://www.fao.org/WAICENT/FAOINFO/AGRICULT/AGP/AGPC/doc/Counprof/Algeria.htm>>

[7] Ministère de l'Agriculture, 1992.

- [8] AMELLAL R.. La filière lait en Algérie : Entre l'objectif de la sécurité alimentaire et la réalité de la dépendance. In : Les agricultures maghrébines à l'aube de l'an 2000. Options Méditerranéennes, Série B, Etudes et Recherches, n° 14, 229-238. 1995
- [9] RGA 2000 et ratios du Ministère de l'Environnement, 2001.
- [10] Jacques Cap de ville : Fumier de bovins, un gisement à fort potentiel pour la filière de méthanisation en France : Journées Recherche et industrie, Rennes 3-5 février 2015, sous la direction de l'ADEM, IRI 2015.
- [11] DESIERE.M, Ecologie des coléoptères coprophiles en prairie permanente pâturée, bulletin écologique, 1983.
- [12] Pouech .Principales caractéristiques des digestats. journée technique nationale du 7 octobre 2008 .Sous la direction de L'ADEME.FRANCE 2008.A4 Edition 2008.
- [13] Marcato, Mohtar, Revel, Pouech, Hafidi, Guiresse :Impact of anaerobic digestion on organic matter quality in pig slurry. In international Biodeterioration and Biodegradation vol 63 pp 260-266, 2003.
- [14] Bastide. Méthanisation agricole et utilisation de cultures énergétiques en co-digestion rapport ADEME décembre 2009.
- [15] Messner, S. and Bickel, K. (s.d.). A performance Standard for a Livestock Manure Management Project Protocole. Final report, California Climate Action Registry, Los Angeles, Californie.2009, 45 p.
- [16] Balsam, J. and Ryan, D. Anaerobic Digestion of Animal Wastes : Factors to Consider. NCAT Energy Specialist, 2006. ATTRA publication n°IP219, 14 p.
- [17] Prigent Hélène, Méthanisation et Biomasse : quelles solutions pour quelles nuisances. Monographie 3EII, .insa-rennes.2015.P45.
- [18] Hawkes F.R., Guwy A.J., Rozzi A.G., Hawkes D.L. A new instrument for measurement of bicarbonate alkalinity, *Wat. Res.* 1993.vol 27, N°1,P 167-170
- [19] Farquhar, G. J. and Rovers, F. Gas production during refusedecomposition. *Water, air and soil pollution.* December 1973, Volume 2, Issue 4, pp 483-495

- [20] Ehrig, H. J. Quality and quantity of sanitary landfill leachate. In *Biotechnology for Waste Management and Site Restoration: Technological, Educational, Business, Political Aspects*. Edité par Rnneau et Bitchaeva, [en ligne] 6 dec 2012. Springer Science & Business Media, P248. Disponible sur <<https://books.google.dz/books?isbn=9400914679>>
- [21] San Joaquin Valley APCD. Preliminary Draft BACT for Dairy Operations, tire de Messner and Bickel. [en ligne] 2004. P112. Disponible sur <https://www.valleyair.org/farmpermits/updates/draft_dairy_bact.pdf>.
- [22] Agriculture, pêcheries et alimentation Québec (MAPAQ). Portrait régional et contribution de l'industrie bioalimentaires à l'activité économique régionale - Montérégie. Portrait annuel, MAPAQ, Québec. 2006, p. 115-130.
- [23] Frazier. West Michigan Regional Liquid Livestock Manure Processing Center. Study report, préparé pour le West Michigan Livestock Producer, Memphis, Tennessee, Etats-Unis, 2006, 104 p.
- [24] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). «Manure Managing with Biogas Recovery Systems – Improved Performance at Competitive Cost». Site du AgSTAR Program de l'EPA, [En ligne]. (2006). (Page consultée le 12 février 2008).
Disponible sur <<http://www.epa.gov/agstar/resources.html>>
- [25] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). «Guide to Anaerobic Digester» In AgSTAR Program. Site du AgSTAR program de l'EPA, [En ligne]. 2007, (Page consultée le 23 février 2008). Disponible sur <<http://www.epa.gov/agstar/operational.html>>
- [26] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Inventory of Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2004. Office of Atmospheric Programs, Washington, DC. 2006. P 388 USEPA #430-R-06-002.
- [27] Isabelle ALLEMAND. VALORISATION ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE *Inventaire & mise en perspective d'expériences réussies en France & en Europe*, Juin 2011.
- [28] Barriatoulah Achimi .GUIDE DE BONNES PRATIQUES POUR LES PROJETS DE MÉTHANISATION, 2011. ATEE, CLUB BIOGAZ.
- [29] Chen, Y.,. Inhibition of anaerobic digestion process. *Bioresource Technology*. Cheng J., J. and Creamer S., K. 2008, vol. 99, p. 4044-4064.

[30] Parking, G. 37th Purdue Industrial Waste Conference. Response of methane fermentation to continuous addition of selected industrial toxicants., West Lafayette. 1983.

[31] Association technique énergie et environnement (ATEE). «La méthanisation des matières organiques». Site de l'ATEE, [En ligne] (2007). (Page consultée le 2 février 2008)

Disponible sur :

<http://www.biogaz.atee.info/news/fullstory.php/aid/24/La_m%E9thanisation_des_mati%E8res_organiques.html>.

[32] Raven, RPJM. Gregersen, KH. Biogas plant in Denmark: Successes and Setback. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007 vol. 11, n°1, p. 116-132.

[33] Seadi T., A. Danish Centralized Biogas Plants: Plant Descriptions. Rapport de recherche, Bioenergy Department, University of Southern Denmark, (2000). P 26.

[34] N. Douag-Tirichine , A. Benkhelifa et K. Bousdira. Production de biogaz à partir des déjections bovines en milieu aride: cas du M'Zab (Algérie), *Revue des Energies Renouvelables*.2014. Vol. 17 N°3 (2014) 419 - 426.

[35] Ali Zerarga directeur des services agricoles , Direction des Services Agricoles Sétif (DSA), 2012.

[36] Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural Direction des Statistiques Agricoles et des Systèmes d'Information ; SUPERFICIES ET PRODUCTIONS-SERIE B 2014.

[37] DSA., 2010. Directions des services agricoles Sétif.

[38] BENDIAB Nesrine. Analyse de la conduite d'élevage bovin laitier dans la région de Sétif. P 129. Mémoire de fin d'études; Université Ferhat Abbas–SETIF. Soutenu Publiquement le 28/02/2012.

[39] MADANI T., Analyse de l'activité d'élevage bovin et transformation des systèmes de production en situation sylvopastorale algérienne. HUBERT B., VISSAC B., CASABIANCA F. *Revue Élev.*2002. Vol 55 N°3 .P 197-209.

[40] Caroline Zemb .Equilibre entre la mise à disposition des effluents d'élevage pour la méthanisation et le retour au sol du digestat : mise en place d'un outil d'aide à la décision pour s'adapter aux conditions locale.. P 57. Mémoire de fin d'études. IDEX Groupe 22/09/2011.

[41] Brassard, P., L. Hamelin, P. Singh et S. Godbout. Révision de l'AGDEX 538 / 400.27 : Rapport final. [En ligne] 2012

Disponible sur : <<http://www.irda.qc.ca/fr/Rapports-de-recherche/435>>

[42] M. FREDERIC. Le Biogaz Energie Renouvelable ; site d'information biogaz[en ligne]. [consulté le 14/6/2016]. Disponible sur : <biogaz-energie-renouvelable.info/index.html>

[43] Calculer facilement avec CALCULIS.[en ligne] Copyright 2012-2016. Disponible sur <<http://calculis.net/beton#resultat>>

[44] R Moletta ; la méthanisation 2001, édition TEC &DOC, 2008.

[45]VALORGA INTERNATIONAL SAS. Le Procédé de méthanisation VALORGA [en ligne],[consulté le 10/06/2016].

Disponible sur < [LE-PROCEDE-DE-METHANISATION-VALORGA.html](#)>

[46]Software pour l'Architecture et la construction. Générateur de prix de la construction.[en ligne],[consulté le 17/06/2016].

Disponible sur

<http://www.algerie.prixconstruction.info/renovation/VRD_et_amenagements_exterieurs.html>

[47] Alain BADOUC .ETUDE DE FAISABILITE POUR LA CREATION D'UNE UNITE DE METHANISATION. ASSOCIATION METHANISATION SEILLE ENVIRONNEMENT.2013 .ANNEXES.

[48] S. Igoud, et al .Première approche de la caractérisation du Biogaz Produit à Partir des Déjections Bovines, *Rev. Energ.Ren* .2002.Vol 5.P123-128.

[49] Couturier, C., Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse.2009. Edition Record/Solagro.

[50] Lejeune, C., Valorisation électrique et thermique du biogaz de méthanisation. Formation EFE – Biomasse pour les usages énergétiques. PROO2 Paris.2008.P32.

[51] Couturier, C., Berger, S., & Héraul, I, La digestion anaérobie des boues urbaines.2001. Toulouse: Solagro.

[52] Lukaszczyk, M., Déterminer la charge d'un moteur électrique est primordial pour l'efficacité énergétique[en ligne],2013[consulté le 18/06/2016].

Disponible sur <<https://www.pei-france.com/article/determiner-la-charge-dun-moteur-electrique-est-primordial-pour-lefficacite-energetique>>

[53]Réaliser une étude de pré-faisabilité d'une cogénération dans les Règles de l'Art, consulté le 17/06/16, disponible sur :

<<http://www.energie.arch.ucl.ac.be/cogeneration/cdrom/cogeneration/evaluer/cogenerentabilite.htm>>

[54] JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIEENE N°18, 8avril 2015.

Annexe 1 : cout de construction du digesteur

1. Calcul du volume du digesteur

$$\text{Volume (digesteur)} = \frac{\text{charge annuelle}}{\text{masse volumique} \times \text{temps de séjour}}$$

Charge annuelle = 11 500 tonnes = 11 500 000 kg,

Masse volumique des déjections de bovin = 750 kg / m³,

$$V = \frac{11\,500\,000}{750 \times 33} = 464.7$$

Ce volume a été calculé en prenant seulement en considération que le volume de substrat, cependant la production du biogaz va augmenter le volume requis pour les substrats, donc pour ne pas avoir des risques d'explosions ou de fuites, nous avons augmenté le volume du digesteur à 500 m³.

A l'aide d'un calculateur à béton nous avons estimé la quantité des matières de construction nécessaire pour la construction du digesteur [39].

Les prix de ces matières de constructions ont été obtenus de vendeurs priés sur le marché Algérien.

Matière	prix/ Unité	Quantité nécessaire	cout(DA)
Ciment	700 DA/50kg	4500kg	63000
sable	5000DA/2,5tonnes	25140 kg	50280
gravier	770DA/m3	37710kg	17710
eau	6 DA/m3	2250l	13,5
Totale	/	/	131003.5

En faisant la somme des couts des matières et en additionnant le cout de la main d'œuvre et l'allocation du matériel de construction :

$$\text{Totale (digesteur)} = 63000 + 50280 + 17710 + 13.5 + 30000 + 390\,000 = 551003.5 \text{ DA}$$

Annexe 2 : Calcule du coût système de chauffage

Le prix d'une chaudière à gaz avec une puissance de 80kw est de 927 448.7 DA [41]

Le prix d'achat d'1 m de cuivre de 54mm de diamètre est de 1453DA [41], donc le cout du serpentín est de :

Coût (serpentín)=1453*100= 145.300 DA.

Coût totale du système de chauffage est de :

$C_{T1}=145300+927\ 448.7=1072748.7\text{DA}.$

La quantité d'eau nécessaire pour le chauffage du digesteur :

Le volume d'eau qui circule dans le serpentín :

$V = r^2 * 3.4 * L = 0.054^2 * 3.14 * 100 = 0.92\text{m}^3$

r : rayon du serpentín

L : la longueur du serpentín

- La quantité d'eau requise est estimée à 1.2m^3 d'eau.
- Sachant que pour chauffer 1m^3 d'eau de 12°C à 40°C , il faut dépenser 32.5kWh.
- En faisant une conversion au gaz, la quantité de gaz dépensée pour le chauffage d'1 m^3 d'eau est de 2.54m^3 .

Donc la quantité de gaz annuelle consommée pour le chauffage du digesteur est de :

$Q=2.54*24*365= 473040\ \text{m}^3.$

Cout du chauffage annuelle= $473040*0.324=153264.96\ \text{DA}$

Prix d'achat d'1 m^3 de gaz est de **0.324 DA**.

Annexe 3 : le coût d'investissement initial

Pour calculer le cout d'investissement initial de l'installation, il faut faire la somme des :

- Cout de construction du digesteur,
- Cout de transport des effluents d'élevage jusqu'à l'usine,
- Cout de fonctionnement du digesteur (chauffage, pompage des boues)
- Cout de l'installation de valorisation du biogaz.
- Cout de la maintenance, et du génie civil. (2 à 5% le coût des infrastructures)

Nous avons obtenu :

$$\text{Coût}_i = 551\,003.5 + 1\,072\,748.7 + 153\,264 + 2\,210\,501 = 5\,712\,518 \text{ DA}$$

En ajoutant les coûts liés à la maintenance et du génie civile des différents équipements qui représente environ 2% de l'investissement, nous obtenons :

$$\text{Coût}(i) = 5\,826\,768.4 \text{ DA}$$

Annexe 4 : Le retour sur investissement

Gain sur la vente d'énergie

En fixant le prix du kW_{el} (électrique) = 5 DA et le prix du kW_{th} (thermique) = 4 DA

$$G_v = E_{el}(\text{vente}) * 5 + E_{th}(\text{vente}) * 4 = 3\,786\,391.4 \text{ DA}$$

Le Gain d'exploitation annuel est calculé en soustrayant les frais de fonctionnement annuels de l'installation du gain de vent de l'énergie

$G_e = G_v - \text{cout de transport de déjection} - \text{le cout de chauffage du digesteur} - \text{la maintenance}$

$$G_e = 3\,786\,391.4 - 1725000 - 153264.96 - 114250.36 = 1\,793\,876 \text{ DA.}$$

Retour sur investissement = investissement initial / gain d'exploitation annuel.

$$RI = 5\,712\,518 / 1\,793\,876 = 3.2 ;$$

Le retour sur investissement se fera sur une période de 3 ans et 2 mois