



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Larbi Tebessi

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie



MEMOIRE DE MASTER

Domain : Science de la matière

Filière : Chimie

Option : Chimie organique

Thème :

**Valorisation des déchets agricoles par
la production de biogaz**

Présentés par :

Lemita Saàdane

Zerfaoui Zaid

Devant le jury:

TOUAHRIA SORAIA

MAA U.TEBESSA

Président

BELGHIT CHAFIK

MCB U.TEBESSA

Rapporteur

BENFLIS HASSAN

MAA U.TEBESSA

Examineur

Année Universitaire 2019/2020



Déclaration sur l'honneur de non-Plagiat

(À joindre obligatoirement au mémoire; Remplie et signée)



Nous soussignons

Nom, prénom: Kemita Saâdane & Benjassi Zaid

N° de carte d'étudiant: (1) 10/4015209 (2) 13/341019415

Régulièrement inscrits (es) en **Master** au **Département Sciences de la Matière**

Année universitaire: **2019/2020**

Domaine: **Sciences de la matière**

Filière: **Chimie**

Spécialité: Chimie Organique

Intitulé du mémoire: Valorisation des déchets agricoles par la production de biogaz

Attestons que notre mémoire est un travail original et que toutes les sources utilisées ont été indiquées dans leur totalité. Nous certifions également que nous n'avons ni recopié ni utilisé des idées ou des formulations tirées d'un ouvrage, article, ou mémoire, en version imprimée ou électronique, sans mentionner précisément leur origine et que les citations intégrales sont signalées entre guillemets.

Sanctions en cas de plagiat prouvé:

Les étudiants seront convoqués devant le conseil de discipline, les sanctions prévues selon la gravité du plagiat sont:

- L'annulation du mémoire avec possibilité de le refaire sur un sujet différent.
- L'exclusion d'une ²⁰²⁰ ~~une~~ année du master.
- L'exclusions définitive.

عن رئيس المجلس الشعبي البلدي
 وتفسيره
 امضاء السيد بن سرفة نجاة
 كاتب راقن



Fait à Tébessa, le: 23/11/2020

Signature des étudiants (es):

(1):

[Signature]

(2):

[Signature]



Département : Science de la matière

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie organique

Année universitaire 2019/2020



Formulaire de levée de réserves après soutenance d'un Mémoire de Master

Données d'identification du candidats(es) :

Nom et prénom du candidat : Enfassi Zaid

Intitulé du Sujet : Valorisation des déchets agricoles par la production de biogaz
à partir de déchets agricoles

Données d'identification du membre de jury :

Nom et prénom : Boulos Hacene

Grade : M.A.A

Lieu d'exercice : Université Larbi Tébessi- Tébessa

Vu le procès-verbal de soutenance de la thèse sus citée comportant les réserves suivantes :

quelques fautes d'orthographe, références utilisées
repre les

Et après constatation des modifications et corrections suivantes :

les fautes corrigées

Je déclare en ma qualité de président de jury de soutenance que le mémoire cité remplit toutes les conditions exigées et permet au candidat de déposer son mémoire en vue de l'obtention de l'attestation de succès.

Le 23/11/2020

Président de jury de soutenance : (Nom/Prénom et signature)

Boulos Hacene

Dédicaces

A ma chère maman et l'âme de mon cher père , pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A mes chers frères, de la famille ou de carrière d'étude, pour leur appui et leur encouragement,

A mes chères amis Okba Abderahmane Hicham Nabil Abderazak Dhia Eddine

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

Merci d'être toujours là pour moi.

Zerfaoui Zaid

À ma mère et à mon père mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

À mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

À mes chers frères à l'étranger et dans le pays pour leur appui et leur encouragement,

À les amie abdel(abderrahim) et zaki pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

À tous les professeurs et les enseignants qui m'a dirigé sur le chemin de la science.

Merci d'être toujours là pour moi.

Lemita Saadane



Remerciement

Je souhaite avant tout remercier mon directeur de mémoire, Chafik Belghith, pour le temps qu'il a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche et pour avoir eu la patience de répondre à mes innombrables questions. Son exigence m'a grandement stimulé.

Les enseignants de qualité dispensé par la filière chimie organique et Science de la matière en générale a également su nourrir mes réflexions et a représenté une profonde satisfaction intellectuelle, merci donc aux enseignants-chercheurs.

Je remercie en particulier l'administration de laboratoire chimique, pour m'avoir donné l'occasion extraordinaire de réaliser mon travail de terrain.

Un grand merci également à L'université de Larbi Tebessi et la faculté de science naturel et exactement la faculté de science de matière et tous les chercheurs et les employeurs qui m'aident pour l'accès à la fin d'étude vraiment merci sans oublier tous les étudiants de l'université et mes camarades vraiment merci pour vous .

ملخص :

الهضم اللاهوائي يعتبر احد عمليات انتاج الطاقة المتجددة الاكثر فاعلية تمدنا هذه العملية بالسلام و العلاقة الطيبة مع البيئة المحيطة بنا. يتمتع الهضم اللاهوائي بعدة مزايا سواء في الصناعة او في المساعدة على تحقيق وسط نقي او اقل سمية في حال ما استخدمنا غاز الميثان الناتج عنه بدل الغاز الناتج عن طريق التنقيب . لتحقيق او رفع الانتاجية لهذا الغاز الطبيعي الذي لديه المزايا الانفة الذكر يجب توفير الشروط اللازمة لهذه العملية نقصد هنا درجة الحرارة و درجة الحموضة و خلو الوسط من الهواء دون ان ننسى الابتعاد عن المواد المثبطة لهذه العملية و المواد السامة التي لا تسمح للعملية يأخذ مسار صحيح و ايضا لضمان التجمع لأنواع البكتيريا التي تلعب الدور الرئيسي في هاته العملية الهضمية اللاهوائية دون ان ننسى التركيز على انواع المفاعلات الهاضمة او الاجهزة التي تحضن العملية و التي تساعدنا في توفير الشروط الانفة الذكر لتحقيق عملية هضم لا هوائي صحيحة. هذا الغاز الناتج عن طريق الهضم اللاهوائي لديه مساران للاستعمال اما توليد الطاقة الحرارية او توليد الطاقة الكهربائية ولديه ايضا طرق تنقية وتصفية من الشوائب والمواد او الغازات الغير مرغوب فيه قبل اعادة استعماله كما ان لهذا الغاز خصائص تميزه عن غيره.

Résumé :

La digestion anaérobie reste l'un des efficaces processus pour l'énergie renouvelable. On nous donne un paix et une bonne relation avec l'environnement elle a des plusieurs avantages dans l'industrie et la réalisation d'un milieu pure ou un peu moins toxique lorsque leur CH₄ produise mis en jeu. Pour réaliser ou augmenter l'existence de biogaz qui a les avantages précédents , il fallait réaliser les condition spécifique de cette digestion ça veut dire la température requis et le PH et l'alcalinité et les nutriments et éviter les composé toxiques et inhibant aussi éviter définitivement l'oxygène pour garantir l'agrégation des bactéries qui jouent le rôle principales dans cette processus et sans oublier la concentration sur la disponibilité de le bioréacteur qui nous permet d'obtenir les condition nécessaire pour une juste digestion. Le CH₄ produise a cause de la digestion anaérobie a deux chemin de valorisation soit valorisation thermique ou une valorisation électrique aussi il a des méthode de purification avant l'utilisation et ses caractéristiques spécifique .

Abstract:

Anaerobic digestion remains one of the efficient processes for renewable energy. We are given a peace and a good relation with the environment it has several advantages in the industry and the realization of a pure medium or a little less toxic when their CH₄ produces put into play. To achieve or increase the existence of biogas which has the previous advantages. It was necessary to achieve the specific conditions of this digestion that means the required temperature

and the HP and the alkalinity and the nutrients and to avoid the toxic and inhibiting compounds to definitively avoid the oxygen to guarantee the aggregation of bacteria. Those play the main role in this process and without forgetting the concentration on the availability of the bioreactor, which allows us to obtain the necessary conditions for a correct digestion. The CH₄ produced due to anaerobic digestion has two recovery paths either thermal recovery or electrical recovery also it has pre-use purification method and its specific characteristics.

Table des matières

Dédicaces	
Remerciement	III
Résumé	IV
Table des matières	VI
Liste des symboles	X
Liste des figures	XI
Liste des tableaux	XIII
Introduction générale	1

Chapitre I : La digestion anaérobie

I.1. Introduction	3
I.1.1. La découverte de la fermentation et du biogaz	3
I.1.2. Un écosystème naturel complexe	4
I.2. Microbiologie de la digestion anaérobie	6
I.2.1. Hydrolyse	6
I.2.2. Acidogènes	6
I.2.3. Acétogénèse	7
I.2.4. Méthanogénèse	8
I.2.5. Sulfato-réduction	9
I.3. Physico-chimie de la digestion anaérobie	10
I.3.1. Température	10
I.3.2. PH et alcalinité	10

I.3.3. Les nutriments	11
I.3.4. Composés toxiques ou inhibant la digestion anaérobie	11
I.4. Utilisation du biogaz	12
I.4.1. Caractéristiques du biogaz	12
I.4.2. Les modes de valorisation	13
I.4.2.1. Valorisation thermique	13
I.4.2.2. Valorisation électrique	14
I.4.2.2.1. Moteurs à gaz et fioul-gaz	14
I.4.2.2.2. Turbines et cycle combiné	15
I.4.2.3. Biogaz véhicule et injection dans le réseau	19
I.4.3. Contraintes pour la valorisation du biogaz	19
I.4.4. Amélioration du débit de biogaz	19
I.4.5. Purification du biogaz	20
I.4.5.1. Elimination du sulfure de dihydrogène	21
I.4.5.2. Elimination des composés organohalogénés, métaux lourds et siloxanes	21
I.4.5.3. Elimination de la vapeur d'eau	21
I.4.5.4. Elimination du gaz carbonique	22
I.4.5.5. Traitement par biomasse autotrophe	22
I.5. Conclusion	23

Chapitre II : Les bioréacteurs ou les digesteurs

II.1. Introduction	24
II.1.1. Généralités	24
II.2. Avantages et limites de la digestion anaérobie	24
II.3. Choix d'un digesteur	26

II.3.1. Mode d'alimentation des réacteurs de fermentation	27
II.3.2. Les types des bioréacteurs	28
II.3.3. Solution technologies pour les bioréacteurs continus	28
II.3.3.1. Les digesteurs à cellules libres	28
II.3.3.1.1. Digesteurs infiniment mélangés	29
II.3.3.1.2. Digesteurs à contact	29
II.3.3.2. Les digesteurs à biofilm et à granules	30
II.3.3.2.1. Réacteurs à lit fixe	31
II.4. Conclusion	32

Chapitre III : Matériels et Méthodes

III.1. Introduction	33
III.2. Dispositif expérimental	33
III.2.1. Le bioréacteur	33
III.2.2. Support de biomasse	37
III.2.3. Suivi du digesteur par des mesures	37
III.3 Description des substrats	38
III.3.1 Caractérisation physico-chimique	38
III.3.1.1 Matière sèche (MS) et matière organique (MO)	39
III.3.1.1.1 Les protocoles	39
III.3.2 pH et conductivité	42
III.3.3 Dosage de la demande chimique en oxygène	46
III.3.4 Dosages des acides gras volatils	47
III.3.5 Analyse de la phase gazeuse	48

III.4. Prédiction de la capacité de la valorisation des déchets de la ville de Tébessa	50
III.4.1. Estimation des quantités de matières et déchets organique	50
III.4.2. Estimation du volume du biogaz	50
III.5. Conclusion et discussion	51
Conclusion générale	52

Liste de symboles

BSRH : les bactéries sulfato-réductrices hydrogénotrophes.....9

BSRA : les bactéries sulfato-réductrices acétotrophes.....9

BMH : les bactéries méthanogènes hydrogénotrophes,9

BH : les bactéries homoacétogènes 9

BMA : Les bactéries méthanogènes acétotrophes.....9

BSR : Les bactéries sulfato-réductrices 9

BNR : Les bactéries nitrato-réductrices9

BM : Les bactéries méthanogènes 9

AGV : Acide Gras Volatile 12

TAV : Les turbines à vapeur..... 15

TAG : La technologie des turbines à gaz..... 15

CET : Les centres d'enfouissement techniques..... 15

CVO : Centre de Valorisation de déchets Organiques..... 20

CSTR: Continuous Stirred Tank Reactor..... 29

MS : matière sèche 29

DCO : Demande chimique d'oxygène 30

DBO : Demande biologique d'oxygène 37

CV : La cumulative volume48

Liste des figures

Figure I.1:	La chaine trophique des étapes de la fermentation.	5
Figure I.2:	Bactérie Méthanogénèse.	8
Figure I.3:	Méthanogénèse par réduction de CO ₂ .	9
Figure I.4:	Economie potentielle d'énergie primaire en cogénération.	15
Figure I.5:	Installations en cogénération : a) Moteur alternative.	16
Figure I.6:	Installations en cogénération : b) Turbine à gaz.	17
Figure I.7:	Installations en cogénération : c) Turbine à vapeur.	17
Figure I.8 :	Installations en cogénération : d) Cycle-combiné.	18
Figure II.1:	Réacteurs à boues libres équipés d'un système de rétention de biomasse	28
Figure II.2:	Stratégies d'utilisation des biofilms	30
Figure II.3:	Exemple de garnissage utilisable comme support fixe de micro-organismes.	31
Figure II.4:	Schéma d'un digesteur à lit fixe	31
Figure II.5:	Biofilm	32
Figure III.1:	Figure Exprime le dispositif expérimental	33
Figure III.2:	Digesteur anaérobie à lit fixe	34
Figure III.3:	le réacteur durant la préparation et le remplissage par les PVC.	35
Figure III.4	le digesteur durant son remplissage par le déchets agricole dilué.	36

Figure III.5	le dispositif expérimental réalisé dans laboratoire.	36
Figure III.6	le support de biomasse	37
Figure III.7	Dispositif expérimental digesteur à lit fixe	38
Figure III.8	Peser le déchet agricole avant le séchage	41
Figure III.9	Le déchet agricole après le séchage	41
Figure III.10	présente les mesures du PH graphiquement	45
Figure III.11	présente les mesures de la conductivité graphiquement	46
Figure III.12	Présente les mesures du volume du biogaz produit chaque jour graphiquement	49
Figure III.13	Présente la cumulative volume du biogaz produit graphiquement	50

Liste des tableaux

Tableau I.1:	Réaction d'actetogénèse avec production de d'hydrogène et de formate, et énergie liber associée	7
Tableau I.2:	Compétition pour l'utilisation du couple H ₂ / CO ₂ et de l'acétate	9
Tableau I.3:	Comparatifs des solutions en cogénération	18
Tableau I.4:	Présente un récapitulatif des technologies disponibles pour la purification du biogaz. Ces différentes solutions sontprésentées de façon plus détaillées dans les sections suivantes.	20
Tableau III.1	présente les résultats du calcul de la matière sèche et la matière organique	42
Tableau III.2	présente les mesures du PH	44
Tableau III.3	présente les mesures de la conductivité	45
Tableau III.4	Présente les mesures du volume du biogaz produit chaque jour	48
Tableau III.5	Présente la cumulative volume du biogaz	49

Introduction générale

La production de l'énergie est une nécessité mondiale pour la continuation de la vie avec toute ces branches mais la question jusqu'à qu'a quand l'énergie va suffise le monde ? Pour cette raison les savons et les chercheurs concentrent sur une solution et une autre source d'énergie c'est les énergies renouvelables comme une source très importante dans ces énergies ils trouvent les biogaz produises a partir des biomasses et précisément qu'on va traiter le Méthane produise par la biomasse de déchets agricole c'est qu'on appelle la valorisation de ces déchets agricole et la réalisation d'un nouvelle source d'énergie de biogaz et d'électricité...etc. ce processus elle est découvre la première fois en 1981 par la digestion anaérobie de matières organiques biodégradables de différentes catégories (déchets verts, déchets ménagers fermentescibles, des boues de stations, des effluents d'élevage et de coproduits agricoles, des cultures énergétiques agricoles, etc.).

Le biogaz est composé majoritairement de méthane et de dioxyde de carbone et pourrait être valorisé, après son épuration, pour la production de biocarburant, d'électricité et/ou de chaleur. Pour une méthanisation optimale. L'hydrolyse, l'acidogène, l'Acétogénèse et la méthanogénèse sont les principales étapes constituant un processus classique de digestion anaérobie. Ce dernier présente un métabolisme assez complexe avec plusieurs mécanismes de transformations possibles. Les espèces sont en compétition continue, impliquant ainsi des cinétiques de croissance avec de nombreuses phases d'activation et d'inhibition. Procédé de digestion anaérobie. Une unité de production et de valorisation du biogaz comprendra essentiellement un hydrolyseur, un ou plusieurs digesteurs où se déroulent les réactions, un gazomètre et un système de conversion du biogaz en d'autres formes d'énergie utile.

En conditions d'anoxie, à un PH neutre et sous un potentiel redox inférieur à 330 mV, des populations bactériennes dégradent la matière organique dans le digesteur pour produire du biogaz. Des températures mésophiles (autour de 37°C) ou thermophiles (autour de 55°C) sont le plus souvent assurées. Les débits d'entrée et de sortie des effluents, le temps de séjour des fluides et des solides ainsi que la configuration des digesteurs et des unités de séparation mises en jeu doivent être minutieusement choisis pour la bonne conduite de la digestion anaérobie. Le temps de séjour hydrodynamique doit permettre un taux de croissance satisfaisant des populations bactériennes.

D'autre part, et afin d'éviter la diminution de la biomasse dans le réacteur (lessivage), la conception du réacteur et les conditions de fonctionnement doivent aussi assurer un temps de séjour des solides supérieur au plus grand temps de doublement des populations bactériennes. Ainsi la relation entre le temps de séjour hydraulique et le temps de séjour des solides va dépendre du procédé préconisé pour la digestion anaérobie. Pour les configurations des digesteurs anaérobies. Le choix du type de réacteur à considérer dans un processus de digestion anaérobie dépend non seulement des caractéristiques de la charge à traiter (notamment de sa teneur en solide) mais aussi des contraintes technico-économiques relatives à la mise en œuvre de l'installation. il y a des différents types de digesteur par exemple : Digesteur en batch Digesteur continu Digesteur à lit fixe et à lit fluidisé...etc.

Le rendement en méthane c'est les substrats organiques sont généralement constitués de protéines, de lipides et de glucides avec des taux variables selon la nature et l'origine de la biomasse. Le rendement en méthane dépend largement du taux et de la composition des matières organiques volatiles dans la charge à traiter. Dans notre étude on va traiter la valorisation de déchet agricole avec une classification de trois chapitres. Dans le 1^{ière} chapitre on va parler sur la digestion anaérobie on passant par une introduction puis on va traiter la microbiologie de la digestion anaérobique après on va parler sur la physico-chimie de cette digestion et l'utilisation du biogaz terminant par une conclusion. Dans le 2^{ième} chapitre on va parler sur le bioréacteur et les digesteurs on commence par une introduction spécifique, après on va parler sur les avantages et les limites de la digestion anaérobie, ensuite le parole sera sur le choix d'un digesteur enfin on va fini par une conclusion. Dans le 3^{èmes} chapitre on va parler sur la digestion anaérobique et la bactérie anaérobique sa métabolisme avec les déchets et comment ça sera le dégager de méthane, on terminant par l'interprétation et discussions des résultats obtenus.

I.1. Introduction

Les cellules produisent l'énergie grâce à le métabolisme énergétique qui a une coordination avec une chaîne des scènes successive de réaction d'oxydo-réduction couplées jusqu'à un accepteur final d'électrons. Pour sa sera une production d'énergie parmi le microorganisme il y a deux voies soit par la photosynthèse ça veut dire organisme phototrophes ou par une suite des réactions chimique ce qu'on appelle organisme chimiotrophe, telles que la fermentation et la respiration. Dans le cas des chimiotrophes, on parle de fermentation lorsque l'accepteur final d'électrons est un composé organique, et de respiration anaérobie lorsque l'accepteur final est un composé minéral oxygéné (nitrates sulfates carbonates....) Dans la suite le terme fermentation désignera un processus anaérobie. C'est à dire déroulant dans un environnement exempt d'oxygène.

I.1.1. La découverte de la fermentation et du biogaz

La maîtrise des techniques de fermentation et sa découverte sont absolument liées à la fabrication du pain et bière par les anciennes civilisations dans les années avj comme les céréalières sumérienne et égyptienne. La fermentation fut rapidement maîtrisée. Il fut pendant très longtemps impossible d'expliquer le phénomène la découverte des bactéries, qu'en 1677 avec la première véritable microscope développé par *Antoni van Leeuwenhoek* après le chimiste *Lavoisier* fait le premier travail scientifique dans ce domaine sur la fermentation alcoolique et découvre la réaction suivante : $(C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2)$. Après cette époque ils vient un groupe successive de chercheurs qui permet la progression de le domaine de fermentation comme *Gau lausac* 1837 *cagnard latour Cagniard Latour*, *Theodor Schwann* et *Friedrich Traugott Kützing* qui démontrèrent que la levure de bière est un organisme vivant.

La première partie du 19e siècle *Jöns Jacob Berzelius* et *Theodor Schwann*, qui affirmaient respectivement, que la fermentation était purement chimique pour l'un, et uniquement microbienne pour l'autre. Puis *Pasteur* il montra qu'à chaque fermentation correspondait un ferment particulier. Grâce à ces chercheurs sera la réalisation d'une culture pure de microorganismes, devait marquer le début de la maîtrise industrielle de la fermentation. En parallèle de ces avancées en microbiologie survinrent les premières grandes découvertes sur le biogaz. En 1630 *Jan Baptist van Helmont*, découvre que la fermentation de la matière organique produit un gaz inflammable.

Le terme de méthane ne sera proposé qu'en 1865 pour être définitivement accepté en 1892 lors d'un congrès international de nomenclature chimique. La digestion anaérobie n'est autre que l'exploitation par l'homme d'un processus naturel, la fermentation méthanogène de la matière organique, c'est à dire une fermentation avec comme accepteur final d'électrons le (bio) méthane.

Cette dégradation de matière organique en anaérobiose conduit à la formation d'un mélange gazeux composé essentiellement de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2), communément appelé biogaz. Les travaux en microbiologie conduisirent vers 1930 plusieurs scientifiques, dont Arthur M. Buswell, à la découverte des bactéries anaérobies. C'est également à cette époque que furent formulées les premières équations macroscopiques de dégradation de la matière organique par fermentation méthanogène.

I.1.2. Un écosystème naturel complexe

La présence des bactéries méthanogène est disponible dans des nombreux écosystème naturels comme les marais et tourbières et les appareils digestifs des ruminants ou des humains. Le traitement des rejets organiques peut servir par la fermentation méthanogène aussi les eaux usées, ou encore des lisiers des ordures ménagères et pour la dégradation de matière organique en biogaz plus de 140 espèces bactériennes [1], sont impliquées dans ce procédé une grande partie de la flore microbienne anaérobie représentée par les bactéries, mais d'autres organismes comme des protozoaires, des champignons ou des levures peuvent intervenir [2]. Ce processus est tout particulièrement intéressant en raison du biométhane produit, qui est un gaz énergétique valorisable.

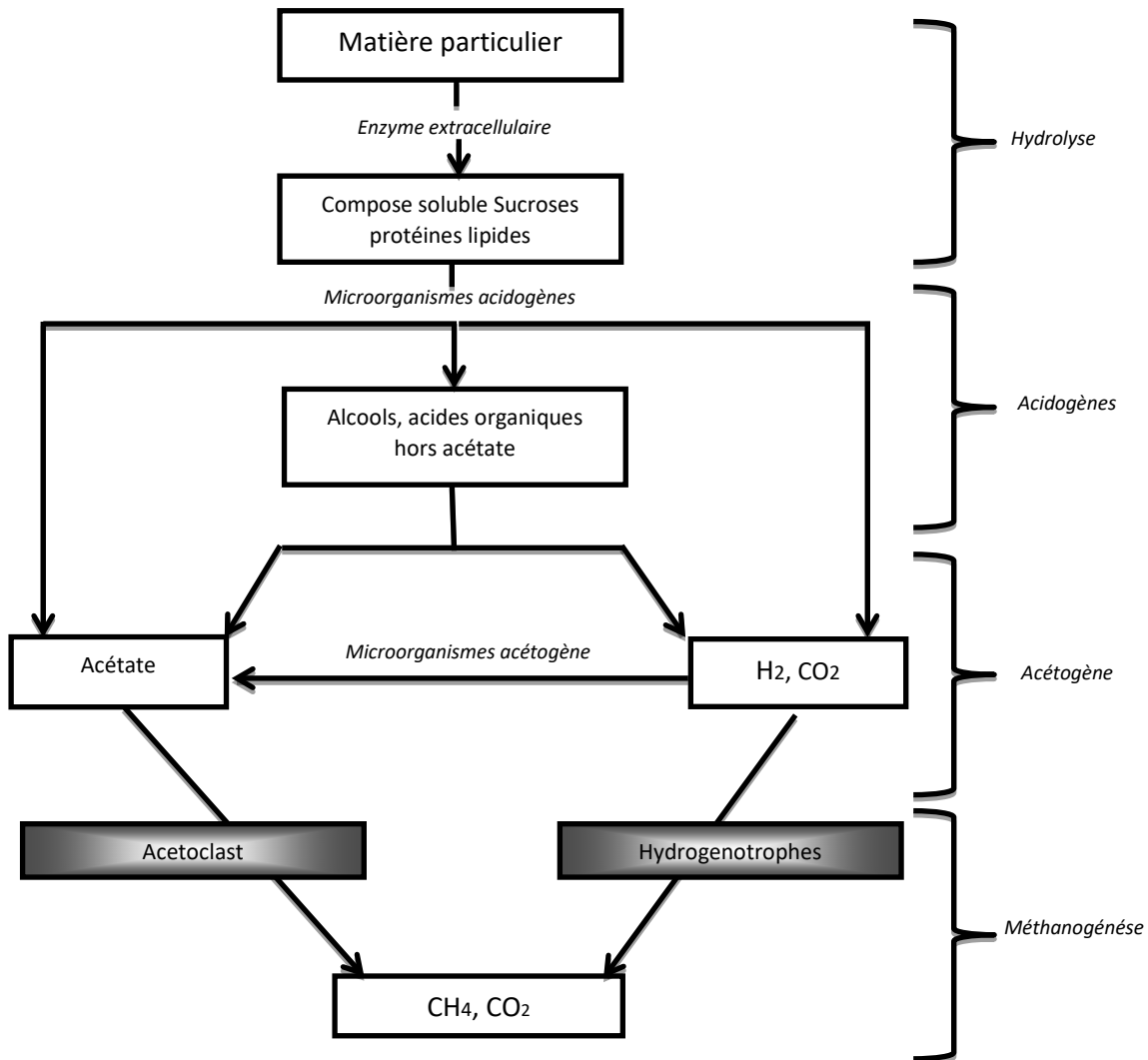


Figure I.1 : La chaîne trophique des étapes de la fermentation (inspiré de Sinchal et Al (1979))

L'extension des connaissances sur le déroulement de la fermentation méthanogène grâce aux progrès en microbiologie ; et la description du processus s'est compliquée au fur et à mesure. Andrews (1968) a fait le choix pour représenter la fermentation méthanogène uniquement par l'étape finale de méthanogénèse (voir figure I.1). Un peu plus tard l'inclusion de l'étape d'acidogénèse est appliquée par Graef et Andrews (1973) dans la description macroscopique de la fermentation. D'autres auteurs, l'ajout d'une étape initiale d'hydrolyse dans la description macroscopique de la fermentation est incluse par Hill et Barth (1977) Boone et Bryant (1980) et obtiennent un processus en trois étapes.

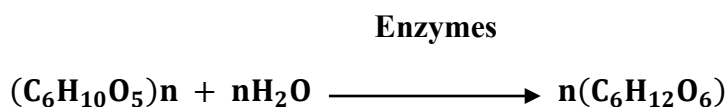
La prise en compte de compétitions entre espèces bactériennes pour l'utilisation des différents substrats conduit à considérer des schémas réactionnels plus complexes. On considère souvent un niveau de description à quatre étapes principales (c.f. figure I.1), impliquant quatre groupes de microorganismes spécifiques, où les composés intermédiaires des premières étapes servent de substrats pour les étapes suivantes [3], Hydrolyse, Acidogénèse. Acétogénèse, Méthanogénèse.

Ces quatre étapes principales sont présentées et détaillées dans le suivant :

I.2. Microbiologie de la digestion anaérobie :

I.2.1. Hydrolyse

En train de l'étape d'hydrolyse, la solubilisation des macromolécules ça sera sous l'action d'enzymes extracellulaires excrétées par des bactéries anaérobies strictes (*Clostridium* pour la dégradation de cellulose, amidon) ou facultatives aérotolesérantes (*Bacillus* pour la dégradation de protéines). Pour pouvoir être transportés au travers de la membrane cellulaire ça sera un scindage des composés particuliers en monomère ou dimères de taille suffisamment petite. Parfois la métabolisme au niveau de la cellule utilisé ces simples molécules comme un source d'énergie [4]. Lorsque l'on s'intéresse à la méthanisation de déchets complexes contenant des fractions solides, par exemple de la cellulose [5], l'hydrolyse devrait être considérée comme l'étape cinétiquement limitante [6]. On peut schématiser les réactions d'hydrolyse enzymatique comme suit, en considérant la dégradation de cellulose en glucose, où les enzymes joueraient le rôle de catalyseur [7].



I.2.2. Acidogènes

L'acidogénèse ou fermentation des substances monomères organiques en hydrogène ou formate, dioxyde de carbone, pyruvate, AGV (acides acétique, propionique, butyrique, valérique, etc.) Et autres produits organiques (éthanol, cétones ou acides lactique, succinique, etc.) Réalisé par les bactéries fermentatives. L'acidogénèse est généralement déterminante pour l'équilibre de l'ensemble du processus de digestion anaérobie, en raison des molécules intermédiaires d'hydrogène et d'agv produites simultanément lors de cette étape.

En effet, l'accumulation d'hydrogène peut inhiber l'acétogénèse et la méthanisation acétoclaste, conduisant ainsi à une accumulation des AGV. L'accumulation d'agv conduit à une baisse de ph et inhibe par conséquent l'ensemble du processus de digestion anaérobie.

I.2.3. Acétogénèse

Les vitesses réactionnelles de l'acétogénèse sont généralement lentes et soumises à des problèmes d'inhibition liée à la présence de l'hydrogène qui modifie l'équilibre thermodynamique des réactions. Au cours de cette étape, les intermédiaires métaboliques sont transformés par 3 principaux groupes bactériens :

- a. Les bactéries acétogènes productrices obligées d'hydrogène (bactéries syntrophiques) oxydent les composés préalablement réduits (alcools et AGV) en hydrogène, gaz carbonique, et acétate.
- b. Les bactéries homoacétogènes réalisent la respiration acétogénique des bicarbonates, le catabolisme des mélanges d'hydrogène et de dioxyde de carbone et la production d'acide acétique, entrant ainsi en compétition avec les bactéries méthanogènes pour l'hydrogène
- c. Les bactéries sulfato-réductrices oxydent les composés réduits (alcools, acides butyrique et propionique) en dioxyde de carbone et acétate, puis l'acétate en dioxyde de carbone. L'hydrogène est également oxydé en présence des sulfates [8].

Tableau I.1 : Réaction d'actetogénèse avec production de d'hydrogène et de formate, et énergie liber associée (d'âpre Hall et al .1992, Boone et al ,1989)

Substrat	Réaction	$\Delta t t^{\circ}(\text{kJ})$
Propionate	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 3\text{H}_2 + 1.2$	+ 76.1
	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 3\text{H}_2 + 3\text{HCOOH}$ 1.3	+ 82
Butyrate	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{CH}_3 \text{COOH} + 2\text{H}_2$ 1.4	+48.1
	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 \rightarrow 2 \text{CH}_3 \text{COOH} + 2\text{H}_2 + 2\text{HCOOH}$ 1.5	+55.2
Ethanol	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2$ 1.6	+ 9,6
Lactate	$\text{CH}_3\text{CHOHCOOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2 + \text{CO}_2$ 1.7	- 4,2

I.2.4. Méthanogénèse

C'est l'étape finale et spécifique de la fermentation méthanique. Elle conduit à l'éduction du carbone en méthane et elle est réalisée par des micro-organismes très spécialisés. Anaérobies stricts. Ils appartiennent à un même groupe d'archaébactéries qui se subdivise en méthanobactériales (Methanobacterium), méthanococcales (Methanococcus) et méthanomicrobiales (Methanomicrobium, Methanosarcina, Methanospirillum). Il existe deux grandes voies de formation du méthane :

- ✓ La voie acétoclastique où l'acide acétique est transformé en méthane



- ✓ La voie hydrogénéophile où c'est le mélange CO₂/H₂ qui est utilisé



Les bactéries méthanogènes, strictement anaérobie, conduisent à la production de méthane à partir d'un mélange de gaz carbonique et d'hydrogène. Ces bactéries réduisent le CO₂ (ou HCO₃) en méthane. Cette voie est génératrice d'énergie et couplée à la synthèse d'ATP. Ce métabolisme peut être considéré, de ce fait, comme un exemple d'autotrophie.

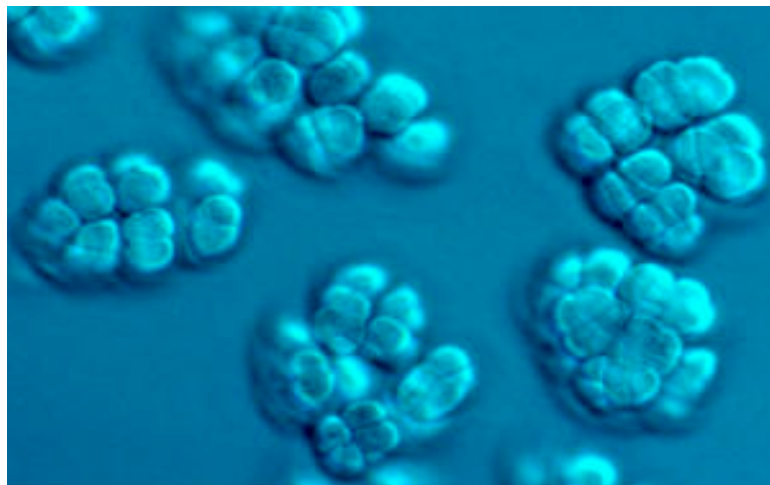


Figure I.2 : Bactérie méthanogénèse

Le passage du CO₂ au CH₄ s'effectue par quatre réductions successives mais peut aussi produire du méthanol ou de l'acide formique (voir figure I.3). Les électrons peuvent provenir de H₂ ou, plus rarement, voire même du fer (FeO). D'autres réactions existent à partir de différents composés comme le méthanol, l'acide formique, la méthylamine ou encore le diméthyl sulfure [9].

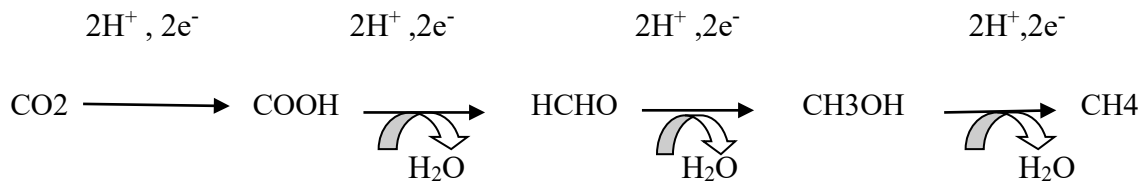


Figure I.3 : Méthanogénèse par réduction de CO_2 .

Les méthanogènes possèdent les caractères communs aux archaebactéries. Les méthanogènes vivent en association avec d'autres anaérobies qui leur fournissent les métabolites. Elles épurent le milieu de l'hydrogène qui serait toxique en s'accumulant pour les acétoclastes. Un exemple de bactéries méthanogènes : *Methanotrix thermophila*, dont la croissance optimale se produit aux alentours de 60°C . Chaque cellule mesure 1 micromètre de diamètre. A l'intérieure des cellules, on observe des vésicules de gaz (voir figure I.2).

I.2.5. Sulfato-réductrice

Les bactéries sulfato-réductrices (BSR) sont capables de puiser leur énergie d'un grand nombre de substrats dont le dihydrogène moléculaire [10]. Elles utilisent comme accepteur final d'électrons les sulfates (SO_4^{-2}), ainsi que les sulfites (SO_3^{-2}) et thiosulfates ($\text{S}_2\text{O}_2^{-3}$) qu'elles réduisent en sulfure (S_2^{-}) par respiration anaérobie. De ce fait, dans des environnements riches en composés soufrés, il peut y avoir compétition entre les bactéries homoacétogènes (BH), les bactéries méthanogènes (BM) et les BSR pour la dégradation de l'acétate et du dihydrogène [11]. Les BSR peuvent elles-mêmes être supplantées par des bactéries nitrato-réductrices (BNR). Dans le cas de substrats à fortes concentrations en nitrates ou en protéines, ces bactéries réduisent les ions nitrates (NO_3^-) en diazote [12].

Tableaux I.2 : Compétition pour l'utilisation du couple H_2 / CO_2 et de l'acétate.

Bactéries	Réactions	
BSRH	$4\text{H}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + 4\text{H}_2\text{O}$	1.4
BSRA	$\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O} + 2 \text{CO}_2$	1.5
BMH	$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	1.6
BH	$2\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH}$	1.7
BMA	$2\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH}$	1.8

I.3. La physicochimie de la digestion anaérobie

I.3.1. Température

La fermentation anaérobie peut se dérouler entre 5 et 65°C. On définit classiquement trois plages de températures autour d'une valeur optimale relative :

- ❖ La zone psychrophile, de 4 à 25°C.
- ❖ La zone mésophile, de 35 à 45°C.
- ❖ La zone thermophile, de 55 à 65°C.

La première zone englobe les fermentations présentes dans les sédiments marins mais également les fosses septiques. La plus largement étudiée est la zone mésophile. L'augmentation de la température entraîne une augmentation des vitesses de dégradation, en particulier de la phase d'hydrolyse, sans influence particulière sur la biodégradabilité ou le rendement en méthane car les voies métaboliques restent les mêmes jusqu'à 65°C. Notons également que le fonctionnement en phase thermophile (>55°C) entraîne inéluctablement une sélection des germes thermotolérants et donc un certain contrôle sur les populations bactériennes. Cependant, la fermentation méthanique étant faiblement exothermique, les conditions de température nécessaires pour un fonctionnement en zone mésophile ou thermophile, doivent être créées par un chauffage externe [13]

I.3.2. Ph et alcalinité

On peut diviser les organismes en trois catégories par leur pH optimal de croissance :

- ❖ Les acidophiles : $1 < \text{PH} < 5,5$.
- ❖ Les neutrophiles $5,5 < \text{PH} < 8$.
- ❖ Les alcalophiles : $8,5 < \text{PH} < 11,5$.

On considère usuellement que la gamme optimale de pH pour la digestion anaérobie se situe entre 6,7 et 7,3 [14]. Un écart du pH de cette gamme est en général le signe d'un mauvais fonctionnement du digesteur, et d'une accumulation d'acides ou de composés alcalins. Un procédé opérant à un pH trop bas (en deçà de pH 4) ou trop élevé (au dessus de pH 9) aura tendance à inhiber l'activité bactérienne [15]. La variation de la croissance bactérienne est liée à un changement d'activité enzymatique avec le pH; le site réactionnel des enzymes comporte souvent des espèces ioniques, et un changement du pH du milieu de croissance modifiera la structure spatiale de l'enzyme ce qui la rendra inefficace [16].

C'est pour cette raison qu'il est conseillé de maintenir le pH d'un digesteur dans la gamme optimale pour la méthanisation.

Certains auteurs ont cependant mis en évidence l'adaptation de populations anaérobies à des pH inférieurs à 5 [17]. Jain et Mattiasson (1998) [18] ont étudié l'adaptation d'une culture de bactéries méthanogènes à des pH aussi bas que 4. Ils ont montré que la production de méthane était fortement ralentie mais pas stoppée, et le rendement méthane restait suffisamment élevé (au minimum 16% de la situation de référence à PH=7) pour envisager de nouvelles perspectives pour le traitement d'effluents très acides comme les effluents de papeteries. Le PH est fortement lié à l'alcalinité que l'on associe au pouvoir tampon, c'est à dire la capacité du milieu à absorber les protons.

Les cations (K^+ , Ca^+ , Na^+ , NH_4^+ ...) Et les anions (Cl^- , PO_4^{-3} , SO_4^{-2} , ...) Proviennent majoritairement des acides forts et des bases fortes, et ils ne sont pas consommés au cours de la dégradation de la matière organique [13].

I.3.3. Les nutriments

Pour leur activité, les micro-organismes ont besoin d'un équilibre entre les différents éléments (C, N, P, S) et les éléments traces intervenant dans les enzymes (métaux, vitamines). Cependant les populations anaérobies, du fait de leur faible production de biomasse, nécessitent moins d'éléments nutritifs que les populations aérobies. Le carbone contenu dans la matière organique est utilisé pour les besoins énergétiques et la synthèse des nouveaux constituants cellulaires.

La consommation en carbone est 15 à 30 fois plus importante que celle de l'azote. On admet généralement que le rapport optimal C/N doit être compris entre 20 et 30 et le rapport C/P entre 100 et 150 [19]. Cependant, il faut mettre en parallèle ces rapports avec la biodégradabilité du substrat. Ainsi, un substrat facilement biodégradable possède un rapport C/N bas tandis que s'il est composé de chaînes carbonées plus difficilement accessibles, son rapport C/N est plus élevé [13].

I.3.4. Composés toxiques ou inhibants de la digestion anaérobie

Les mauvais déroulements de la méthanisation de l'effluent associé aux les composés toxique et inhibiteurs, et le blockage de processus reste un résultat dans certains cas, ce qui peut nécessiter l'arrêt et le redémarrage du digesteur. Ces composés sont soit apportés par l'effluent soit produits au cours d'une des étapes de la méthanogénèse.

Il est assez difficile de les distinguer des facteurs environnementaux (chute du PH, changement de température, accumulation de métabolites,...) Tant ils sont liés. Un excès d'agv sous forme non dissociée accélère leur entrée dans les cellules, ce qui provoque une baisse du ph intra-cellulaire [20]. Dans ces conditions, une partie de l'atp servant habituellement à la croissance, est hydrolysée pour libérer des protons et contre-balancer cet apport supplémentaire d'anions et assurer le maintien de l'homéostasie. En conséquence moins d'atp sera donc disponible pour la croissance bactérienne [21].

La concentration seuil à partir de laquelle les AGV seront inhibiteurs dépend du pouvoir tampon du milieu. En plus d'inhiber la méthanogénèse, le sulfure de dihydrogène (H_2S) dégagé au cours des réactions (1.10) et (1.11) a un effet néfaste sur les organismes ; Boone et Bryant (1980) [22] ont montré que l'ajout d'acide sulfurique avait pour effet d'inhiber la dégradation de propionate dans une coculture de bactéries sulfato-réductrices et de bactéries acétogènes. Hall et al. (1992) [23] signalent que le potentiel d'inhibition des sulfures est fonction du ph, car ils participent au même titre que les AGV et les bicarbonates à l'alcalinité du digesteur, au travers des couples $H_2S/HS^-/S^{2-}$ (pka 7,1 et 13,3). D'autres composés comme l'acide 2-bromoéthane-sulfonique ou le chloroforme inhibent également la méthanogénèse [24]. Ces mêmes auteurs ont montré que l'ajout d'oxygène (O_2) dans le ciel gazeux d'un digesteur dégradant en coculture du butyrate, avait pour effet de stopper la dégradation du butyrate selon l'équation (1.5). l'hydrogène qui doit être maintenu à une pression partielle faible pour permettre l'acétogénèse est souvent considéré comme un composé inhibiteur [25], car sa présence en excès inhibe les réactions d'acétogénèse.

I.4. Utilisation du biogaz

I.4.1. Les caractéristiques du biogaz

Le biogaz produite à partir de la digestion anaérobie et qui est valorisable rester l'un des intérêts de ce processus .Sa composition majeur de méthane (CH_4), de dioxyde de carbone (CO_2), et dans une moindre mesure de sulfure d'hydrogène (H_2S), diazote (N_2), voire de dihydrogène (H_2), de métaux et de composés volatils,....Ce mélange est en règle générale saturé en vapeur d'eau. Les caractéristiques physico-chimiques du biogaz sont proches de celles du gaz naturel, et il peut être valorisé sous diverses formes :

- ❖ énergie thermique seule (chaudière ou groupe frigorifique).
- ❖ énergie de travail seule (moteur à gaz, turbine à vapeur, turbine à gaz et plus récemment pile à combustible).

- ❖ production simultanée d'énergie thermique (chaleur ou froid) et de travail par cogeneration.
- ❖ production simultanée de chaleur, de travail et de froid par trigénération.
- ❖ carburant automobile (après compression et stockage).
- ❖ injection dans le réseau de gaz de ville.
- ❖ le gaz carbonique généré par combustion du biogaz n'est pas considéré comme un contributeur net au volume de gaz carbonique atmosphérique, puisque le biogaz est originellement produit à partir de végétaux qui absorbent le gaz carbonique dans l'atmosphère.
- ❖ Réduction des odeurs des fermes et sites des charges et la revenue socialement acceptable pour les communautés avoisinantes.
- ❖ L'utilisation de ce biogaz comme un source de chaud et garder les forets avec une élimination des corvées pour des femmes et enfant qui vivent dans les compagnes et les zones difficiles.
- ❖ Le biogaz apporte généralement une valeur ajoutée au revenu faible des exploitations agricoles et facilite le passage à une agriculture durable.
- ❖ le biogaz peut être considéré comme une alternative intéressante pour les zones rurales à accès limité ou inexistant aux réseaux urbains d'énergie [26].

I.4.2. Les modes de valorisation

I.4.2.1. Valorisation thermique

En terme de la qualité du biogaz la combustion directe du ce dernier reste la solution la plus faciles pour la production de la chaleur. La production de froid par absorption de chaleur ou par compression est encore marginale bien que les technologies soient performantes et fiables. La récupération directe sur l'arbre d'un moteur ou d'une turbine de l'énergie mécanique nécessaire au fonctionnement du compresseur sera direct lorsque le biogaz sert a alimenter ces machines. Il est aisé d'adapter des chaudières au gaz naturel pour qu'elles puissent fonctionner avec du biogaz. Les modifications à apporter concernent essentiellement le brûleur pour lequel le système d'admission doit être agrandi et la prise d'air diminuée a la fin d'abaisser le rapport air : carburant [27].

Le rendement typique de ces installations est de l'ordre de 90%. Les unités de réfrigération par absorption sont énergétiquement plus intéressantes car elles utilisent directement la chaleur produite et ne nécessitent pas d'apport supplémentaire d'énergie autrement que pour la circulation des fluides du groupe frigorifique [28]. Différentes technologies sont disponibles comme l'absorption eau-bromure de lithium ou eau-ammoniac. Dans une machine à absorption eau-bromure de lithium, la température d'eau glacée est de l'ordre de 7 à 12°C et cette solution ne peut être utilisée qu'en climatisation "confort" et non en production de froid "négatif". Pour des applications de froid industriel le mélange eau-ammoniac est plus adapté car il permet la production de froid négatif [26].

I.4.2.2. Valorisation électrique

I.4.2.2.1. Moteurs à gaz et fioul-gaz

L'utilisation, d'un moteur ou une turbine à gaz entraînent un alternateur avec une alimentation par le biogaz permet de la production de l'électricité. Lorsque les moteurs à gaz fonctionnent par le biogaz doivent être plus faciles à modifier [27]. Les moteurs fioul-gaz fonctionnent avec un mélange de 90% de biogaz et 10% de fioul. Ils offrent des rendements supérieurs aux moteurs à gaz (40% au lieu de 35%) et l'investissement initial est plus faible. En revanche, les moteurs fioul-gaz nécessitent l'achat et le stockage de fioul.

Ces moteurs sont assez bien adaptés aux faibles puissances (quelques kwe) et ils permettent d'utiliser un biogaz ne contenant que 40% de méthane. Plusieurs auteurs ont montré que la performance des moteurs dépendait de la composition du biogaz. Ainsi Porpatham et al. (2007) [29] ont conclu, dans le cas d'un moteur à gaz, que la réduction de la concentration de CO₂ dans le biogaz améliorerait nettement les performances du moteur en termes de puissance et de chaleur produite, et permettrait de réduire le temps d'allumage du carburant.

En parallèle les auteurs observent également une baisse des émissions d'hydrocarbures imbrûlés. Henham et Makkar (1998) [30], ont étudié l'influence de la qualité du biogaz sur les performances d'un moteur fioul-gaz ; leurs travaux montrent que pour un rapport diesel/biogaz fixé, les performances du moteur augmentent avec la teneur en méthane. Les résultats de ces différents auteurs mettent en évidence une faible augmentation des oxydes azotés (nox) avec la teneur en méthane. L'utilisation du biogaz en remplacement du gaz naturel est bénéfique pour l'environnement puisque les émissions de nox seraient réduites.

I.4.2.2.2. Turbines et cycle combiné

La technologie des turbines à gaz (TAG) dérive des réacteurs d’avion ; le biogaz est brûlé dans une chambre de combustion alimentée par de l’air sous pression. Les gaz produits sont introduits dans une turbine où ils entraînent le rotor. L’énergie mécanique produite sert à entraîner le compresseur d’air un générateur électrique. Les turbines à vapeur (TAV) constituent une autre solution. Dans ce cas, le biogaz est brûlé dans une chaudière afin de produire de la vapeur haute pression. La détente de la vapeur dans la turbine assure la production d’énergie mécanique. Les gaz en sortie d’une TAG peuvent être réchauffés pour produire de la vapeur d’eau et alimenter TAV ; on parle alors de cycle combiné. Ces installations permettent d’atteindre des rendements de près de 60%.

Les turbines étaient initialement plutôt destinées aux applications industrielles car elles fournissent de fortes puissances (jusqu’à plusieurs mwe). Cependant pour pouvoir valoriser le gaz des centres d’enfouissement techniques (CET), qui sont particulièrement pauvres en méthane, des microturbines ont été développées pour des puissances de quelques kwe, et elles permettent de valoriser un biogaz contenant au minimum 35% de méthane [31].

Co- et trigénération

La cogénération permet de produire à la fois de l’énergie de travail (électrique ou mécanique), et de l’énergie thermique. Ce système de production d’énergie offre des rendements très élevés, de 80 à 95%. La cogénération permet avant tout de réaliser des économies d’énergie primaire (figure I.4).

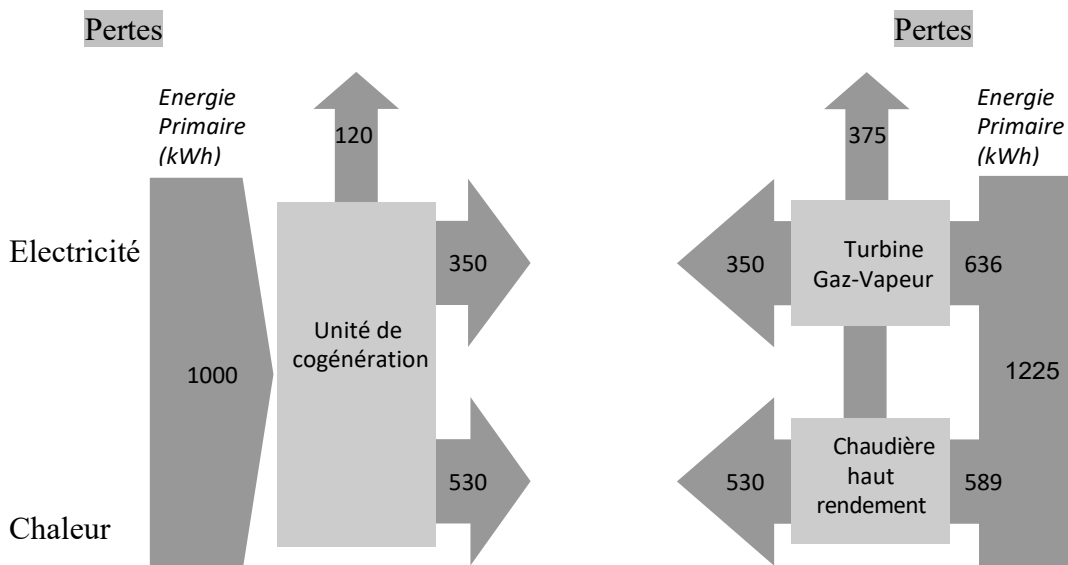


Figure. I.4 : Economie potentielle d’énergie primaire en cogénération

L'énergie mécanique est produite par un moteur (figure I.5 a) ou une turbine (figures I.5 b, c et d), et plutôt que de perdre l'énergie thermique dans une tour de refroidissement, la chaleur est récupérée; elle peut servir par exemple à chauffer des fermenteurs méthanogènes, à sécher des digestats, à produire de l'eau chaude, ou encore à alimenter un système de chauffage ou de climatisation. L'électricité peut être utilisée sur place, ou bien revendue lorsqu'elle est produite en excès. Deux énergies thermiques sont disponibles sur les moteurs (figure I.5 a);

- ❖ Une énergie "basse température" (environ 95°C) récupérée sur les huiles et les eaux de refroidissement.
- ❖ Une énergie "haute température" (environ 450°C) récupérée sur les gaz d'échappement.

Dans le cas des TAG, l'énergie thermique est récupérée sur les gaz d'échappement (environ 500°C). Compte tenu des fortes proportions d'oxygène résiduel dans ces gaz, il est envisageable de réaliser une post-combustion (cycle combiné) et d'atteindre ainsi des températures proches de 900°C [26].

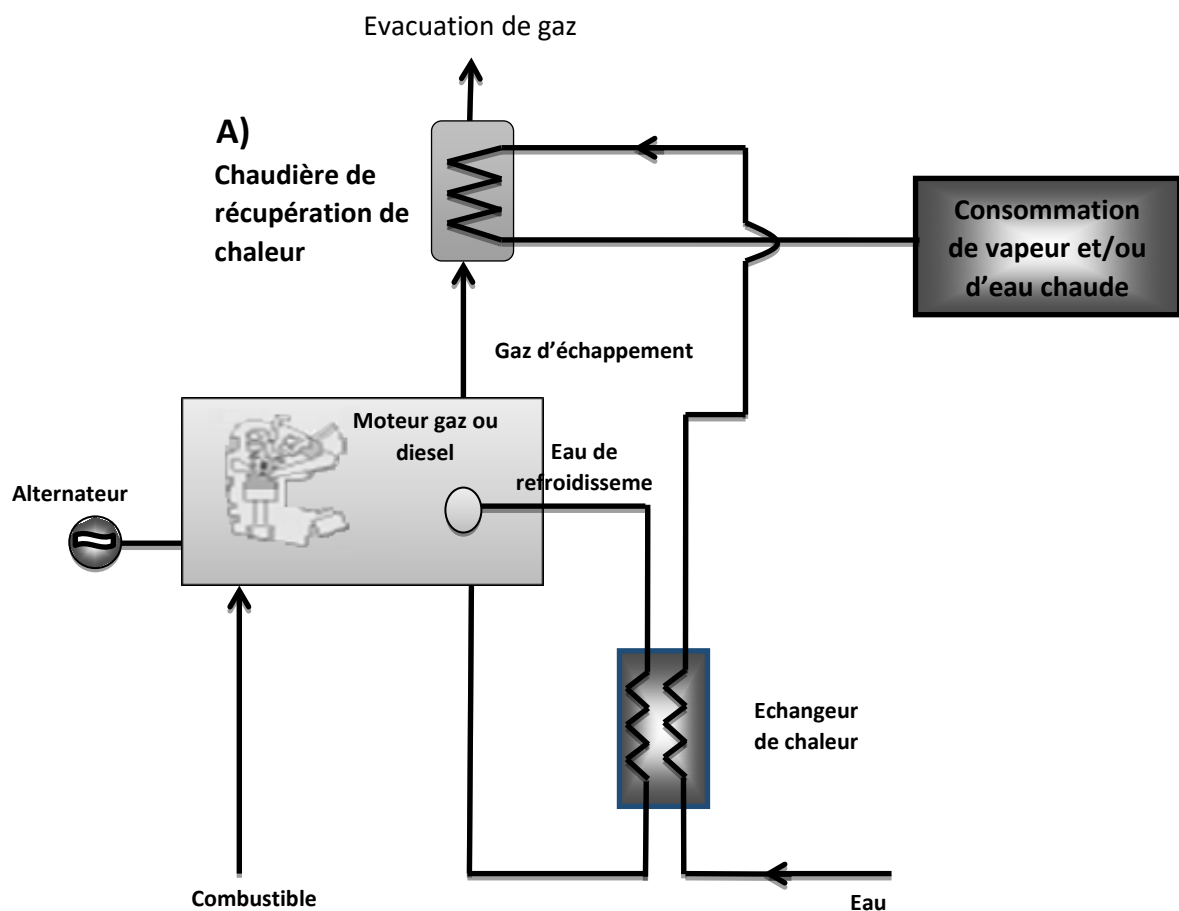


Figure I.5 : Installations en cogénération : a) Moteur alternatif

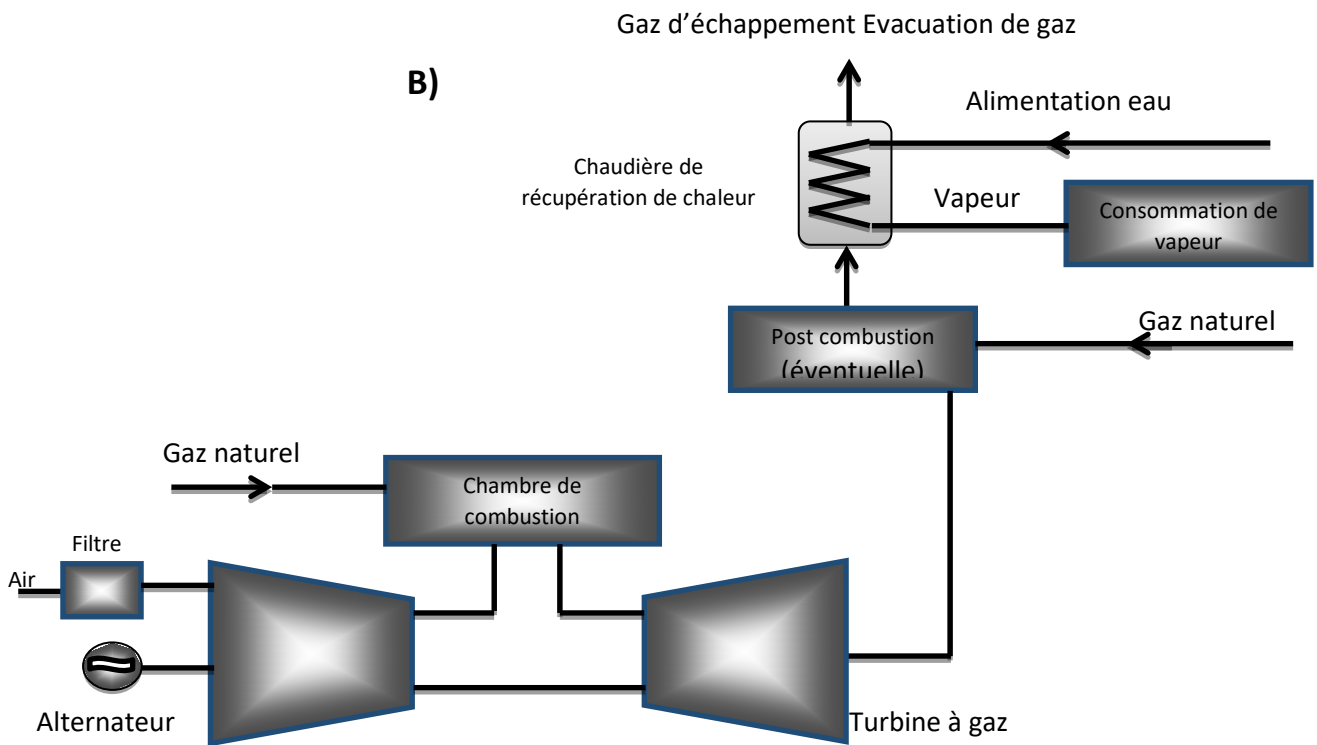


Figure I.6 : Installations en cogénération : b) Turbine à gaz

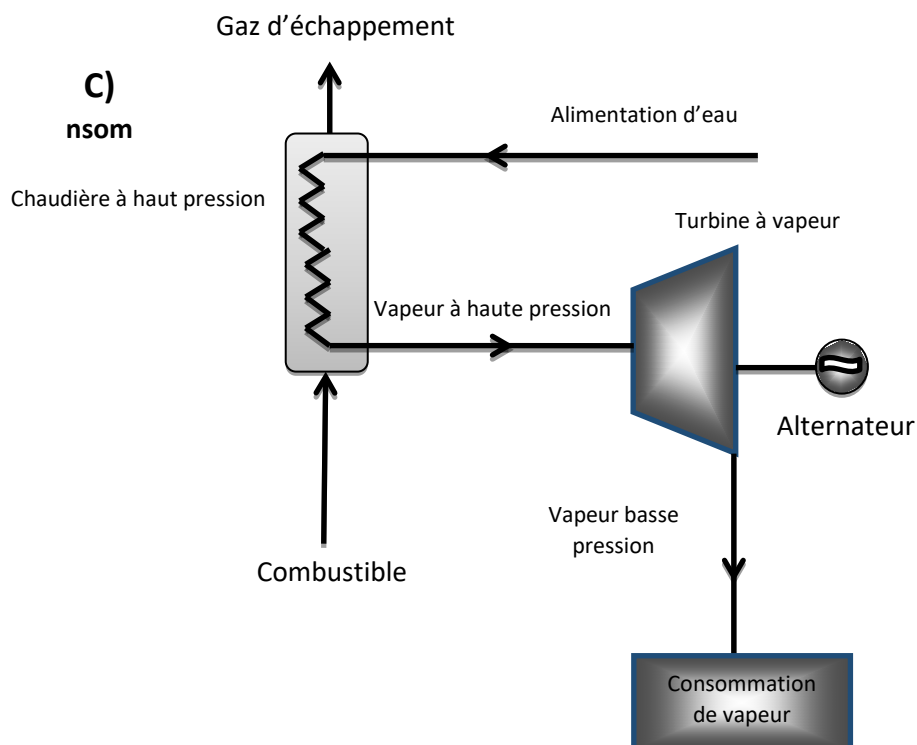


Figure I.7 : Installations en cogénération : c) Turbine à vapeur

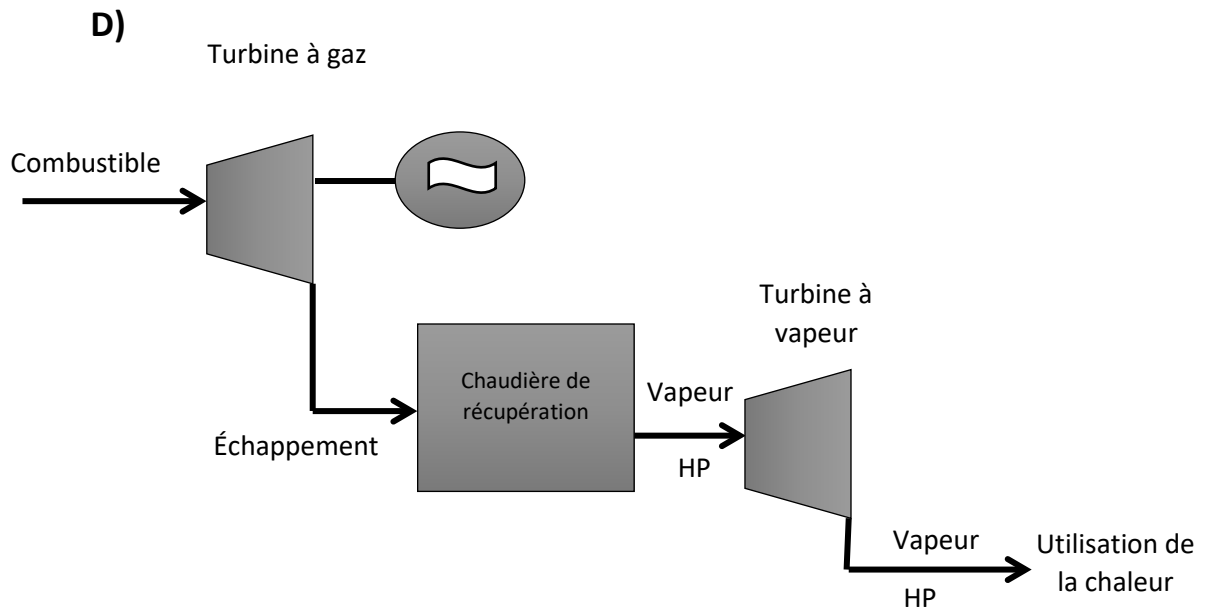


Figure I.8 : Installations en cogénération : d) Cycle-combiné.

L'avantage énergétique des systèmes de cogénération est maximal lorsque le dimensionnement et les régimes de fonctionnement sont pilotés par les besoins thermiques [28]. Dans ce cas l'énergie électrique produite en excès peut être revendue. Cependant, le manque de débouché pour la chaleur en période estivale pénalise la rentabilité des ces installations, si le choix est fait de ne pas les faire fonctionner toute l'année.

Tableaux I.3- Comparatifs des solutions en cogénération

Technologie \ Rendement	Turbine à vapeur	Turbine à gaz	Cycle combine	Moteur à combustion interne
Electrique	10-20%	25-40%	35-50%	35-50%
Thermique	50-65%	35-55%	35-55%	25-50%
Global	60-85%	60-95%	70-90%	60-95%

Les systèmes de trigénération permettent de produire à la fois de l'énergie mécanique, et de l'énergie thermique sous forme de chaleur et de froid. La trigénération saisonnière est une combinaison d'un système de cogénération chaleur-électricité pour l'hiver et froid-électricité pour l'été. Les hôpitaux, bureaux ou aéroports sont des clients pour cette technologie.

La trigénération permet de mieux rentabiliser une installation de cogénération grâce à une durée d'utilisation plus élevée sur l'année [26].

I.4.2.3. Biogaz véhicule et injection dans le réseau

Le biogaz est une alternative aux carburants traditionnels ; il permet de réduire les émissions atmosphériques (20 à 30% de réduction des émissions de CO₂, réduction de l'émissions de particules, ...). L'utilisation de ce carburant est moins répandue chez les particuliers en raison du faible déploiement des stations de remplissage. Ce mode de valorisation est assez exigeant car les caractéristiques du biogaz doivent être similaires à celles du gaz naturel ; il est donc nécessaire d'augmenter les proportions de méthane jusqu'à 97%. Le biogaz devant être comprimé, il est essentiel de réduire sa teneur en vapeur d'eau pour éviter la formation de glace au moment de la compression.

La rentabilité de ce mode de production dépend avant tout de la composition du biogaz brut, et du niveau de purification à lui apporter. Centre de Valorisation de déchets Organiques (CVO) de Lille a inauguré la 1^{ère} site de production de gaz carburant aux bus qui roulent dans la ville. Mentionnons également la Suède qui ambitionne de supprimer totalement d'ici 2030 le pétrole comme carburant, et dans le même temps de porter la part du biogaz véhicule à 20% des carburants utilisés. L'injection du biogaz dans le réseau de gaz de ville est la dernière filière de valorisation. Les contraintes en terme de qualité du biogaz sont dictées par le gestionnaire du réseau. Ces spécifications portent avant tout sur la teneur en méthane, et les composés organohalogénés [26].

I.4.3. Contraintes pour la valorisation du biogaz

La teneur en méthane du biogaz est liée à sa pouvoir calorifique. Quel que soit le mode de valorisations envisagées, les conditions opératoires et la conduite d'un fermenteur méthanogène doivent être choisies de manière à optimiser la quantité d'énergie récupérée au travers du biogaz. L'opérateur s'attachera à optimiser la production de biogaz, en contrôlant ses quantités (débit) et sa qualité (composition) [26].

I.4.4. Amélioration du débit de biogas

Pour améliorer la production de biogaz, en termes de débit, la voie nécessaire est la bonne gestion du procédé. Les solutions technologiques permettant une dégradation plus rapide et plus complète de la matière organique peuvent être classées dans les catégories suivantes :

- ❖ Utilisation d'additifs.
- ❖ Optimisation des conditions opératoires (taux de dilution, température,...).
- ❖ immobilisation de la biomasse, et recirculation des boues [31].

I.4.5. Purification du biogaz

On distingue dans l'étape de purification du biogaz, le traitement qui consiste à éliminer les composés toxiques et corrosifs, de l'épuration qui vise à augmenter les proportions de méthane pour améliorer les propriétés énergétiques du mélange gazeux. En premier lieu il faut éliminer du biogaz brut les composés toxiques ou corrosifs comme le sulfure d'hydrogène, l'eau ou les métaux.

Cette étape est indispensable, tandis que l'augmentation de la teneur en méthane du biogaz dépend du mode de valorisation choisi; le biogaz non traité contient en moyenne 50 à 75% de méthane ce qui est trop peu pour son utilisation comme carburant ou l'injection dans le réseau qui requièrent un minimum de 97% de méthane, mais il peut alimenter des moteurs ou des installations de cogénération. La production d'un biogaz aux caractéristiques proches de celles du gaz naturel requiert nécessairement la combinaison des étapes de traitement et de purification. La purification du biogaz repose majoritairement sur des techniques physico-chimiques ex-situ bien que des méthodes biologiques aient également été proposées [26].

Tableau I.4 : présente un récapitulatif des technologies disponibles pour la purification du biogaz. Ces différentes solutions sont présentées de façon plus détaillées dans les sections suivantes.

Composés à éliminer	Techniques
Eau	Condensation ou cryogénie, absorption sur glycols, tamis moléculaires.
Souffre	Lavage à l'eau sous pression, adsorption sur charbon actif, Ajout de chlorure de fer in-situ, techniques biologiques, micro-aération .
Organohalogénés	Adsorption sur charbon actif.
CO ₂	Lavage à l'eau sous pression, tamis moléculaires. Séparation par membrane, adsorption sur des glycols, micro-algues.

I.4.5.1. Elimination du sulfure de dihydrogène

Le sulfure de dihydrogène présent dans le biogaz provient de la dégradation des protéines et autres composés contenant du soufre. Ce gaz corrosif doit être éliminé du biogaz pour préserver les compresseurs, cuves de stockage et les équipements de valorisation [32]. Une première solution uniquement physique consiste à "laver le biogaz" avec un solvant, c'est à dire à utiliser la solubilité du sulfure de dihydrogène pour le piéger dans une phase liquide. Le lavage peut s'effectuer à l'eau (solution la plus simple) ou bien au polyéthylène glycol, dans lequel la solubilité du H₂S est supérieure.

Le biogaz est pressurisé pour augmenter sa solubilité, puis injecté au bas d'une colonne contenant le solvant, et le biogaz purifié est récupéré au sommet de la colonne. Une fois saturé, le solvant peut être régénéré soit en abaissant la pression, soit en bullant de l'air à l'intérieur [33]. L'ajout de soude à l'eau de lavage permet d'élever la solubilité des gaz, et la soude réagit avec le sulfure de dihydrogène pour former du sulfate de soude ; dans ce cas l'absorption est en partie chimique. Les tamis moléculaires et les membranes sont un autre procédé de purification par voie physique [26].

I.4.5.2. Elimination des composés organohalogénés, métaux lourds et siloxanes

Le biogaz de décharge peut présenter des fortes concentrations en organohalogénés qui peuvent être éliminées efficacement au moyen de charbon actif. Les petites molécules comme le CH₄, CO₂, N₂ et O₂ pourront traverser le filtre à charbon alors que les plus grosses molécules resteront piégées. Le charbon actif permet également de capter les métaux lourds qui peuvent être présent dans le biogaz. Les siloxanes sont une classe de composés organiques de silicium. S'ils sont présents dans le biogaz, ils seront oxydés en silicate au cours de la combustion et pourront endommager les différents composés des machines (brûleurs, valves, ...). Ces composés peuvent être éliminés du biogaz par adsorption dans un milieu liquid [26].

I.4.5.3. Elimination de la vapeur d'eau

La vapeur d'eau est un frein à la valorisation du biogaz à plusieurs niveaux ; elle peut réagir avec le H₂S et former un acide corrosif, mais elle risque également de se condenser, voire de geler si le gaz est compressé pour être stocké [34] et il est indispensable de sécher le biogaz. Ceci peut se faire par condensation en refroidissant les tuyaux véhiculant le biogaz ou encore au moyen d'un dévésiculateur suivi d'un séparateur diphasique.

Si les teneurs en eau doivent être très faibles (par exemple pour l'injection dans le réseau de gaz) il est préférable de s'orienter vers des méthodes comme la cryogénie, l'absorption sur glycols ou encore les tamis moléculaires et les membranes, qui permettent d'abaisser très nettement les concentrations en vapeur d'eau.

I.4.5.4. Élimination du gaz carbonique

Pour être utilisé comme carburant ou injecté dans le réseau de gaz de ville, le biogaz doit contenir plus de 96% de méthane. Pour cela le CO₂ contenu dans le biogaz doit être éliminé. Les techniques de lavage du biogaz évoquées précédemment permettent également d'enlever le CO₂ du biogaz ; compte tenu de la solubilité du CO₂ qui est largement supérieure à celle du méthane, le biogaz peut être bullé au travers d'un bain de solvant pour piéger le CO₂. L'eau, le polyéthylène glycol ou encore l'eau additionnée de soude, sont des solvants usuels [32]. Hayes et al (1990) [35] ont ainsi obtenu, par lavage à l'eau, un biogaz contenant 93% de méthane.

I.4.5.5. Traitement par biomasse autotrophe

Le traitement biogologique du biogaz par l'ajout de biomasse ou diverses méthodes ont été développées pour traiter biologiquement le biogaz, au moyen de biomasse autotrophe [36]. De nombreuses espèces bactériennes (Thiobacillus, Thiobacter,...) sont capables de croître dans des milieux purement inorganiques ; elles puisent alors leur source de carbone dans le CO₂ dissous.

Dans ce cas l'enrichissement du biogaz en méthane est la conséquence de l'appauvrissement de la phase liquide en CO₂ dissous, qui est compensé par la dissolution d'une partie du CO₂ gazeux. Strevett et al. (1995) [37], en utilisant des bactéries méthanogènes chimioautotrophes, ont pu accroître les proportions de méthane de 60 à 96%.

Le traitement par biomasse photosynthétique ou chimioautotrophe est particulièrement intéressant car il permet d'éliminer en même temps le CO₂ et le H₂S. Gadre (1989) a présenté les performances d'un réacteur à lit fixe, traitant un biogaz chargé en H₂S au moyen de bactéries photosynthétiques. Au cours de ces expériences, les bactéries éliminaient jusqu'à 70% du sulfure de dihydrogène initialement contenu dans le biogaz. Les bactéries utilisées peuvent être photosynthétiques ou bien chimioautotrophes. La micro-aération de la phase gazeuse peut être suffisante pour permettre l'élimination du H₂S par les bactéries naturellement présentes dans un digesteur.

I.5. Conclusion

Les techniques anaérobies sont largement utilisées pour le traitement des rejets de l'industrie agroalimentaire où la pollution est essentiellement organique et facilement biodégradable. L'Algérie accuse cependant un sérieux retard dans le développement des digesteurs à la ferme par rapport aux autres pays européens. L'accroissement du nombre d'unités de méthanisation constitue un enjeu majeur du point de vue environnemental (remplacement des carburants fossiles), politique (sécurité des approvisionnements en énergie).

Pour les agriculteurs, les digesteurs à la ferme peuvent offrir un revenu complémentaire grâce à la valorisation du biogaz et du digestat. Les gains financiers potentiels sont liés au pouvoir énergétique du biogaz, et donc à la teneur en méthane.

La stabilité de la composition du biogaz garantit un fonctionnement des installations de valorisation dans leur gamme optimale. Bien que les moteurs de cogénération acceptent des gammes de variation relativement souple pour la teneur en méthane (à partir de 35-40%), une qualité constante permettra non seulement de limiter l'encrassement des installations (moteurs, chaudière), mais surtout une teneur plus élevée en méthane implique plus d'énergie générée par le procédé, et des revenus substantiels. Les savons indiquent que la réduction du %CO₂ s'accompagne d'une augmentation de la puissance et de la température des gaz en sortie du moteur, ce qui signifie qu'à volume égal de biogaz, plus de chaleur pourra être récupérée en cogénération.

Il est également important de rappeler que la substitution du biogaz au gaz naturel comme carburant permet de réduire les émissions de n_{ox}. Comme par ailleurs la perte de puissance n'est significative qu'à partir de 30% de CO₂ dans le biogaz, un biogaz comportant 70-80% de méthane présenterait de nombreux avantages. D'une part il impliquerait un plus faible investissement que pour un biogaz véhicule, mais d'autre part il resterait suffisamment énergétique pour remplacer le gaz naturel dans des moteurs à gaz ou fioul-gaz.

II.1. Introduction

II.1.1. Généralités

Les besoins mondiaux en énergie pendant les crises mondiales le monde s'est orienté vers la production de biocarburants et de biogaz pour produire de l'énergie de la manière facile. Le biogaz est une source d'énergie essentielle, des nombreux chercheurs ont découvert et développé des moyens de produire du biogaz pour une utilisation quotidienne. L'intérêt scientifique pour les gaz produits par la biodégradation de la matière organique, a été la première fois rapporté au seizième siècle par Robert Boyle et Stephen Hooke, qui ont noté qu'un gaz inflammable a été libéré des sédiments des jets et des lacs [38].

Le premier digesteur anaérobie a été construit en 1859 par la colonie de lépreux dans Bombay en Inde. En 1895 la technologie a été développée en Angleterre, tel auquel un réservoir septique a été employé pour produire du gaz à éclairage routier. Par la recherche scientifique la digestion anaérobie a gagné une identification dans les années 30. Cette recherche a mené à la découverte de bactéries anaérobies, ces micro-organismes qui facilitent le processus [39].

Plus de recherche ont été effectuée pour étudier les conditions dans lesquelles les bactéries méthanogènes pouvaient se développer et se reproduire. Ce travail a été développé pendant La deuxième guerre mondiale en Allemagne et en France dans les fermes où ils appliquaient la digestion anaérobie des déchets du bétail pour la production de l'engrais. Après la crise du pétrole de 1973, le monde s'est orienté vers la production de biocarburants et de biogaz pour pallier la dépendance en énergie conventionnelle et qui sont le pétrole et le gaz naturel. Ce chapitre décrit les avantages et limites de la digestion anaérobie et comment choisir un digesteur et différents types des bioréacteurs.

II.2. Avantages et limites de la digestion anaérobie

La digestion anaérobie, aussi appelée biométhanisation, est un processus biologique naturel de décomposition de la matière organique par des microorganismes (bactéries) qui s'activent dans des conditions anaérobiques, c'est-à-dire sans oxygène, qui transforme les matières organiques en méthane (CH_4), en gaz carbonique (CO_2) et en un résidu solide.

La digestion anaérobie considéré comme constitue un moyen efficace pour traiter des eaux usées, des boues de stations d'épuration, des rejets de l'industrie agro-alimentaire, ou encore des déjections animales. Mais il n'y a pas un procédé unique et idéal pour la mise en valeur des matières organiques.

Les diverses technologies de la digestion anaérobie présente de nombreux avantages et des inconvénients. Les avantages de la digestion anaérobie sont [40]:

- ❖ Le biogaz remplace les sources d'énergie fossiles et le digestat améliore la qualité des sols.
- ❖ La production locale d'une source énergétique comme le biogaz réduira la dépendance des combustibles fossiles importés.
- ❖ Géométrie et équipements les plus simples possibles.
- ❖ Bonne efficacité d'élimination des polluants.
- ❖ Consommation faible en énergie.
- ❖ Réutilisation de l'eau et valorisation des déchets.
- ❖ bonne efficacité obtenue dans la dépollution à débits élevés.
- ❖ Adaptation aux faibles températures.
- ❖ Simplicité et flexibilité du système.
- ❖ Faible besoin d'espace.
- ❖ Faible consommation d'énergie, contrairement aux procédés aérobies, il ne faut pas transférer de l'oxygène au milieu, action qui consomme beaucoup d'énergie.
- ❖ Faible production de boues la fermentation méthanogène produit en quantité 5 à 10 fois moins de biomasse que les procédés à boues activées.
- ❖ Besoin de peu d'éléments nutritifs ou de produits chimiques pour le fonctionnement.
- ❖ Adaptation des bactéries pour la destruction de nombreux produits toxiques.

La possibilité de traiter des charges organiques élevées : de 2 à plus de 80 kg de DCO par mètre cube de réacteur et par jour avec des taux d'épuration de 80 à 98% valorisation énergétique, le biogaz produit peut servir de carburant. Un intérêt agronomique, lié à une concentration importante en azote ammoniacal (NH_4^+ et en phosphates (PO_4^{3-}) due à la lyse de la matière organique. Cependant la méthanisation des déchets présente également certains inconvénients en comparaison aux procédés à boues activées :

- ❖ La faible vitesse de croissance des bactéries anaérobies impose une cinétique d'épuration lente.
- ❖ Les populations bactériennes mises en jeu sont sensibles aux surcharges organiques et aux composés toxiques.
- ❖ Une réputation d'instabilité liée à la sensibilité de la dynamique de croissance des bactéries.
- ❖ Longue période de démarrage.

- ❖ Mauvaises odeurs.
- ❖ Nécessité d'un post traitement pour les éléments nutritifs et les cellules pathogènes.
- ❖ Des coûts d'investissement importants.

Le traitement par digestion anaérobie est souvent insuffisant pour rejeter directement les effluents dans le milieu naturel : un post-traitement aérobie de finition est nécessaire pour achever l'élimination du carbone et éventuellement de l'azote et du phosphore [41].

II.3. Choix d'un digesteur

Le problème des déchets organiques était un gros problème pour le monde. Au même temps le monde était intéressé par les problèmes environnementaux et la course à la production d'énergie de toutes sortes en particulier les énergies renouvelables, de sorte que les déchets organiques étaient liés aux gaz à effet de serre. Donc il y a eu plusieurs tentatives à différentes périodes pour éliminer le problème des déchets organique et le problème énergétique. Les chercheurs ont découvert donc une méthode efficace qui relie l'énergie et le traitement des déchets organique, la technologie appelée la digestion anaérobie qui est dépend d'un outil appelé digesteur. Il faut respecter plusieurs conditions qui déterminent le choix d'une technique de digestion anaérobie afin de produire du biogaz (CH_4 , CO_2 et H_2S). *Moletta et Torrijos. (1999)* ont schématiquement parlé de quatre générations de procédés qui sont apparues successivement.

Nous pouvons les énumérer dans l'ordre d'apparition et de complexité :

- ❖ **Première génération** : réacteurs à boues libres ou « contact ».
- ❖ **Deuxième génération** : réacteurs uasb ou à boues granuleuses.
- ❖ **Troisième génération** : réacteurs à boues immobilisées ou « fixées ».
- ❖ **Quatrième génération** : réacteurs à lits fluidisés.

Des techniques dérivées ou combinées sont apparues comme par exemple les lagunes aérobies (boues libres en réacteurs extensifs sans clarification finale), les réacteurs hybrides (combinaison de boues immobilisées et de boues libres dans un même réacteur), les réacteurs EGSB (expanded granular sludge bed), les réacteurs à circulation interne IC (internal circulation reactor). Compte tenu du marché actuel, certaines technologies dépassées techniquement ne sont plus appliquées à l'exception de cas particuliers. Généralement la température et la nature des déchets qui changent d'une région à l'autre, et la valeur de la production de biogaz et le danger de la technologie, elles sont les facteurs qui déterminent le choix du digesteur.

II.3.1. Mode d'alimentation des réacteurs de fermentation

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la technologie de traitement des déchets organiques nécessite un réacteur de digestion qui garantit les conditions d'une réaction biochimique qui permet la dégradation de la matière organique par une bactérie anaérobie. Il existe deux types de réacteurs en termes de méthode d'alimentation, réacteur continu et réacteur discontinu aussi le fermenteur semi-continu.

1. Fermentation discontinu non alimenté ou Batch :

Le réacteur ne possède ni entrée ni sortie et le volume est constant. Une fois la digestion effectuée, le digesteur est vidé et un nouveau cycle peut commencer. Un digesteur de type discontinu est un digesteur simple dans lequel la matière organique est placée dans un réservoir fermé et peut être digérée de manière aérobie sur une période de deux à six mois selon la matière première et autres des paramètres tels que la température, etc. Il est habituel de chauffer et de maintenir le digesteur à la température souhaitée. Ce type de digesteur est très simple à utiliser et il faut y prêter très peu d'attention entre le démarrage et le vidage.

Une efficacité maximale de la digestion peut être obtenue si le digesteur est chargé avec soin pour éviter le gaspillage d'espace et de poches d'air emprisonnés dans les boues, car ceux-ci inhibent le début de la méthanogenèse.

Cette technique a l'avantage d'être simple et robuste ; lorsque l'objectif est la production de biomasse, la biomasse initiale est choisie faible. Le temps-mort nécessaire à l'initiation de la réaction après la vidange et le remplissage de la cuve, est un inconvénient de ce type de procédé.

2. Fermentation avec alimentation continues (Fermentation continue) :

Les caractéristiques de la fermentation continue sont de faire un cycle de chargement et de retrait continus. La cuve est alimentée avec un débit constant et le digestat est évacué par une action mécanique afin de stabiliser la production de gaz. la fermentation continue est idéale pour les installations de grandes tailles. Les réacteurs utilisés peuvent être disposés aussi bien verticalement qu'horizontalement, et il existe également des procédés multi-cuves.

3. Le fermenteur semi-continue appelé aussi fed-batch :

C'est une technologie qui combine les avantages de la technologie (Fermentation continue) et de la technologie Fermentation. On peut dire que le mode d'alimentation le réacteur de fermentation semi-continue est alimenté soit par intermittence soit en continu, le mode d'alimentation est lié à la croissance cellulaire et à la formation du produit c-à-d la cuve est remplie progressivement en fonction de

l'avancement de la réaction pour éviter une surcharge organique et garantir des conditions de croissance optimales. A la fin de la digestion une phase de décantation permet de séparer la phase liquide de la biomasse en suspension. Une partie du surnageant (de l'ordre de 10%) est évacué au cours de l'étape de vidange.

II.3.2. Les types de bioréacteurs

Les procédés de biotransformation occupent une place de plus en plus importante à l'intérieur de traitement des déchets agricoles et traiter déversées des eaux usées, des boues, et des composés organiques supplémentaires s. l'outil approuvée c'est le digesteur, Il existe différentes types de digesteurs permettant de faciliter la digestion et chacun d'eux a des caractéristiques distincte.

II.3.3. Solution technologies pour les bioréacteurs continus

II.3.3.1. Les digesteurs à cellule libre

C'est la première technologie disponible. Ces type de réacteurs continus (fermenteurs continus) sont pas compliqué. qui consiste en la mise en œuvre d'une biomasse libre dans un réacteur infiniment mélangé s'apparentant à la technologie aérobie des boues activées.

On trouve les réacteurs infiniment mélangés, appelé également CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor), dans lesquels un brassage continu assure l'homogénéité du milieu, ce qui favorise le contact entre la biomasse et le substrat. ont l'inconvénient de mettre en jeu de faibles concentrations de boues (8 à 12 kg (MS).m⁻³ de réacteur (MS : matière sèche)) ... (Boulenger et Gallouin, 2009) (Figure II.1).

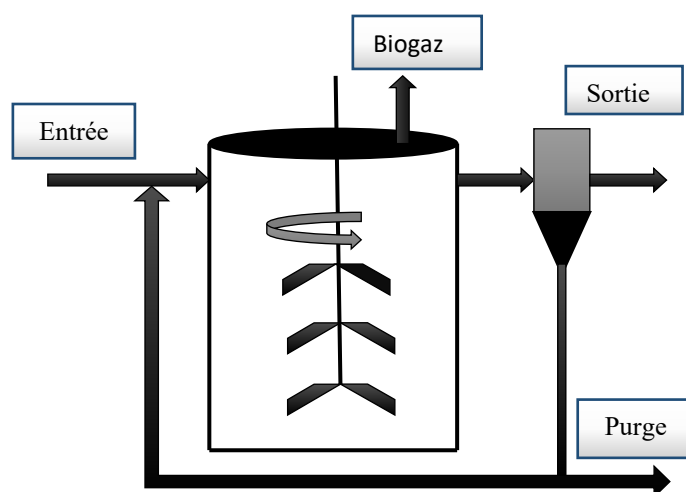


Figure II.1 Réacteurs à boues libres équipés d'un système de rétention de biomasse (Michaud, 2001)

II.3.3.1.1. Digesteurs infiniment mélangés

C'est l'un des types de fermenteurs continus. Cette technologie développée à partir de la technologie de réacteurs à cellule libre, le réacteur agité appelé procédé CSTR (contact stirred tank reactor), ont l'inconvénient de mettre en jeu de faibles concentrations de boues (8 à 12 kg MS.m⁻³ de réacteur (MS : matière sèche). Dans le procédé CSTR le digesteur peut être assuré mécaniquement par un système de pâles, ou bien en recirculant le contenu du digesteur. Une dernière solution consiste à réinjecter le biogaz au bas du réacteur (voir figure. Un décanteur externe est placé au niveau de la sortie liquide. Les solides retenus dans le décanteur sont recyclés dans le réacteur. Ce qui permet de concentrer la biomasse dans le milieu réactionnel.

Ce système a permis d'améliorer les capacités d'épuration avec la possibilité d'atteindre des charges organiques de 3 à 5 kg DCO, m⁻³.j⁻¹, contre 0,1 à 2 kg DCO. m⁻³.j⁻¹. Le temps de séjour hydraulique est de l'ordre de la semaine. Il est particulièrement adapté au traitement de rejets contenant des particules solides difficiles à dégrader, qui sont recyclées dans le réacteur en même temps que la biomasse.

Les limitations de ce procédé proviennent de la non maîtrise de la décantation ou de la floculation des boues dans certaines conditions, ainsi que des conditions de mélange adéquat difficiles à obtenir sur des volumes très importants qui pourraient alourdir non seulement le fonctionnement de l'installation mais également les coûts d'investissement.

II.3.3.1.2. Digesteurs à contact

Dans ce type de digesteur, la quantité de biomasse dans le fermenteur permet d'améliorer la Performance de la technologie, car en augmentant la quantité de biomasse, elle augmente le débit et sortant ou de réduire le volume de la cuve. Des technologies ont été développées pour découpler le temps de séjour hydraulique de celui des solides et favoriser l'accumulation de biomasse. La solution la plus simple consiste à placer en sortie du digesteur un système pour séparer la biomasse de l'effluent, et à recirculer la biomasse concentrée. La récupération de la matière particulaire du digestat peut se faire à l'aide d'un décanteur ou bien grâce à une membrane. L'ajout de coagulants dans le décanteur peut faciliter la formation d'agrégats ou de floes.

II.3.3.2. Les digesteurs à biofilm et à granules

Dans les réacteurs mettant en œuvre la digestion anaérobie on trouve deux sortes de biofilms (est un groupe de microorganismes inclus dans une matrice de polymères biologiques ceux qui sont formés sur un support minéral ou organique, et les granules) (Figure II.2).

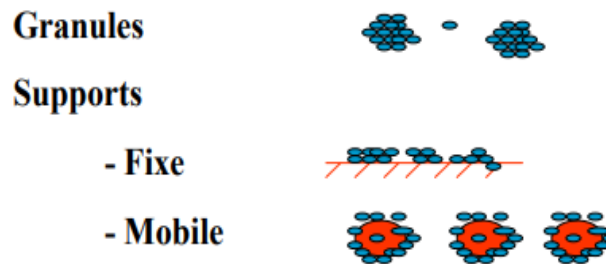


Figure II.2 : Stratégies d'utilisation des biofilms.

Les micro-organismes ont la caractéristique de former spontanément, sous certaines conditions, des granules. C'est un mélange de micro-organismes qui s'agglomèrent pour former une bille de quelques dizaines de microns à plusieurs millimètres de diamètre. Ils créent donc un " film biologique " qui présente des caractéristiques de sédimentation supérieures aux cellules libres et aux floccs microbiens. L'aptitude des micro-organismes à se fixer naturellement sur un support a été utilisée pour les maintenir à l'intérieur des réacteurs, permettant ainsi d'augmenter la quantité de biomasse active (Figure II.3).

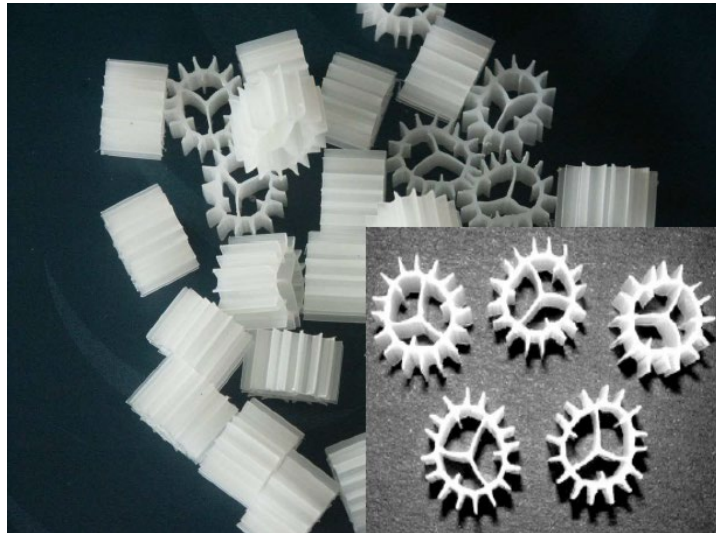


Figure II.3 : Exemple de garnissage utilisable comme support fixe de micro-organismes.

Les microorganismes peuvent également se développer sur un support mobile ou fixe. Les supports utilisés peuvent être fixes ou bien mobiles. Ces systèmes de rétention permettent donc aussi de séparer le temps de séjour du liquide de celui des solides. On obtient ainsi des digesteurs avec des concentrations en biomasse élevée, avec des performances donc meilleures.

II.3.3.2.1. Réacteurs à lit fixe

Le réacteur à lit fixe est également appelé réacteur à biofilm anaérobie ou filtre anaérobie ce type de digesteur été développés vers la fin des années soixante sur la base des filtres aérobies. Ce bioréacteur est dit à « lit fixe » car les bactéries sont agglutinées en un biofilm sur des supports prévus à cet effet voir la (Figure II.4). Il existe différents types de bioréacteur à lit fixe (lit mobile, Fixé aéré submergé, lit rotatif).

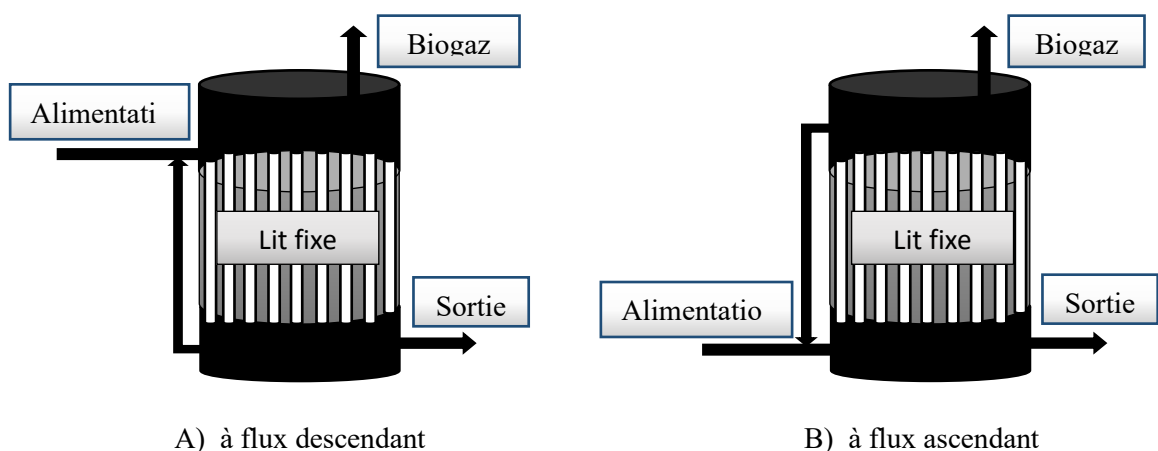


Figure II.4 : Schéma d'un digesteur à lit fixe

Le flux de la solution entrante peut être ascendant, ou descendant ou bien à lit mobile, à ère submerger, rotatif. La (Figure II.5) illustre un bioréacteur à lit fixe ascendant et à lit flux ascendant. Ce procédé trouve dans le traitement des eaux usées et dans le domaine agro-alimentaire. Le réacteur est rempli d'un support inerte de nature variée (roche, verre, plastique, polister...) sur lequel la biomasse peut se développer. L'alimentation se fait aussi bien par flux ascendant que descendant et l'effluent à traiter passe au travers du "filtre" formé par le support et la biomasse qu'il contient. Une grande partie de la biomasse présente est en réalité coincée entre les interstices du support plus que réellement attachée.



Figure II.5 : Biofilm

II.4. Conclusion

La digestion anaérobie est un processus biochimique qui protège l'environnement et aide à produire de l'énergie. Chaque région peut adopter une technologie compatible avec la nature des déchets et la température et d'autres facteurs. Ces processus évoluent de plus en plus pour éliminer le malheur. Nous avons donné Dans ce chapitre un aperçu sur Les procédés de digestion anaérobie et avons rappelé les avantages et inconvénients de la digestion anaérobie, par la suite nous avons présenté conditions qui déterminent le choix d'une technique de digestion anaérobie c.-à-d. choix d'un digesteur, Et finis par citer les différents type de bioréacteur anaérobie, leurs intérêts et leurs fonctionnement. Dans le chapitre 3, nous allons donnerons des detail sur le dispositif expérimental, et nous allons présenter le réacteur pilote, par la suite nous allons donnerons des mesures qui obtenues pendant la digestion, Et finit le chapitre 3 par l'analyse de la phase gazeuse.

III.1. Introduction

Pour une digestion anaérobie optimale et efficace les matériels et les méthodes sont les clés nécessaires. Il faut être bien précis dans ce chapitre on va parler sur les matériels et la méthode à partir de traiter le dispositif expérimental, le support de biomasse, l'instrumentation et le suivi du digesteur par des mesures, le dosage de la demande chimique en oxygène et des acides gras volatils avec les analyses de la phase gazeuse et se termine par une conclusion.

III.2. Dispositif expérimentale

L'expérience de digestion anaérobie a été effectuée dans le laboratoire du département de sciences de la matière de l'université LARBI Tebessi-Tébessa. On a mis en place les moyens disponibles pour effectuer cette étude par la réalisation de deux digesteurs à différentes échelles. Le premier est un digesteur pilote de volume 1000 ml et l'autre est un bioréacteur à lit fixe de 45 Litres.

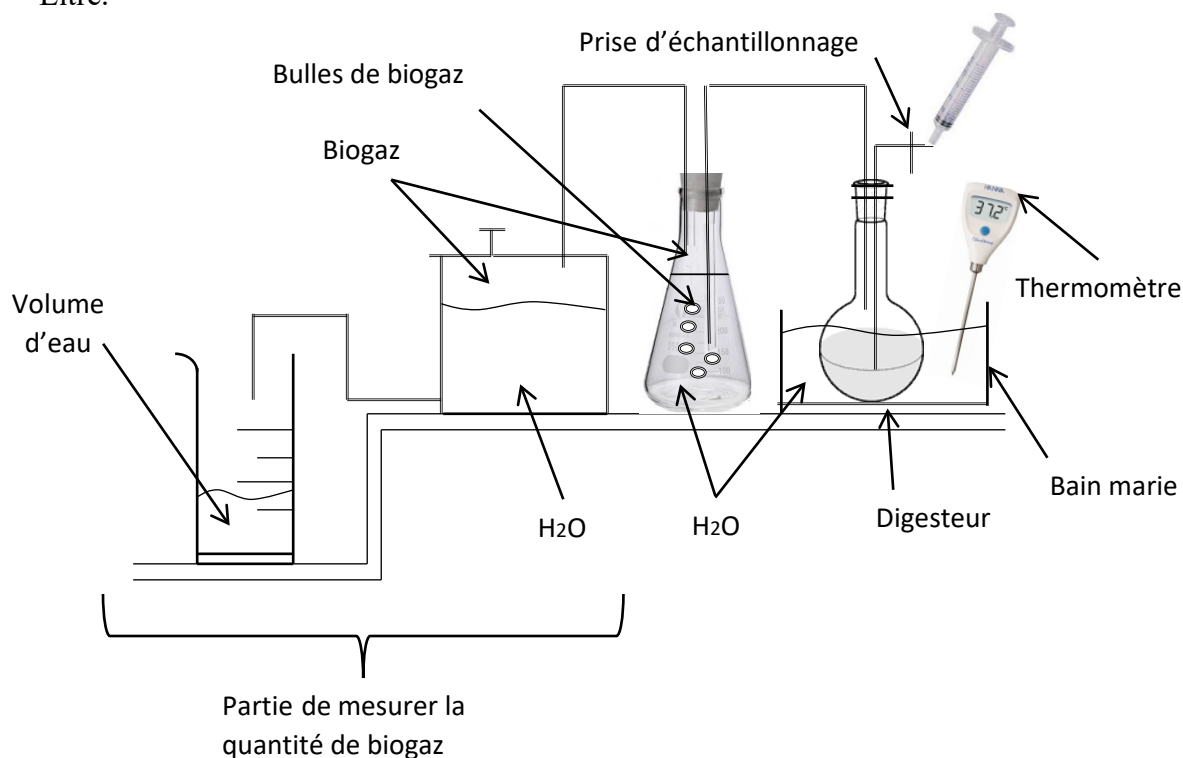


Figure III.1 : Exprime le dispositif expérimental

III.2.1. Le bioréacteur :

Le bioréacteur réalisé est un digesteur anaérobie à lit fixe alimenté en mode discontinue de taille 90x50 cm. offrant ainsi un volume utile de l'ordre 35 L.

Le bioréacteur est instrumenté par un lit fixe composé par des tubes en PVC de 45 cm d'hauteur et de 30 et 40 millimètres de diamètre est placé par une façon remplaçante sur le

diamètre de bioréacteur. On perse quatre trous dans le toit (le bouchant) de bioréacteur chaque trou est réalisé spécialement pour :

- ❖ La sonde de thermomètre.
- ❖ La sonde de ph mètre.
- ❖ La sortie du biogaz.
- ❖ L'injection du NaOH.

Le bouchant de réacteur pilote et bien jointé pour assurer l'étanchéité aussi les trois trous doit être bien jointés pour un bon isolement. La sortie du biogaz relie par un tuyau qui entré dans le système de filtration qui compose par une fiole qui contienne un mélange de l'eau et bicarbonate pour un objet d'absorbé le dioxyde de carbone de H_2S et laisse que le méthane ce dernier est contenue sans chemin soit une partie retourne au bioréacteur et l'autre au ballon du stockage.

Le digesteur est plongé dans un bain de marie instrumenté par un thermostat avec thermocouple pour permet la fixation de la température au niveau de $37^{\circ}C$.

La figure suivante exprime le réacteur pilote réalisé

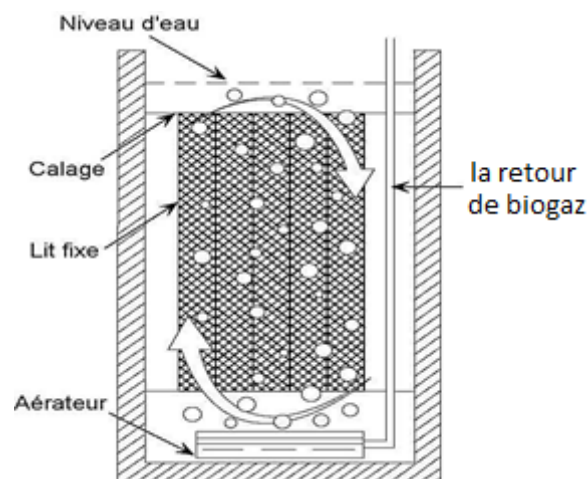


Figure III.2 : Digesteur anaérobie à lit fixe

Dans le protocole expérimental pour la réalisation local de la digestion anaérobie on a choisi de travailler sur le digesteur de type a lit fix et on a utilisé les matériels suivants :

1. Digesteur a lit fix 60 L
2. Fiole a vide système de filtration
3. 10 mètres de tube Pvc de diamètre 30 et 40

4. Bain marie pour réaliser le milieu nécessaire de dégradation
5. NaOH
6. Para film pistole et téflon et silicone pour le blocage de fuites
7. Thermomètre
8. 30 Kg de déchets agricole
9. Ballon pour stocker les échantillons du gaz produit
10. Plaque chauffante
11. Des tubes pour accorder le système de filtration et le digestat et le stock

❖ **Dispositif expérimental :**



Fig III.3 : le réacteur durant la préparation et le remplissage par les PVC.



Fig III.4 : le digesteur durant son remplissage par le déchet agricole dilué.

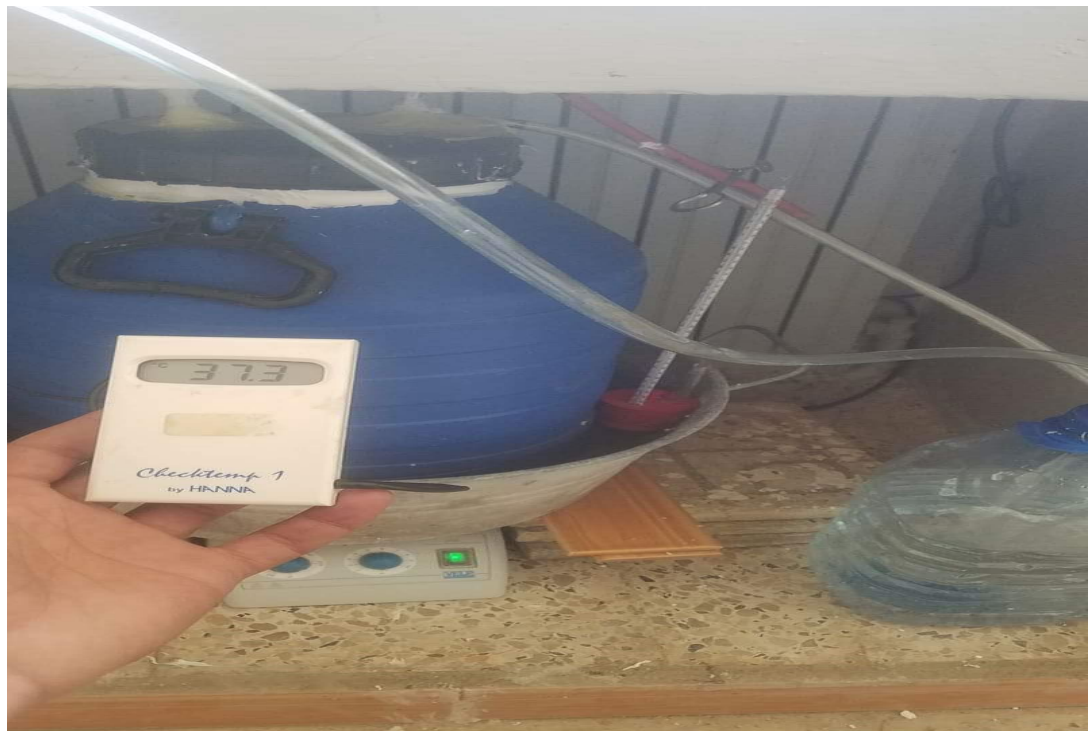


Fig III.5 : le dispositif expérimental réalisé dans laboratoire.

III.2.2. Support de Biomasse

Le support utilisé est un garnissage ordonné fait de tube pvc de 30 et 40 mm de diamètre et 45 centimètres de longueur cette façon offre une bonne surface spécifique de fixation et agrégation de la bactérie et reste difficilement colmatable à comptetentu de la distance entre les parois 3 cm. Le volume calculé pour le digesteur spécifiquement est égal à 35 l ; le support offrant donc une surface de l'ordre $S = 1.596 \text{ m}^2$ pour 14 pièce pvc 30mm et 18 pièce pvc 40mm La figure suivante expriment le support de biomasse.



Figure III.6: le support de biomasse

III.2.3 Suivi du digesteur par des mesures :

Dans notre travail (digesteur a lit fixe) avec alimentation discontinue le point de prélèvement de l'échantillonne se situe en bas de la cuve a la forme d'une vanne, pour faire les analyses par exemple contrôlée le PH de digesteur, ceci afin de garantir une valeur de PH fixe 6.5. Le prélèvement de gaz s'effectue en sortie du ballon du stockage qui est situé après la bouteille filtration pour analyser le gaz issu de la digestion. L'ajout de soude ou de bicarbonate de sodium est effectué à travers un trou spécial dans la partie supérieure du bioréacteur pour assurer une valeur optimale du PH du milieu. L'ajout de soude assure la continuité de la digestion sans exposer les bactéries anaérobies aux effets de l'arrêt de la production de gaz.

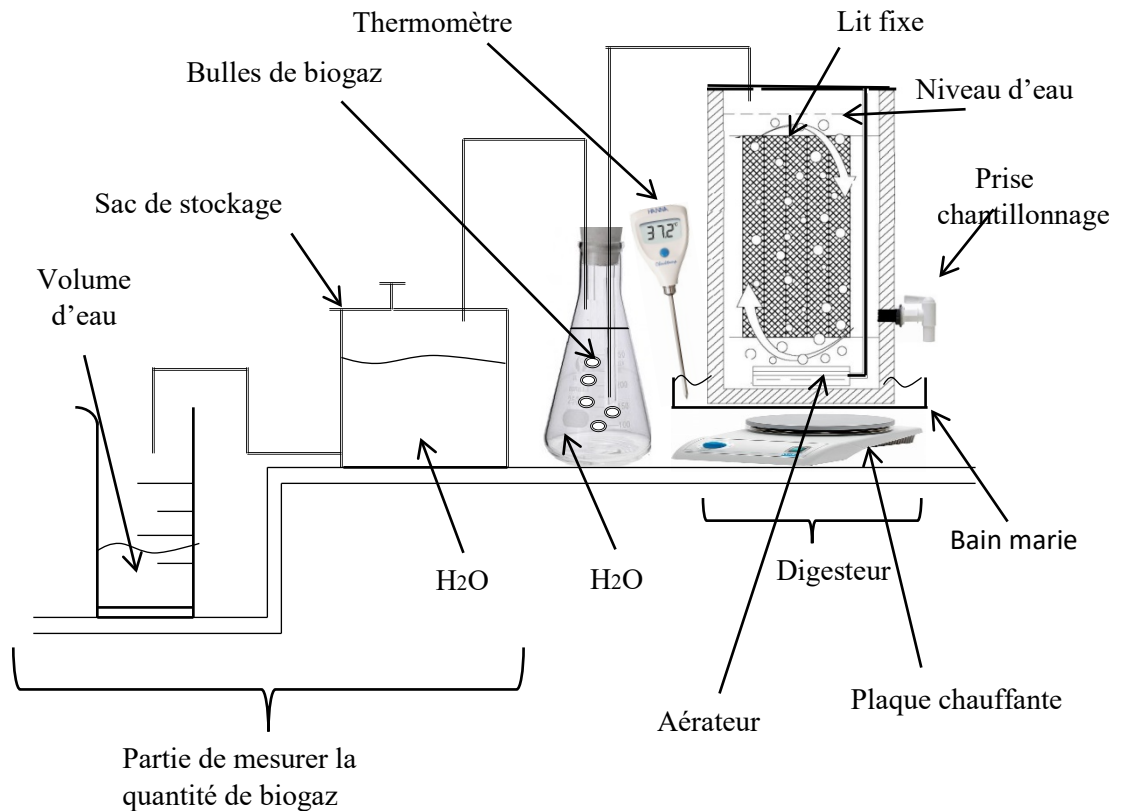


Figure III.7 : Dispositif expérimental digesteur à lit fixe

III.3 Description des substrats

Les échantillons nécessaires aux différentes expérimentations sont des déchets organiques ménagers. Le même lot a été utilisé au cours des expériences, il a été conservé à température ambiante dans un récipient fermé. Les déchets d'origine agricoles et stockés dans une cuve de stockage ; avant chaque prélèvement, un broyage du solide au moyen d'un broyeur est réalisé. Les travaux de mémoire fait référence à un mélange eau et déchets organique ajoutée dans un bioréacteur pour réaliser la digestion anaérobie, le mélange est échantillonné à la fin de déterminer l'acidité

III.3.1 Caractérisation physico-chimique

Selon les expérimentations mis œuvre lors de ces travaux, une caractérisation des échantillons liquides ou solides a été accomplie en fonction des besoins. Les différentes caractérisations sont reprises dans les points ci-dessous. Tous les protocoles sont détaillés.

III.3.1.1 Matière sèche (MS) et matière organique (MO)

La détermination de la teneur en matière sèche et de la teneur en matière organique a été réalisée par séchage des échantillons à 105 °C pendant 12 h et à 550 °C pendant 4 h respectivement selon les protocoles standards. [42].

III.3.1.1.1 Les protocoles

Les analyses sont effectuées en duplicata et les résultats sont exprimés en pourcentage pour la MS et en pourcentage par rapport à la MS pour la MO.

a. Principe

La matière brute (MB) d'un échantillon est constituée d'eau, de matière sèche (MS) composée elle-même de matière organique (MO) et de matière minérale (MN). Les teneurs en matières sèches et organiques sont déterminées par différence de masse après passage à différentes températures. L'évaporation de l'eau en plaçant les échantillons à 105 °C pendant 12 h correspond à la détermination de la teneur en matière sèche.

L'incinération de ces échantillons à 550 °C pendant 2 h permet d'obtenir un résidu de matière minérale. Grâce aux pesées, la teneur en matière organique peut être calculée. Les résultats sont exprimés en pourcentage et en pourcentage de MS pour la MO.

b. Matériel

- ❖ Étuve à 105 °C
- ❖ Four à moufle à 550 °C
- ❖ Balance de précision +/- 0,001 g
- ❖ Creuset en porcelaine
- ❖ Barquette en aluminium
- ❖ Dessiccateur
- ❖ Spatule

c. Mode opératoire

❖ Préparation des creusets

Les creusets sont préalablement séchés dans une étuve à 105 °C pendant 12 h puis placés dans un dessiccateur jusqu'à utilisation.

❖ Préparation des échantillons

On fait broyer les déchets organiques

❖ Pesées et séchage de l'échantillon

- ❖ Prendre et annoter une barquette en aluminium séchée au préalable et placée dans le dessiccateur
- ❖ Peser à vide cette barquette et faire la tare sur la balance
- ❖ Noter la masse, m_0 , de cette barquette
- ❖ Mettre dans cette barquette environ 250 g d'échantillon, bien homogénéisé au préalable. Noter la masse d'échantillon introduite, m_1
- ❖ Placer la barquette remplie dans l'étuve à 105 °C pendant 12 h
- ❖ Sortir la barquette de l'étuve et la placer dans le dessiccateur
- ❖ Attendre le refroidissement jusqu'à température ambiante
- ❖ Peser la barquette et noter la masse, m_2
- ❖ Prendre un creuset au préalable séché et refroidi dans un dessiccateur
- ❖ Peser et tarer le creuset sur la balance de précision. Noter sa masse, m_3
- ❖ Introduire dans ce creuset l'échantillon séché à 105 °C et coupé grossièrement au préalable au moyen de ciseaux. Noter la masse d'échantillon introduite, m_4
- ❖ Placer le creuset dans le four à moufle sans préchauffage
- ❖ Allumer l'extraction au-dessus du four à moufle
- ❖ Allumer l'appareil et laisser 2 h à 550 °C
- ❖ Éteindre le chauffage et laisser refroidir porte ouverte jusqu'à une température inférieure à 150 °C
- ❖ Placer les creusets dans le dessiccateur en notant bien l'ordre de l'emplacement dans le four à moufle et le placement dans le dessiccateur
- ❖ Peser les creusets et noter le poids, m_5

Les figures suivantes présentent le déchet agricole avant et après le séchage :



Fig III.8 : Peser le déchet agricole avant le séchage



Fig. III.9 : Le déchet agricole après le séchage

❖ Calculs

$$\%MS = \frac{m_1}{(m_2 - m_0)}$$

$$\%MO = \frac{(m_4 - (m_5 - m_3))}{m_4}$$

d. Résultat

Tableau III.1 : présente les résultats du calcul de la matière sèche et la matière organique

MS%	27.5	27.1	26.9	27	27.5	28	27.5	27.2	(Σ MS%)/8	27.33
MO%	23.5	23.2	22.9	22.9	23.7	23.9	23.5	23.1	(Σ MO%)/8	23.33

III.3.2 pH et conductivité

Le pH et la conductivité d'échantillons a été mesurés grâce à un pH-mètre et à un conductimètre via les protocoles détaillés en suite. Les analyses sont effectuées en duplicata et les résultats sont exprimés en unité de pH et en mS.cm⁻¹ pour la conductivité.

a) Objectifs

Déterminer le pH et la conductivité d'un échantillon liquide ou solide.

b) Principe

Pour le pH, une tension électrique (U) est générée lorsque la sonde du pH-mètre est Plongée dans une solution aqueuse. L'équilibre entre la solution et la sonde correspond à une fonction affine décroissante soit $U = (a - b.PH)$ avec a et b des coefficients dépendant de la nature des électrodes, des solutions, de la température. L'étalonnage du pH-mètre ajuste ces valeurs. Pour la conductivité, son principe est basé sur la différence de potentiel des solutions. La mesure de la résistance de la solution à analyser s'effectue entre deux plaques de platine. La conductivité va varier en fonction de la concentration en ions de la solution. L'unité (mS.cm⁻¹).

c) Matériel

- ❖ pH-mètre
- ❖ Plaque agitatrice
- ❖ Solution étalon pH = 7 et pH = 4
- ❖ KCl 3 mol.L⁻¹
- ❖ Conductimètre
- ❖ Solutions d'étalonnage (1413 $\mu\text{S.cm}^{-1}$; 12.88 mS.cm⁻¹)
- ❖ 2 béchers (20 mL ; 100 mL)
- ❖ Papier absorbant
- ❖ Barreau aimanté
- ❖ Gants en nitrile
- ❖ Eau distillée

d) Mode opératoire

1. Calibration des appareils par des solutions commerciales

❖ **pH-mètre**

- ❖ Allumer le pH-mètre
- ❖ Nettoyer la sonde du pH-mètre avec de l'eau distillée et sécher-la avec du papier absorbant
- ❖ Appuyer sur « Cal » et placer la sonde dans la solution commerciale de calibration pH=7
- ❖ Agiter soit manuellement soit avec un barreau aimanté et une plaque agitatrice
- ❖ Attendre la stabilisation de la valeur ()
- ❖ Nettoyer la sonde avec de l'eau distillée et sécher la sonde
- ❖ Appuyer sur « Cal »
- ❖ Placer la sonde dans la solution de calibration pH = 4
- ❖ Agiter soit manuellement soit avec un aimant et une plaque agitatrice
- ❖ Attendre la stabilisation ()
- ❖ Nettoyer la sonde avec de l'eau distillée et sécher la sonde

Conductimètre

- ❖ Allumer le conductimètre
- ❖ Nettoyer la sonde du conductimètre avec de l'eau distillée et la sécher avec du papier absorbant
- ❖ Appuyer sur « Cal » et placer la sonde dans la solution commerciale à 1413 $\mu\text{S.cm}^{-1}$

- ❖ Agiter soit manuellement soit avec un barreau aimanté et une plaque agitatrice
- ❖ Attendre la stabilisation de la valeur
- ❖ Nettoyer la sonde avec de l'eau distillée et sécher la sonde
- ❖ Faire de même avec la solution d'étalonnage à 12.88 mS.cm⁻¹.

2. Échantillons

- ❖ Mettre 3 g d'échantillon dans un bécher
- ❖ Ajouter 20 mL d'eau distillée désionisée
- ❖ Mettre la sonde de pH dans l'échantillon (Attention : l'aimant ne doit pas toucher la sonde)
- ❖ attendre la stabilisation de la valeur
- ❖ Noter la valeur
- ❖ Nettoyer la sonde avec de l'eau distillée et sécher la sonde
- ❖ Placer la sonde du conductimètre dans l'échantillon
- ❖ Attendre la stabilisation de la valeur et la noter
- ❖ Nettoyer la sonde avec de l'eau distillée et sécher la sonde
- ❖ Éteindre les appareils
- ❖ Bien nettoyer les sondes
- ❖ Mettre la sonde du pH-mètre dans une solution KCl 3 mol.L⁻¹
- ❖ Mettre la sonde du conductimètre dans de l'eau distillée
- ❖ Éteindre les appareils

e) Résultat

❖ PH

Tableau III.2 : présente les mesures du PH.

jours	1	2	3	4	5	6	7	8	9
PH	6.7	6.6	6.8	7.1	7.5	7.4	7.8	7.1	7.8
jours	10	11	12	13	14	15	16	17	18
PH	7.4	7.1	6.8	7.4	7.6	7.3	7.1	7.6	7.2
jours	19	20	21	22					
PH	7.4	7.8	7.3	7.1					

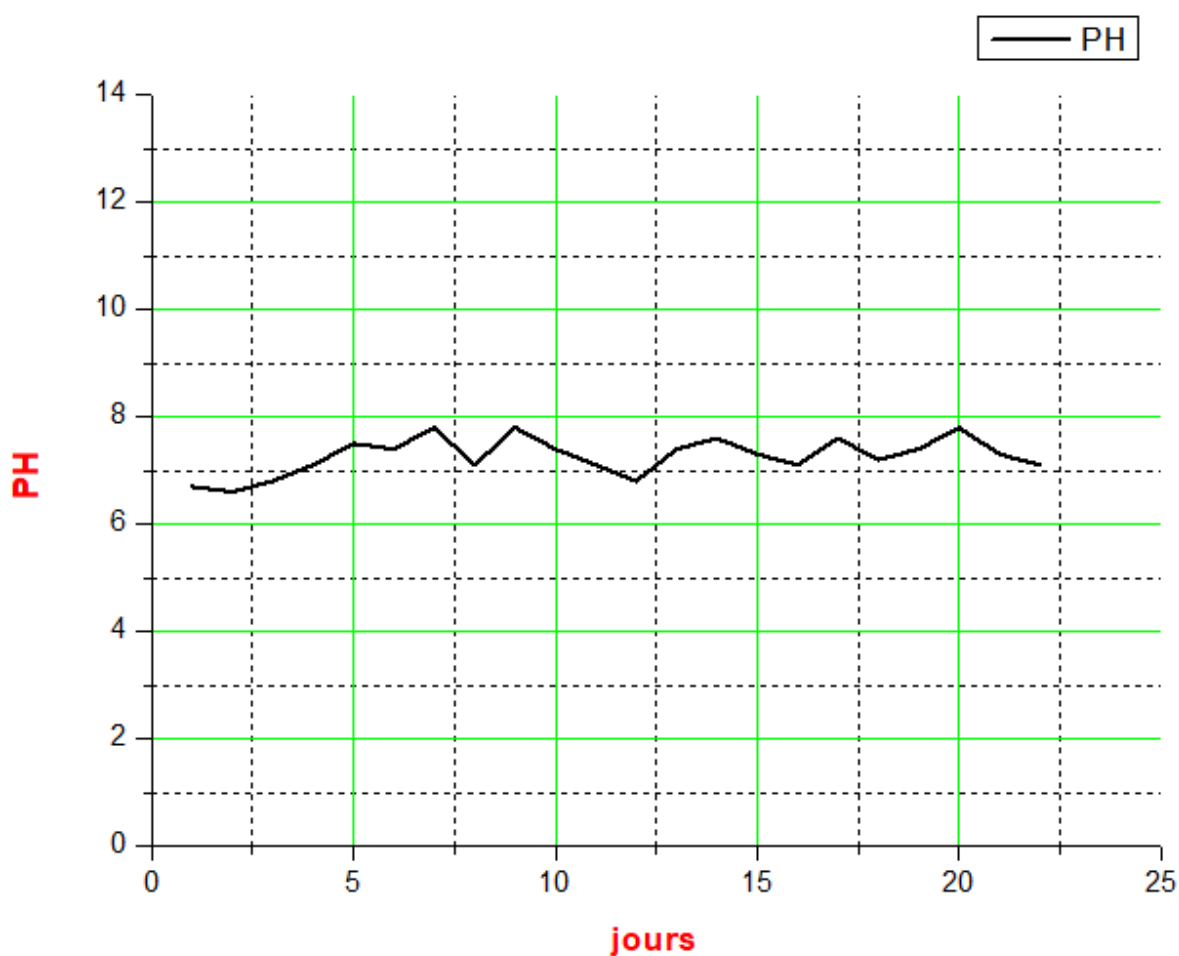


Fig III.10 : présente les mesures du PH graphiquement

❖ Conductivité β

Tableau III.3 : présente les mesures de la conductivité.

jours	1	2	3	4	5	6	7	8	9
β ($\mu\text{S/cm}$)	1613	1587	1893	2019	2311	2164	2615	2023	2677
jours	10	11	12	13	14	15	16	17	18
β ($\mu\text{S/cm}$)	2149	2013	1703	2177	2233	2211	2087	2279	2156
jours	19	20	21	22					
β ($\mu\text{S/cm}$)	2208	2768	2243	2081					

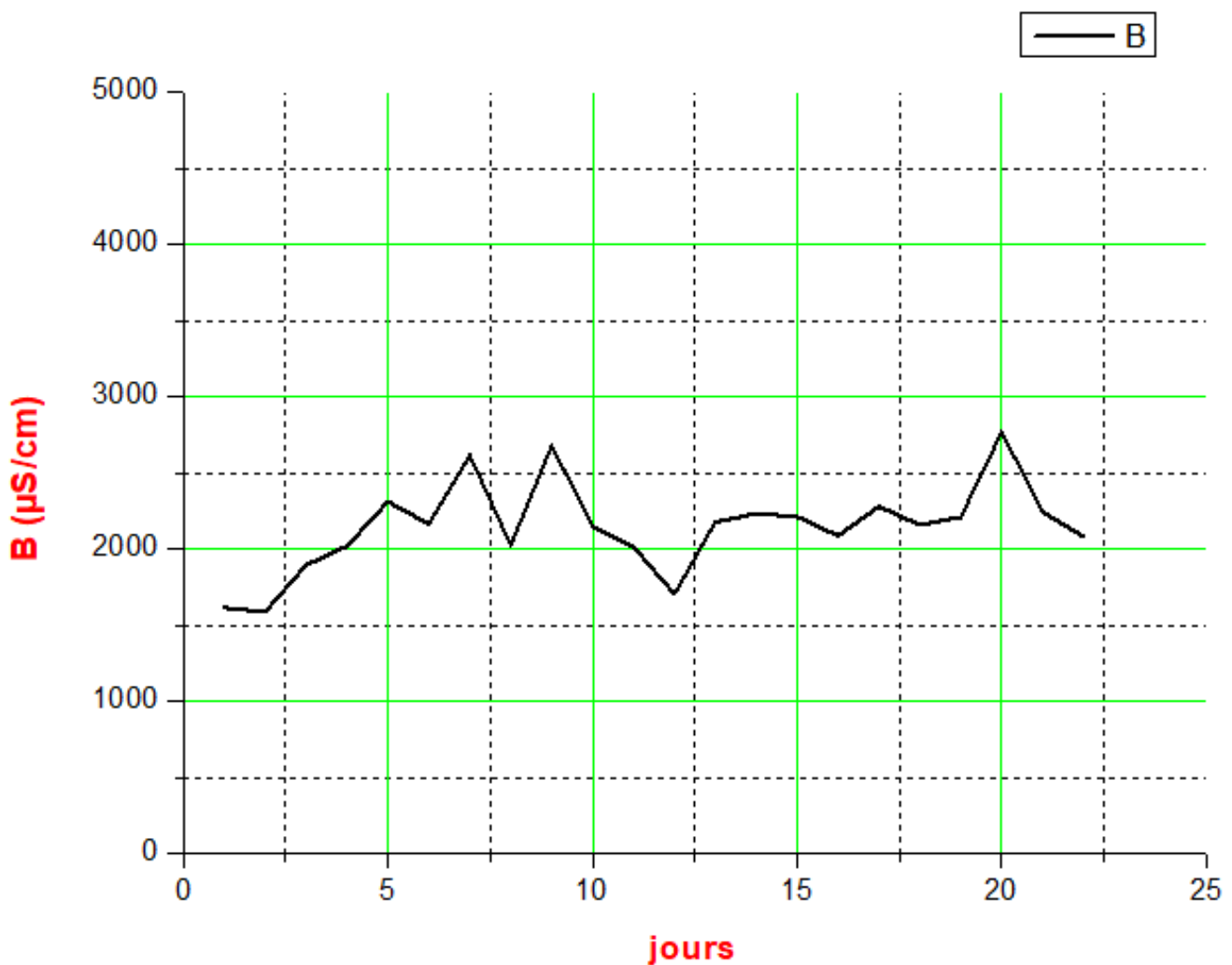


Fig III.11 : présente les mesures de la conductivité graphiquement

III.3.3 Dosage de la demande chimique en oxygène

La demande chimique en oxygène ou DCO est une analyse chimique pour indiquer la quantité d'oxygène qui est nécessaire pour l'oxydation des substances organiques par des oxydants chimiques forts, un excès de bichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en milieu fortement acide (H_2SO_4). Elle permet d'évaluer la charge polluante d'effluents liquides peu concentrés.

La matière organique est oxydée à froid par un excès de bichromate de potassium en milieu acide (H_2SO_4). La demande biochimique en oxygène (DBO_5) est la quantité d'oxygène consommée par les microorganismes contenus dans l'effluent au bout de cinq jours, dans des conditions expérimentales de pure obscurité et à température de 20°C .

Pour la Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO) la norme Afnor (NF T 90-101) est appliquée.

La matière oxydable contenue dans un échantillon est oxydée par chauffage à reflux en milieu fortement acide avec une quantité connue de bichromate de potassium dans une éprouvette fermée.

La consommation d'oxygène par l'échantillon provoque un changement de couleur dont l'absorbance est proportionnelle à la quantité de bichromate de potassium réduit et se mesure en équivalent d'oxygène. La méthode ne s'applique pas aux échantillons qui contiennent plus de 2000 mg/l de chlorures. Pour les échantillons contenant une concentration de chlorures supérieure à 2000 mg/l, l'échantillon doit être dilué.

La limite de détection est de 3 mg/l O₂ pour la basse courbe d'étalonnage et de 13 mg/l O₂ pour la haute courbe et La limite de quantification est de 8 mg/l O₂ pour la basse courbe d'étalonnage et de 42 mg/l O₂ pour la haute courbe. [43]. détaillée le Protocole de dosage de la demande chimique en oxygène (DCO).

III.3.4. Dosages des acides gras volatils :

La digestion anaérobie est inhibée par la présence d'AGV en trop grande quantité, le composé le plus toxique étant l'acide propionique [44].

Les AGV représentent une part importante des substrats convertis par les bactéries méthanogènes et constituent aussi une menace pour la production du méthane. En effet, les AGV sont des acides faibles qui ne sont pas complètement dissociés dans l'eau contrairement aux acides forts.

La concentration en AGV (acides gras volatils) est un paramètre important (indicateur sensible) qui répond rapidement à une perturbation de l'état biologique de la digestion. Les AGV sont des produits apparaissant lors d'une des étapes de la digestion. Ils sont par la suite transformés en méthane. Une augmentation de la concentration en AGV risque d'inhiber la méthanisation [45].

Le but de cette étude est de connaître la concentration en acides gras volatils (AGV) et les proportions de ces différents acides : acétique, propionique, isobutyrique, butyrique, isovalérianique et valérianique. Ceci donne généralement par un fractionnement par chromatographie en phase gazeuse. La méthode de détermination de la composition d'un mélange d'acides gras volatils par chromatographie en phase gazeuse.

III.3.5 Analyse de la phase gazeuse :

Le but de cette analyse est de connaître les proportions et les composants du gaz résultant à déchets agricoles par un procédé digestion anaérobie.

La quantité et la composition chimique de biogaz dépendent, du substrat, de sa DCO, du débit d'alimentation du digesteur, temps de séjour dans le réacteur et de température de fermentation. Composition volumique du biogaz issu de déchets organiques En général, les valeurs et les composants du gaz résultant de la digestion anaérobie et après analyse par chromatographie en phase gazeuse sont confinés entre les valeurs suivantes (CH₄ 50% à 70%) (CO₂ 30 à 50%) (H₂S 0 à 8%) (N₂ 0 à 20%) (CO Traces) (O₂ à 2%) (H₂ à 5%).

Résultat :

Tableau III.4 : Présente les mesures du volume du biogaz produit chaque jour

jours	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Q (m³)x10⁻³	0.00	0.00	0.17	0.22	0.39	0.52	0.51	0.69	0.58
jours	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Q (m³)x10⁻³	0.85	0.94	1.07	1.18	1.28	1.37	1.41	1.48	1.57
jours	19	20	21	22					
Q (m³)x10⁻³	1.46	0.92	1.22	1.30					

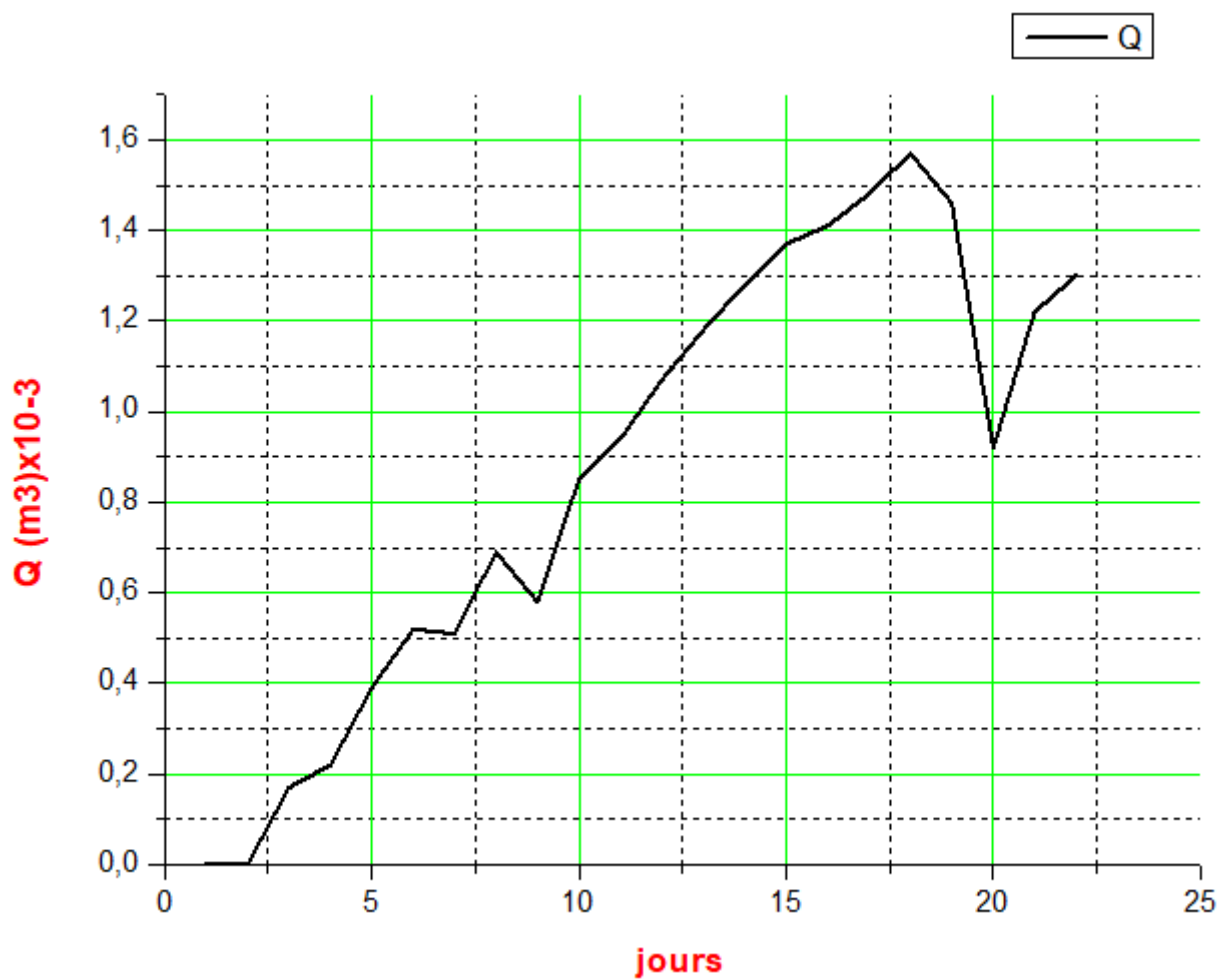


Fig III.12 : Présente les mesures du volume du biogaz produit chaque jour graphiquement

Tableau III.5 : Présente la cumulative volume du biogaz produit

jours	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CV(m³)x10⁻¹	0.00	0.00	0.17	0.39	0.78	1.30	1.81	2.50	3.08
jours	10	11	12	13	14	15	16	17	18
CV(m³)x10⁻¹	3.93	4.87	5.94	7.12	8.40	9.77	11.18	12.66	14.23
jours	19	20	21	22					
CV(m³)x10⁻¹	15.69	16.61	17.83	19.13					

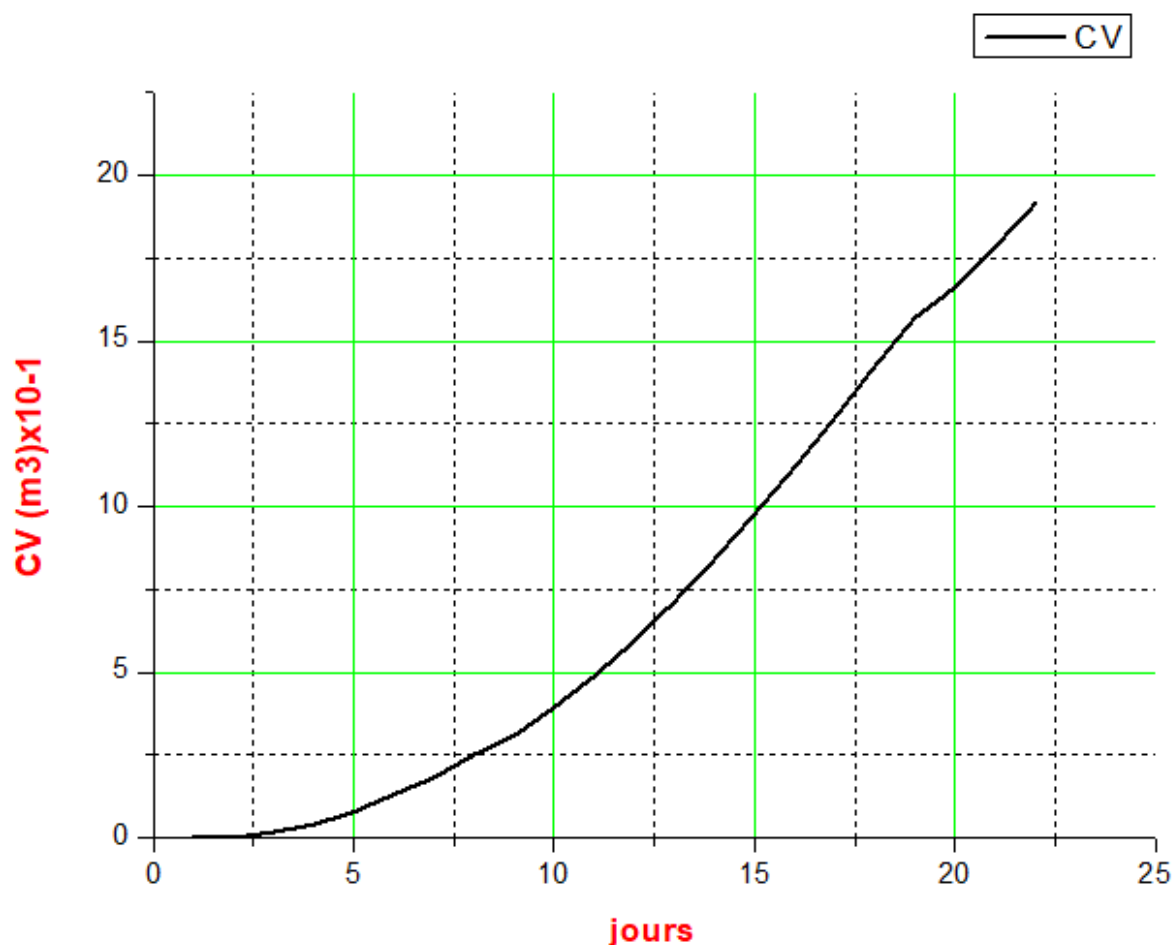


Fig III.13 : Présente la cumulative volume du biogaz produit graphiquement

III.4. Prédiction de la capacité de la valorisation des déchets de la ville de Tébessa

III.4.1. Estimation des quantités de matières et déchets organique :

La direction de l'environnement de la wilaya de Tébessa estime la quantité des déchets organiques ménagères et agricole. Les quantités estimées respectivement sont 4900 T et 6700 T.

III.4.1. Estimation du volume du biogaz

D'après notre étude nous avons trouvé que pour 10 Kg du déchet organique on peut produire en minimum 1.913 m^3 du biogaz, alors si on a les moyens pour valoriser tous les déchets organiques de la ville de Tébessa, on a capable de produire le volume suivant :

La masse totale des déchets

$$M = M_{\text{ménagère}} + M_{\text{agricole}}$$

$$M = 4900 + 6700$$

$$M = 11600 \text{ T}$$

Alors le volume du biogaz est égal

$$V_{\text{biogaz}} = 11600 * 1.913 / 10 * 10^{-3}$$

$$V_{\text{biogaz}} = 2.22 * 10^6 \text{ m}^3$$

III.5. Conclusion et discussion :

La digestion anaérobie est un procédé de transformation de la matière organique (déchets agricoles) en énergie par des bactéries en absence d'oxygène avec des autres conditions. Elle permet de produire un gaz combustible qui est le biogaz composé essentiellement de méthane, tout en réduisant de moitié le taux de matières organiques. Le résidu final de la digestion (digestat) est stable désodorisé et débarrassé en majeure partie des germes pathogènes et peut être même utilisé comme un fertilisant pour les terres agricoles. Mais avant d'effectuer le processus de digestion, nous analysons les composants des déchets pour déterminer le sens de la fermentation et pendant la digestion nous analysons les fluides issus de la digestion, telles que l'étude du pH et l'étude des acides gras volatils (AGV) pour produire des quantités importantes de gaz.

La digestion anaérobie fait intervenir un très grand nombre de bactéries et de réactions biologiques, il s'agit donc d'un processus très complexe. De plus il est impossible de généraliser toutes les approches car chaque digesteur est unique compte tenu du process mis en jeu, des substrats utilisés, des populations bactériennes en présence.

Le principal conseil que l'on peut apporter est d'avoir une bonne connaissance de tous les substrats que l'on introduit dans le digesteur (attention aux substrats ne provenant pas de l'exploitation) pour éviter toute contamination facilement évitable (métaux lourds, médicaments, désinfectants antibiotiques...). Ensuite il est également conseillé de réaliser un suivi de certains paramètres biologiques afin de prévenir les intoxications possibles et donc la perte de productivité de l'unité de méthanisation. On peut préconiser un suivi sous la forme suivante :

- ❖ Suivi quotidien ou continu de la température, du pH, des teneurs en CH_4 , CO_2 , H_2S , O_2 , H_2 et NH_3 si substrat à risques (riche en protéines).
- ❖ Suivi hebdomadaire ou bihebdomadaire du pouvoir tampon et des teneurs en AGV pour prévenir les variations de pH,

Enfin, il est important de maintenir une température constante dans le digesteur car certaines bactéries sont sensibles aux variations de température.

Conclusion générale

La découverte de la digestion anaérobie et le biogaz vient grâce à la découverte de fermentation. C'est un écosystème naturel complexe qui base sur la microbiologie de la digestion anaérobie qui est à l'origine des agrégations bactériennes jouent le rôle principale dans cette processus précisément les bactéries Hydrolyse Acidogénèse Acétogénèse Méthanogénèse Sulfato-réduction, chaque de ces bactéries joue un rôle exact pour produit à la fin le biogaz ou le CH₄. La digestion anaérobie a une physico-chimie pour être possible pasque n'est pas réagir et produire le gaz spontanément et dans ce point fallait fait une grande étude et attention pour les paramètres suivants : température pH et alcalinité les nutriments les composés toxiques ou inhibants la digestion anaérobie. La digestion anaérobie produit un biogaz a des caractéristiques spécifiques. Les modes de valorisation de ce biogaz sont Valorisation thermique.

- ❖ Valorisation électrique.
- ❖ Moteurs à gaz et fioul-gaz.
- ❖ Turbines et cycle combiné.
- ❖ Biogaz véhicule et injection dans le réseau.

On peut améliorer du débit de biogaz par des méthodes spécifiques et aussi on peut faire une purification du biogaz par les méthodes suivant

- ❖ Elimination du sulfure de dihydrogène
- ❖ Elimination des composés organohalogénés, métaux lourds et siloxanes
- ❖ Elimination de la vapeur d'eau
- ❖ Elimination du gaz carbonique

Le bioréacteur ou le digesteur a aussi un influence directe sur la digestion anaérobie cette dernière a aussi comme toute les procédés des avantages et limites. Le choix d'un digesteur permet de faire un bon rendement de biogaz et protéger le processus. En générale surtout pour l'entrer de l'oxygène fallait faire la digestion anaérobie dans milieu qui 0 bar volume d'oxygène. Parce que reste l'ennemie numéro un pour la digestion anaérobie. Pour garantir un milieu de 0 volume d'oxygène il faut connaitre bien les modes d'alimentation des réacteurs de fermentation et les types des bioréacteurs aussi les solutions technologies pour les bioréacteurs continus et d'après ce qu'on a vu et d'après les savons et les spécialistes de ce domaine il ya de plusieurs type de bioréacteurs sont les digesteurs à cellules libres digesteurs infiniment mélangés digesteurs à contact les digesteurs à biofilm et à granules réacteurs à lit fixe.

Dans le chapitre 3 les matériel et les méthodes le dispositif expérimentale et c'est quoi un réacteur pilote, support de la biomasse, instrumentation, suivi du digesteur par des mesures, dosage de la demande chimique en oxygène, dosages des acides gras volatils, analyse de la phase gazeuse. Aussi dans le chapitre 3 on fait la partie expérimentale par la description de le dispositif expérimentale utilisé dans l'expérience avec une définition de déchets agricoles et les statistiques de la ville de Tébessa pour la production de biogaz à partir de déchets agricoles. On finit ce chapitre par une discussion et conclusion.

Références bibliographiques

- [1] Godon et al.,1997 J.-J. GODON, E. ZUMSTEIN, P. DABERT, F. HABOUZIT & R MOLETTA,« Molecular Microbial Diversity of an Anaerobic Digestor as Determined by Small-Subunit rDNA Sequence Analysis », Applied Environmental Microbiology, vol. 63, no 7, p. 2802–2813, 1997
- [2] Gaval et al., 2002 N. GAVAL, I. ANGELIDAKI & B. H. AHRING, Biomethanation I, vol. 81 de Advances in Biochemical Engineering and Biotechnology, chap. Kinetics and Modeling of Anaerobic Digestion Process, p. 57–93, Springer Berlin / Heidelberg, 2002
- [3] « Differentiation between acetate and higher volatile acids in the modeling of the anaerobic biomethanation process », Biotechnology Letters, vol. 1, no 8, p. 309–314, 1979
- [4] J. G. ZEIKUS, « The Biology of Methanogenic bacteria », Journal of Bacteriology, vol. 41, no 2, p. 514–541, 1977
- [5] I. SIEGERT & C. BANKS, « The effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors », Process Biochemistry, vol. 40, no 11, p. 3412–3418, November 2005
- [6] P. L. MCCARTY & F. E. MOSEY, « Modelling of anaerobic digestion processes (a discussion of concepts) », Water Science and Technology, vol. 24, no 8, p. 17–33, 1991.
- [7] ILLINOIS STATE WATER SURVEY DIVISION, Anaerobic Fermentations, State of Illinois, 1939
- [8] Thèse doctorat Jonsen lacour Lyon université sous titre : Thèse en cotutelle Valorisation de résidus agricoles et autres déchets organiques par digestion anaérobie en Haïti page 48

- [9] E. White, Methane fermentation of woody biomass, *Bioresource Technology*, (1994).
- [10] J. M. AKAGI & G. JACKSON, « Degradation of glucose by proliferating cells of *desulfotomaculum nigrificans* », *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 15, no 6, p. 1427–1430, 1967.
- [11] A. VISSER, L. W. H. POL & G. LETTINGA, « Competition of methanogenic and sulfidogenic bacteria », *Water Science and Technology*, vol. 33, no 3, p. 99–110, 1996
- [12] R. CORD-RUWISCH, H.-J. SEITZ & R. CONRAD, « The capacity of hydrogenotrophic anaerobic bacteria to compete for traces of hydrogen depends on the redox potential of the terminal electron acceptor », *Archives of Microbiology*, vol. 149, no 4, p. 350–357, 1988
- [13] Dépollution des déchets riches en matière organique (boues de station d'épuration et déchets d'abattoir) Par digestion anaérobie : Valorisation énergétique et production du méthane par Nabila laskri
- [14] H. A. BARKER, « Studies on the Methane Fermentation. VI. The Influence of Carbon Dioxide Concentration on the rate of Carbon Dioxide Reduction by Molecular Hydrogen », *Proc. N. A. S.*, vol. 29, no 6, p. 184–190, 1943
- [15] R. H. CLARK & R. E. SPEECE, « The pH tolerance of anaerobic digestion. », *Advances in Water Pollution Research* vol. 1, p. 1–13, 1971
- [16] J. E. BAILLEY & D. F. OLLIS, *Biochemical engineering fundamentals*, vol. McGraw-Hill Chemical Engineering Series, McGraw-Hill, second edition édition, 1986.
- [17] S. GOODWIN & J. ZEIKUS, « Physiological Adaptations of Anaerobic Bacteria to Low pH : Metabolic Control of Proton Motive Force in *Sarcina ventriculi* », *Journal of Bacteriology*, vol. 169, no 5, p. 2150–2157, 1987.

- [18] S. JAIN & B. MATTIASSON, « Acclimatization of methanogenic consortia for low pH biomethanation process », *Biotechnology Letters*, vol. 20, no 8, p. 771–775, 1998
- [19] Réunion, Schéma départemental de gestion des boues d'épuration de la Réunion, Conseil Général, (2001).
- [20] K. BOE, On-line Monitoring and Control of the biogas process, Thèse de doctorat, Technical University of Denmark, 2006.
- [21] S. FUKUZAKI, N. NISHIO, M. SHOBAYASHI & S. NAGAI, « Inhibition of the fermentation of propionate to methane by hydrogen, acetate and propionate », *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 56, no 3, p. 719–723, 1990.
- [22] D. R. BOONE & M. P. BRYANT, « Propionate-Degrading Bacterium, *Syntrophobacter wolinii* sp. nov. gen., from Methanogenic Ecosystems
- [23] E. R. HALL, L. W. HULSHOFF, G. LETTINGA, J. F. MALINA & J. F. G. POHLAND, Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes, vol. 7 de Water Quality Management Library, Technomic Publishing Company, 1992
- [24] B. K. AHRING & P. WESTERMANN, « Kinetics of Butyrate, Acetate, and Hydrogen Metabolism in a Thermophilic, Anaerobic, Butyrate Degrading Triculture », *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 53, no 2, p. 434–439, 1987b.
- [25] M. J. MCINERNEY, M. P. BRYANT, R. B. HESPELL & J. W. COSTERTON, « *Syntrophomonas wolfei* gen. nov. sp. nov., an Anaerobic, Syntrophic, Fatty Acid-Oxidizing Bacterium », *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 41, no 4, p. 1029–1039, 1981
- [26] Jonathan Hess. Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation. *Automatique / Robotique*. Université Nice Sophia Antipolis, 2007. P 40-46.

- [27] J. WALSH, C. ROSS, M. SMITH & S. HARPER, « Utilisation of Biogas », *Biomass*, vol. 20, p. 277–290, 1989
- [28] P. M. TCHOATE HETEU & L. BOLLE, « Economie d'énergie en trigénération », *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 41, p. 1151–1159, 2002.
- [29] E. PORPATHAM, A. RAMESH & B. NAGALINGAM, « Investigation on the effect of concentration of methane in biogas when used as fuel for spark ignition engine », *Fuel*, vol. in Press, 2007
- [30] A. HENHAM & M. K. MAKKAR, « Combustion of simulated biogas in a dual-fuel diesel engine », *Energy Conversion and Management*, vol. 39, no 16-18, p. 2001–2009, 1998
- [31] Onathan Hess. Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation. *Automatique / Robotique*. Université Nice Sophia Antipolis, 2007 page 42
- [32] J. COOMBS & P. J. MEYNELL, « Cleaning biogas », *The Digest (newsletter of the BABA)*, vol. 10, p. 5–9, February 1982
- [33] P. WHEELER, T. JAATINEN, A. LINDBERG, J. B. HOLM-NIELSEN, A. WELLINGER & A. PETTI GREW, *Biogas upgrading and utilisation, Dans Task 24 : Energy from biological conversion of organic waste, IEA-BIOENERGY (coordinateur), IEA-Bioenergy, 2000.*
- [34] S. S. KAPDI, V. K. VIJAY, S. K. RAJESH & R. PRASAD, « Biogas scrubbing, compression and storage : perspective and prospectus in indian context », *Renewable Energy*, vol. 30, p. 1195–1202, 2005.
- [35] T. D. HAYES, H. R. SAACSON, J. T. PFEFFER & Y. M. LIU, « In situ methane enrichment in anaerobic digestion », *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 35, p. 73–86, 1990

- [36] M. SYED, G. SOREANU, P. FALLETTA & M. BÄ©LAND, « Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes - a review », *Canadian Biosystems Engineering*, vol. 48, no 2, p. 1–14, 2006.
- [37] K. A. STREVETT, R. F. VIETH & D. GRASSO, « Chemo-autotrophic biogas purification for methane enrichment : mechanism and kinetics », *The Chemical Engineering Journal*, vol. 58, p. 71–79, 1995.
- [38] C. Bougrier, *Optimisation du procédé de méthanisation par mise en place d'un Co traitement physico-chimique : Application au gisement de biogaz représenté par les Boues d'épuration des eaux usées*, Thèse. Université de Montpellier II, (2005).].
- [39] C. Chitour, *L'énergie: Les enjeux de l'an 2000*, VOL II OPU, (1997).
- [40] [Seghezzo L., Zeeman G., Lier J.B.V., Hamelers H.V.M., Lettinga G. A review: the anaerobic treatment of sewage in uasb and egsb reactors. *Bioresour. Technol.*, 65, pp. 175 - 190. 1998.]
- [41] AFNOR, *Collection of French standard methods 1994: water quality*, Ed.AFNOR, (1994).
- [42] APHA, 1998
- [43] CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, *Détermination de la demande chimique en oxygène dans les effluents : méthode de reflux en système fermé suivi d'un dosage par colorimétrie avec le bichromate de potassium*. MA. 315 – DCO 1.0, Ministère de l'Environnement du Québec, 2004, 14 p
- [44] M. Bennouna et S. Kehal, *Production de Méthane à Partir des Boues des Stations d'Épuration des Eaux Usées : Potentiel Existant en Algérie"*, *Revue Energ. Ren. : Production et Valorisation – Biomasse*, (2001) 29-36.
- [45] Agence de l'Eau Adour Garonne et Solagro, *La digestion anaérobie des boues urbaines*, (2001).