



Université Saad Dahlab, Blida-1-
Faculté de Technologie

Département des Énergies Renouvelables

PROJET DE FIN D'ETUDE

Présenté par : Barhoum Elbekri

Pour l'obtention du diplôme de master

Spécialité : Energies Renouvelables

Option : Habitat Bioclimatique

Thème :

Valorisation énergétique des déchets organiques ménagers

Promotrice :

Fatma zohra Ferradji MCB Université Blida 01

Soutenue le : 24/09/2020 **Devant le jury composé de** :

Président : Pr. Hamid Université Blida 01

Examineur : Dr. Hatti Université Blida 01

Blida-Septembre 2020

DEDICACES

A ma chère mère, qui m'a toujours été lié.

**A toute ma famille qui a toujours soutenu mes
travaux.**

**A mes amis qui m'a encouragé et ils étaient avec
moi dans le temps difficile.**

REMERCIEMENTS

A Dieu, de m'avoir donné la force et de me protéger pendant tout cette étape.

Je remercie premièrement à l'université Saad Dahlab de Blida- Département de ER, pour leur soutien économique qui m'a permis de réaliser cette formation académique.

Une très grande reconnaissance et gratitude va à l'équipe de bioconversion de l'unité de développement des énergies renouvelables (URER d'Adrar) et à l'équipe de Bioconversion et d'environnement, qui m'ont aidé à la réalisation de toutes les expérimentations et les analyses.

Je veux bien remercier mon Encadreur Madame FRRADJI FATMA ZOHRA et Mme FETHYA SALEM qui m'a accueilli dans son laboratoire.

Sans oublier de remercier très chaleureusement tous mes enseignants et mes collègues du département des énergies renouvelables.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو معالجة النفايات الغنية بالمواد العضوية وتحويلها للطاقة من خلال التحلل اللاهوائي وإنتاج الطاقة الخضراء من خلال غاز حيوي. تحتوي معظم النفايات العضوية على نسبة عالية من المواد القابلة للتحلل بسهولة ، والتي تعطي إنتاجية عالية من الميثان. و تعتبر النفايات المنزلية من الأطعمة الطازجة و المطبوخة لها عائد جيد لتحول إلى الغاز الحيوي خلال وقت اقل من 25 يومًا. في معظم التجارب التي قمنا بإجرائها ، يتم تنظيم الوسط التحلل اللاهوائي لدرجة الحموضة ما بين 6,8 و 7,4، و يجب أن يكون تركيز الأحماض الدهنية المتطايرة أقل من 2 غ / لتر ، بالإضافة إلى درجة حرارة ثابتة مثالية لعمل الكائنات الحية الدقيقة التي تقدر ب 37 درجة مئوية. حيث كان متوسط حجم الغاز الحيوي الذي تم الحصول عليه أثناء تحليل اللاهوائي للنفايات المطبوخة ب 359,97 مل من الغاز الحيوي خلال 3 أيام ، باستخدام قيمة الطاقة لهذا الحجم الغازي للحصول على احتياجات الطاقة.

الكلمات المفتاحية: الكتلة الحيوية، بيوغاز، إنتاج الميثان، التحلل اللاهوائي، الطاقة المتجددة.

RESUME

L'objectif de cette étude est le traitement et la valorisation énergétique des déchets riches en matières organiques par la digestion anaérobie, en vue de freiner les effets néfastes de la pollution et de produire une énergie verte qui est le biogaz. La plupart des déchets organiques contiennent une fraction élevée du substrat facilement dégradable, qui donne un rendement élevé de méthane. Le substrat de digestion issue des déchets ménagers bruts et frais présentent un rendement assez bon en biogaz pour les temps de séjours inférieur à 25 jours. Ceci est dû au caractère biodégradable qu'ont les déchets cuits plus que les déchets frais. Dans la plupart des expériences menées, le pH avec des valeurs optimales comprises entre 6,8 et 7,4. La concentration en acide gras volatils (AGV) doit être inférieure à 2g/l, ainsi qu'une température stable optimale pour les micro-organismes épurateurs aux alentours de 37°C. Le volume moyen de biogaz obtenu au cours de la digestion anaérobie des déchets cuits a été de 359,97 ml de biogaz pendant 3 jours. On utilise la valeur énergétique de ce volume pour avoir les besoins énergétique d'une chambre d'un étudiant.

Mots clés : Biomasse, biogaz, méthane, production, digestion anaérobie, valorisation, énergie renouvelable

ABSTRACT

The objective of this study is the treatment and energy recovery of waste rich in organic matter through anaerobic digestion, in order to curb the harmful effects of pollution and to produce green energy, which is biogas. Most organic wastes contain a high fraction of the easily degradable substrate, which gives a high yield of methane. The digestion substrate resulting from raw and fresh household waste has a fairly good yield in biogas for residence times of less than 25 days. In most of the experiments carried out, the pH with optimum values between 6.8 and 7.4. The concentration of volatile fatty acids should be less than 2g / l, as well as an optimum stable temperature for purifying microorganisms around 37 °C. The average volume of biogas obtained during the anaerobic digestion of the cooked waste was 359.97ml for 3 days, using the energy value of this volume to have the energy needs a student room.

Key words: Biomass, biogas, methane, production, anaerobic digestion, valorization, renouvelable energy

LISTE DES ABREVIATION

MM : matière minérale.

GES: gaz à effet de serres.

EMHV: d'esters méthyliques d'huile végétale.

PCI: pouvoir calorifique inférieur.

AGV : Acides gras volatils.

DCO : Demande Chimique en Oxygène.

MO : Matière Organique.

MS : Matière Sèche.

TAC : Titre alcalimétrique complet.

ETBE : éthyle tertio butylether

GPL : gaz propane liquéfié

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : GENERALITE SUR LA BIOMASSE	.3
1. INTRODUCTION :	3
2. BIOMASSE :	3
2.1 .Definition :	3
2.2. Proprietes de la biomasse:	5
2.3. Ressources de la biomass:	5
3. LES CONVERSIONS DE BIOMASSES:	6
a- La voie sèche (transformations thermochimiques) :	8
b- La voie humide (transformations biochimiques) :	9
c- Production de biocarburants :	10
4. DIFFERENCE ENTRE LE BIOGAZ ET LES BIOCARBURANTS :	11
5. AVANTAGES ET INCONVNIENTS:	11
6. BIOMASSE EN ALGERIE:	12
7. CONCLUSION:	13
CHAPITRE II : DIGESTION ANAEROBIE : PRODUCTION DE BIOGAZ	14
1. INTRODUCTION:	14
2. DEFINITION DE LA DIGESTION ANAEROBIE :	14
3. HISTORIQUE DE LA METHANISATION :	15
4. ETAPES DE LA DIGESTION ANAEROBIE :	17
4.1 Hydrolyse:	17
4.2. Acidogènes:	17
4.3 Acétogenèse:	17
4.4. Méthanogenèse:	17
5. LES FACTEURS INFLUENÇANT LA DIGESTION ANAEROBIE :	19
5.1. Température :	19
5.2 .pH de fonctionnement :	19
5.3 Anaérobiose :	19
5.4 .Potentiels d'oxydoréduction :	20
5.5 Taille particules :	20
5.6 Teneur en matière sèche :	20
5.7 Taux de charge et temps de séjour :	20

5.8 Rapport C/N	21
5.9 Type du substrat :	21
5.10. Agitation	21
5.11. Nutriments	22
5.12. Inhibiteurs	22
6. LES TYPES DE REACTEURS DE LA METHANISATION :	22
6.1. Selon le mode d'alimentation :	22
6.2. Selon le type de substrat	23
6.3. Selon le nombre d'étape :	24
<input type="checkbox"/> Le procédé en mono-étape	24
<input type="checkbox"/> Le procédé en bi-étape	24
7. LES PRODUITS DE LA DIGESTION :	24
7.1. Le digestat :	25
7.2. Biogaz :	25
8 .PURIFICATION DU BIOGAZ	26
9. LES DIFFERENTS MODES DE VALORISATION DU BIOGAZ :	28
9.1 Valorisation thermique :	29
9.2 Valorisation électrique :	30
9.3 Valorisation sous forme de carburant automobile :	30
9.4 Valorisation par injection dans le réseau de gaz de ville :	30
10. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA DIGESTION ANAEROBIE :	31
10.1 Les avantage :	31
10.2 Les inconvénients :	31
11. CONCLUSION :	31
CHAPITRE III: MATERIELS ET METHODES	32
1. PRÉSENTATION DE LIEU DE STAGE	32
2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL :	32
2.1 Préparation des échantillons (Biomasse=substrat) :	32
2.2 La matière séchée de l'échantillon (MS):	33
2.3.La matière organique (MO) :	35
2.4. Mode opératoire de la méthanisation par digesteur utilisé	36
CHAPITRE VI: RESULTATS ET DISCUSSION	43
1. Introduction :	43
2. Production de biogaz	43

2.1 L'inflammabilité du biogaz :	43
2.2 Les valeurs de volume de biogaz :	44
Valorisation énergétique	45
□ Par exemple l'énergie valorisable (E_V) par le moteur on admet 5% de pert:	45
□ L'énergie fournie par le biogaz en un heure :	46
□ La production annuelle :	46
3. Les analyses de digestat liquide :	46
CONCLUSION GENERALE	49
BIBLIOGRAPHIE	51

LISTE DES FIGURES

FIGURE I.1 : LES SOURCES DE LA BIOMASSE	6
FIGURE I.2 : PRINCIPAUX MODES DE VALORISATION DE LA BIOMASSE	7
FIGURE I.3 : SCHÉMA DE MÉTHANISATION	9
FIGURE II.1: SCHEMA GENERALE D'UNE INSTALLATION DE METHANISATION	14
FIGURE II.2:ETAPES DE LA DIGESTION ANAEROBIE DE LA MATIERE ORGANIQUE	17
FIGURE II.3: LES TYPES DE DIGESTEUR SELON LE MODE DE L'ALIMENTATION.....	22
FIGURE II.4 : DIGESTEUR ANAEROBIE EN UNE (MONO) ET DEUX (BI) ETAPES.....	23
FIGURE II.5 :EQUIVALENCE ENERGETIQUE DU BIOGAZ.....	27
FIGURE II.6 : DIFFERENTES VOIES DE VALORISATION DU BIOGAZ.....	28

LISTE DES PHOTOS

PHOTO III. 1 : SUBSTRATS UTILISES (A) DECHETS FRAIS, (B) DECHETS CUITS.....	31
PHOTO III.2: MELANGE HOMOGENE(BROYEES).....	32
PHOTOIII.3 : LES ECHANTILLONS DANS CREUSET.....	33
PHOTO III.4: (A) ETUVE ET (B) DESSICCATEUR.....	33
PHOTO III.5 : L'ECHANTILLON DANS UN FOUR A MOUFLE.....	34
PHOTO III.6 : DIGESTEUR VIDE.....	35
PHOTO III.7 : PH-METRE BASIC.20.....	36
PHOTO III.8 : (A) BIOMASSE SOLIDE (B) BIOMASSE LIQUIDE.....	37
PHOTO III.9 : LES REACTEURS DANS UN BAIN MARIE CHAUFFE ET REGULE A 37°C (MILIEU AEROBIE).....	37
PHOTO III.10 : PHOTO ET SCHEMA DE DISPOSITIF DE MESURE DU VOLUME DU BIOGAZ PRODUIT.....	38
PHOTO III.11 : DOSAGE DE TITRE ALCALIMETRIQUE COMPLET (TAC).....	39
PHOTO VI.1 : (A) PRODUCTION DE BIOGAZ(B) TESTE L'INFLAMMABILITE DE BIOGAZ	43

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I.1 : COMPOSITION COMPOSITION ELEMENTAIRE ET TAUX DE CENDRE DE QUELQUE BIOMASSE.....	4
TABLEAU II.1: COMPOSITION MOYENNE DU BIOGAZ.....	25
TABLEAU II.2: PURIFICATION DE BIOGAZ REQUISE EN FONCTION DU MODE DE VALORISATION.....	26
TABLEAU II.3: QUELQUE TECHNIQUE D'EPURATION DE BIOGAZ.....	26
TABLEAU VI.1: VALEUR DE VOLUME (ML) DE BIOGAZ EN FONCTION DU TEMPS.....	43
TABLEAU VI.2: ANALYSES PHYSICO –CHIMIQUE DE DIGESTAT LIQUIDE.....	45

INTRODUCTION GENERALE

De fortes pressions sur l'environnement ont été enregistrées et la production de déchets ne cesse d'augmenter suite à l'accroissement de la population et à la croissance économique. Or, aujourd'hui, les besoins énergétiques de l'humanité sont couverts en très grande partie par les énergies fossiles (80%).

En effet, les énergies renouvelables sont présentes et disponibles en quantité infinie. Leur exploitation est un moyen de répondre aux besoins en énergie tout en préservant l'environnement [1].

La production des déchets et leurs accumulations est un problème majeur, en raison de leurs caractères polluants. Plusieurs filières existent pour le traitement de la valorisation de ces déchets. Parmi ces filières de traitement pour éliminer cette problématique, citons la digestion anaérobie ou méthanisation qui présente de nombreux intérêts environnementaux, économiques, sociaux et énergétiques, qui en résultent un produit qui est le biogaz [2].

De ce fait, le recours à la digestion anaérobie pour le traitement de ces déchets semble être une solution judicieuse. Par ailleurs, l'application d'un tel procédé de bioconversion offre la possibilité de traiter des déchets et de produire une énergie verte et renouvelable qui est le biogaz. Ce dernier est riche en méthane (CH_4) qui possède un pouvoir énergétique élevé et peut être utilisé dans de nombreuses applications (chauffage, cuisson), électricité (éclairage) et biocarburant [3].

L'objectif de ce mémoire est de présenter une étude sur la biomasse (cas déchets ménagers) et la production de biogaz. Pour cette raison nous avons partagé ce mémoire en trois parties, dans la première partie s'agit d'une recherche sur la biomasse d'une manière générale. Nous avons présenté un chapitre qui parle de la production de biogaz et la méthanisation. D'autre part, nous avons traité l'énergie produite par le biogaz : son origine, fonctionnement et la valorisation, pour cela la biomasse est une énergie du futur, elle se divise par différentes types et méthodes pour l'utilisé comme une source d'énergie.

Seront présentés dans la deuxième partie du mémoire les principaux matériels et méthodes utilisés pour concrétiser l'expérimentation.

La troisième partie présentera les résultats obtenus ainsi que les interprétations et discussions qu'ils peuvent susciter.

Enfin, en guise de conclusion générale nous proposerons une synthèse des résultats acquis, et dégagerons les perspectives de la poursuite de ce travail de recherche.

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LA BIOMASSE

1. INTRODUCTION :

Les énergies renouvelables peuvent être réparties en cinq grandes familles selon l'origine de la source, à savoir : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique et la biomasse. Parmi ces énergies la biomasse présente une source très prometteuse d'énergie propre et renouvelable. Le terme biomasse comprend une grande diversité de matières organiques, d'origine végétale ou animale, parfois insoupçonnées. La plupart sont en fin de vie et peuvent être transformées pour produire de l'électricité, de la chaleur ou du carburant. Il s'agit d'un gisement d'énergie local, renouvelable et propre. Une exploitation durable et équilibrée des gisements de biomasse (tout en préservant la durabilité des ressources) contribue considérablement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et au développement pérenne d'une économie locale [4].

2. BIOMASSE :

2.1. Définition :

La biomasse désigne l'ensemble de la matière vivante. Depuis le choc pétrolier de 1973, cette terminologie s'applique aux produits organiques végétaux ou animaux utilisés à des fins énergétiques ou agronomiques, que l'on classe couramment, selon leur taux d'humidité, en deux grandes familles :

- La « biomasse sèche » qui comprend la biomasse ligneuse comme les buches, produits connexes de la transformation du bois, élagages urbains et des bords de routes, bois de rebut, ainsi que les pailles et autres résidus de récoltes ;
- La « biomasse humide » qui regroupe les flux de déchets organiques issus de l'activité agricole (déjections animales), des industries agroalimentaires (abattoirs, laiteries, cidreries, distilleries, etc.) et des collectivités (déchets verts, boues d'épuration, fraction fermentescible des ordures ménagères, graisses organiques et produits résiduaux)

Selon une autre définition, la biomasse est toute matière provenant du vivant. Elle a la propriété d'être une source soit d'énergie soit de matière première

La biomasse est principalement composée de carbone (C), d'oxygène (O), d'hydrogène (H) mais également d'azote (N) et de matières minérales (MM) appelée cendres, avec des proportions variables d'une biomasse à une autre [5].

Les composants de la biomasse incluent aussi la cellulose, l'hémicellulose, la lignine, les lipides, les protéines, les sucres simples, l'amidon, l'eau, les hydrocarbures, les cendres et d'autres composés [6].

Le tableau (I.1) montre la composition de quelque biomasse utilisée dans le domaine de conversion énergétique :

Tableau I.1. Composition élémentaire et taux de cendre de quelques biomasses (sur base de masse sèche) [7]

Type	C %	H %	O %	N %	S %	Cendre %
Déchets alimentaires	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Déchets de jardinage	47,8	6,0	38,0	3,4	0,3	4,5
Papier	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0
Papier carton	44,0	5,9	44,6	0,3	0,2	5,0
Plastiques	60,0	7,2	22,8	0,0	0,0	10,0
Bois	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5
Mais	42,1	6,5	48,9	1,2	0,1	1,5
Sorgho	45,8	5,3	42,3	1,0	0,1	6,6
Paille de blé	43,4	6,0	44,5	0,8	0,1	7,7
Ecales de tournesol	47,5	6,2	41,2	1,0	0,2	4,0

2.2. Propriétés de la biomasse:

Le choix du processus de conversion dépend des propriétés de la biomasse. Les principales propriétés sont :

- ❖ La teneur en humidité
- ❖ Composition élémentaire
- ❖ Les propriétés thermiques
- ❖ Pouvoir calorifique
- ❖ La teneur en cendres ou en résidus
- ❖ La teneur en métaux alcalins
- ❖ La teneur en cellulose, hémicellulose et lignine
- ❖ Densité apparente

2.3. Ressources de la biomasse:

D'une manière générale, les ressources de la biomasse accessibles sur notre planète peuvent être classées en six catégories à savoir :

Les produits issus de l'agriculture et de l'élevage destinés initialement à l'alimentation humaine ou animale, auxquels s'ajoutent des plantes dédiées à la culture énergétique, comme le miscanthus géant pour le bioéthanol et le colza pour le biodiesel [8].

- Les co-produits et résidus de l'agriculture et de l'élevage : pailles, pulpes, drèches, tourteaux, fumier de bovins, lisier de porcs, fientes de volailles ;
- Les ressources halieutiques : produits animaux de la mer et des zones humides et leurs déchets, algues et microalgues,
- Le bois des forêts qui fournit en majeure partie les ressources de bois-énergie, utilisées pour la cuisson et le chauffage.
- Les déchets naturels du bois et de la sylviculture (plaquettes, sciure) ainsi que ceux des industries du bois de construction (copeaux, sciure) et du bois d'emballage (cagettes, palettes, tonnellerie), à l'exception de ceux traités par des produits chimiques toxiques.
- Les déchets issus des industries agro-alimentaires, des habitations et des collectivités urbaines, souvent humides ou même liquides, parmi lesquels les boues des eaux

usées, les ordures ménagères et résidus organiques des déchetteries, les résidus de la distribution et des cafés-restaurants ou ceux des espaces verts [8]



Figure I.1. Les sources de la biomasse [9].

3. LES CONVERSIONS DE BIOMASSES:

La biomasse peut se valoriser sous forme d'énergie comme le biogaz le bioalcool ou sous forme de matière comme le compost et le digestat, cette valorisation est possible par le biais de trois modes de conversion :

- **Biochimique** : basée sur l'activité des microorganismes tel que la biométhanisation et la fermentation alcoolique,
- **Chimique** : basée sur l'action de produit chimique comme dans le cas de la transestérification,
- **Thermochimique** : basé principalement sur l'effet thermique tel que la combustion, la gazéification et la pyrolyse [10].

La figure montre les principaux procédés de conversion de la biomasse ainsi que les produits résultants de cette conversion

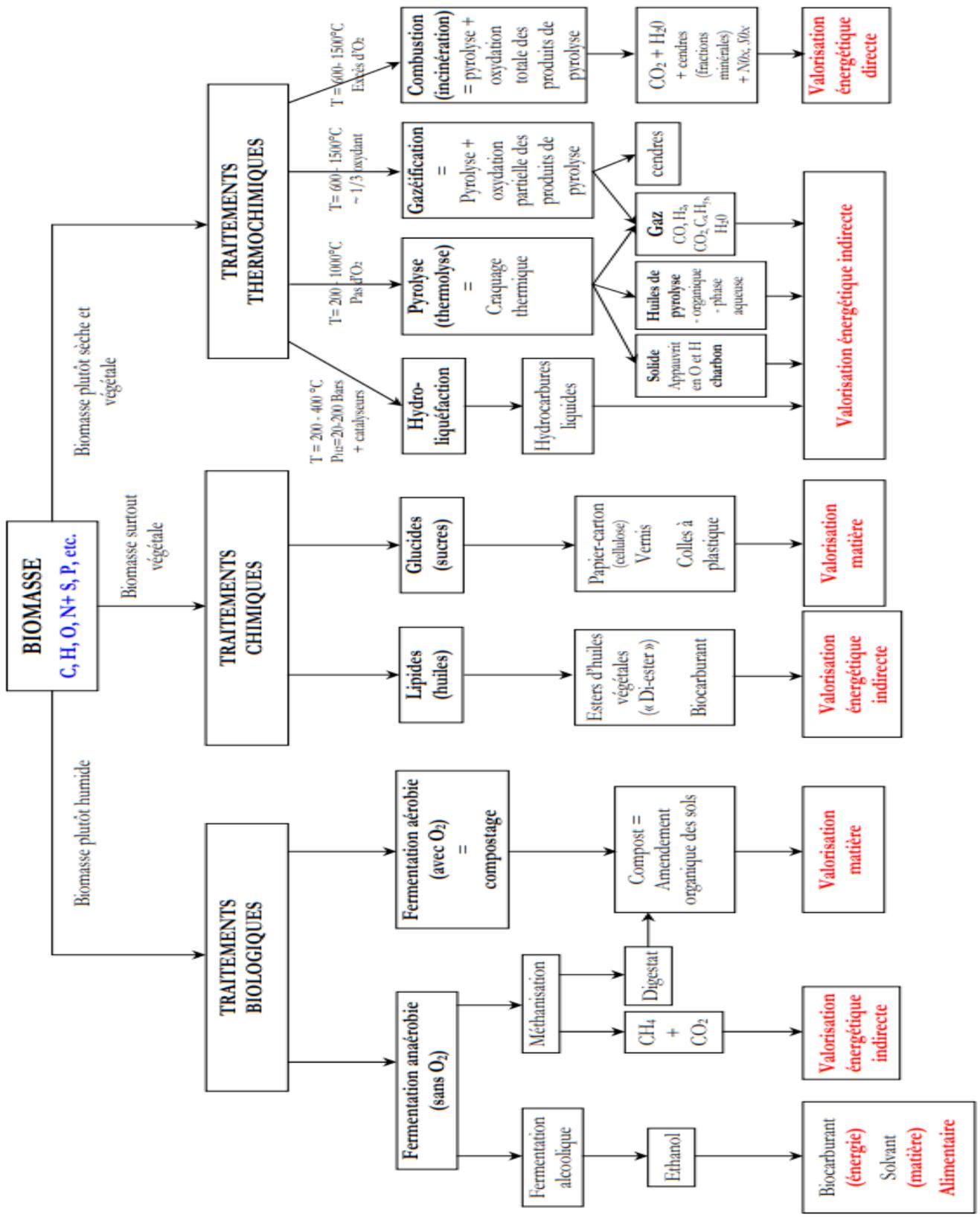


Figure I. 2.principaux modes de valorisation de la biomasse [11]

a- La voie sèche (transformations thermochimiques) :

La voie sèche est principalement constituée par la filière thermochimique, qui regroupe les technologies de la combustion, de la gazéification et de la pyrolyse.

- **La combustion :**

Méthode la plus évidente, et la plus ancienne, pour valoriser l'énergie de la biomasse, la combustion, permet une transformation directe de la biomasse en énergie thermique. Cette énergie thermique est ensuite utilisée directement ou transformée en électricité ou en chaleur. Contrairement aux autres voies thermochimiques, la combustion se réalise avec un excès d'air. La régulation de la quantité d'air injectée dans le foyer est très importante, car elle influence grandement le rendement de la combustion. Il faut injecter une quantité d'air suffisante pour assurer la combustion complète des gaz. Cependant, un trop grand excès d'air conduit à une baisse de rendement et à des émissions d'imbrûlés [4].

- **La pyrolyse :**

La pyrolyse est la conversion thermochimique de la biomasse en l'absence d'oxygène. Cette conversion commence à 300°C-550°C et va jusqu'à 700°C. Les conditions de pyrolyse peuvent être optimisées pour maximiser la production de liquides, solide (char) ou du gaz et dont la distribution dépend des conditions expérimentales appliquées, notamment la température à laquelle se produit la conversion, la vitesse de chauffe de la biomasse et la taille des particules. Il a été démontré qu'une vitesse de chauffe faible favorise la carbonisation tandis qu'une vitesse de chauffe très élevée (>100°C/s) facilite la production des matières volatiles par dépolymérisation ou fragmentation. La conversion de la biomasse en huiles pyrolytiques fait l'objet de nombreuses expérimentations et les rendements peuvent atteindre 70% [12].

- **La gazéification :**

La gazéification de la biomasse solide est réalisée dans un réacteur spécifique, le gazogène. Elle consiste à transformer à haute température (800 à 900 C°), en présence d'un gaz réactif, un combustible solide en un gaz combustible composé essentiellement d'hydrogène et de monoxyde de carbone et dont la quantité dépend des paramètres opératoires de la gazéification tels que la nature de la biomasse, le

type de réacteur, la température, la pression, le temps de passage ou encore la présence d'un catalyseur. Ce gaz combustible, après traitement et conditionnement peut-être valorisé en un gaz de synthèse permettant de générer une source hautement énergétique (entre 10 et 30 MJ/m³) [13].

b- La voie humide (transformations biochimiques) :

La principale filière de cette voie est la méthanisation.

Il s'agit d'un procédé basé sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique. Elle s'opère dans un digesteur chauffé (qui permet de maintenir une température optimum nécessaire à l'activité des bactéries) et sans oxygène (réaction en milieu anaérobie). Ce procédé permet de produire :

- Le biogaz (chaque type de biogaz a sa composition propre. Par exemple, le biogaz obtenu à partir d'ordures ménagères comportera plus d'eau que celui provenant de l'industrie agroalimentaire) qui est le produit de la digestion anaérobie des matières organiques ;
- Le digestat qui est le résidu solide et liquide généré par les procédés de méthanisation des déchets, il peut être traité pour être utilisé comme amendement ou engrais.

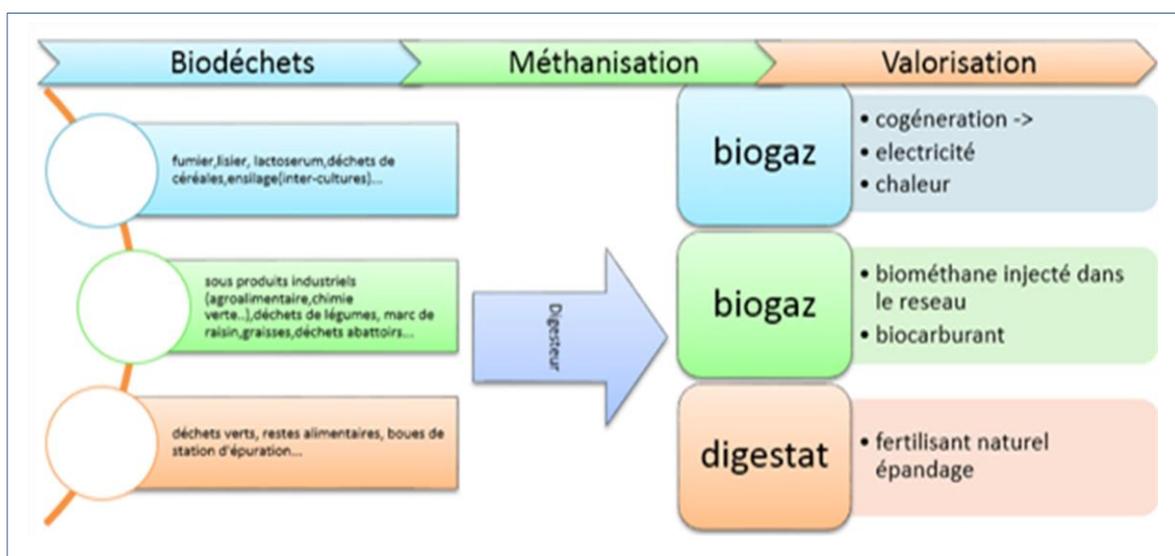


Figure I.3 : schéma de méthanisation.

c- Production de biocarburants :

Les biocarburants sont des carburants liquides ou gazeux créés à partir d'une réaction :

- Entre l'huile (colza, tournesol) et l'alcool dans le cas du biodiesel ;
- A partir d'un mélange de sucre fermenté et d'essence dans le cas du bioéthanol.

Il existe 3 générations de biocarburants :

- 1^{ère} génération** : biocarburants créés à partir des graines ;
- 2^{ème} génération** : biocarburants créés à partir des résidus non alimentaires des cultures (paille, tiges, bois) ;
- 3^{ème} génération** : biocarburants créés à partir d'hydrogène produit par des micro-organismes ou à partir d'huile produite par des microalgues.

Les biocarburants de 2^e et 3^e génération ont entre autres pour vertu de ne pas « occuper » un territoire agricole en compétition avec la production d'aliments pour l'homme. Leur maturité industrielle, tout particulièrement pour la 3^e génération, reste à établir.

Ces biocarburants peuvent prendre différentes formes :

- Des esters d'huiles végétales produits, par exemple, à partir du colza (biodiesel)
- De l'éthanol, produit à partir de blé et de betterave, incorporable dans le super sans plomb sous forme d'ETBE (éthyl tertio butylether). Cet ETBE favorise l'incorporation d'éthanol dans les essences (jusqu'à 15% du volume dans le SP95 et le SP98, jusqu'à 22% dans le cas du SP95-E10)

D'autres formes moins développées, voire simplement au stade de la recherche, existent aussi : carburant gazeux (biogaz, biométhane, dihydrogène), voire carburant solide (gazogène), etc [14].

4. DIFFERENCE ENTRE LE BIOGAZ ET LES BIOCARBURANTS :

En comparaison avec les sources d'énergie fossiles, le biogaz produit moins de CO₂. Les voitures fonctionnant au biogaz génèrent jusqu'à 80% de CO₂ en moins comparé à celles fonctionnant au diesel car le biogaz est un puissant gaz à effet de serre et sa captation est de toute façon hautement souhaitable et dans un biocarburant le dioxyde de carbone rejeté lors de la combustion n'augmente pas l'effet de serre. Le biocarburant est non polluant en matière de production de particules à cause de l'oxygène compris dans les plantes améliore la combustion et diminue le taux d'hydrocarbures imbrûlés ainsi que le taux de monoxyde de carbone [15].

5. AVANTAGES ET INCONVNIENTS:

Lors de l'utilisation et la transformation de la biomasse pour produire de l'énergie, cette dernière offre de nombreux avantages et inconvénients qui ont une influence sur l'économie et l'environnement. Parmi ses avantages et ses inconvénients, on cite :

a. Avantages

La biomasse est une ressource renouvelable lorsqu'utilisée et gérée de façon durable, et elle participe au traitement et à la destruction des déchets organiques et ces ressources sont disponibles à grande échelle [16].

- La biomasse peut être convertie en différentes formes d'énergie. Par exemple, le bois peut être traité et converti en gaz
- L'utilisation du bois-énergie maîtrise le coût de l'énergie sur le long terme puisque, à la différence des énergies fossiles, le combustible bois n'est que très peu influencé par les variations conjoncturelles du prix du baril de pétrole, cette énergie serait une bonne alternative au pétrole [17].
- La biomasse n'est pas inerte : après une période plus au moins longue, elle se dégrade et retourne à l'état gazeux (CO₂, CH₄, NH₃, etc.). Sa valorisation énergétique correspond à la maîtrise technologique de ces processus. Elle procure des énergies renouvelables (chauffage à la paille ou biogaz, etc.) et des amendements/engrais organiques ou minéraux qui se substituent aux énergies fossiles et aux fertilisants du commerce [18].

b .Inconvénients

- La production de biocarburants à un prix conséquent n'est pas encore totalement développée.
- Pour produire de la biomasse, il faut des terres agricoles, sauf qu'il y en a peu de disponible. Les cultures vivrières devront donc être rachetées ou abandonnées au profit de la production de biocarburants.
- La biomasse peut être polluante si elle est mal utilisée (par exemple ; un hectare de sol absorbe normalement 4 tonnes de dioxyde de carbone par an alors qu'un hectare mal-labouré rejette 1 tonne de dioxyde de carbone par an).
- L'inconvénient majeur de la mise en pratique de la biomasse est que le bois, qui devient source d'énergie après combustion, est souvent surexploité par les industriels. Ce qui provoque une déforestation. Cela peut avoir des effets nocifs sur la biodiversité. De plus, la combustion du bois rejette des éléments néfastes dans l'atmosphère [18].

6. BIOMASSE EN ALGERIE:

Parmi les différentes sources énergétiques renouvelables utilisées figurent celle de la biomasse. Elle constitue un gisement en continuelle augmentation en Algérie et présente une très large diversité de composition. Les déchets non traités présentent une source de pollution non négligeable, notamment les décharges, les centres d'enfouissement techniques, les rejets industriels...À cet effet, la valorisation des GES (gaz à effet de serre) émis par ces déchets à des fins énergétiques (sous forme de biogaz) est à envisager [19].

Le Nord de l'Algérie représente 10% de la surface du pays, soit 2 500 000 hectares. La forêt y couvre 1 800 000 hectares et les formations forestières dégradées en maquis 1 900 000 hectares. Le pin maritime et l'eucalyptus sont des plantes particulièrement intéressantes pour l'usage énergétique: actuellement elles n'occupent que 5% de la forêt algérienne. Le potentiel algérien de la biomasse se compose de la biomasse issue des forêts (environ 37 Mtep). Le potentiel récupéré est de l'ordre de 10%), des déchets urbains et agricoles (estimés à 1,33 Mtep/an) c'est à dire 5

millions de tonnes non recyclés). Dans le cadre d'une éventuelle mise en place d'un plan de développement de traitement et de valorisation énergétique des déchets pour la production de biocarburants en Algérie, la réalisation d'un inventaire des déchets et de la biomasse s'impose [19].

Seulement quelques expérimentations ont été réalisées sur la biomasse en Algérie notamment à l'Institut « National Agronomique d'El Harrach » vers les années quarante et au CDER en 1985. Des installations au niveau des internats surtout sont aussi rapportées.

7. CONCLUSION:

La biomasse, énergie renouvelable mondialement connue, présente de nombreuses qualités. En effet, son respect environnemental et sa quantité très importante font d'elle une des énergies renouvelables les plus utilisées sur notre planète. De plus, son renouvellement permet une utilisation régulière de la biomasse sans compromettre le développement des écosystèmes. Cette énergie est beaucoup moins polluante que les énergies fossiles car il n'y a pas de rejets de soufre dans les fumées et aucun impact sur l'effet de serre.

CHAPITRE II : DIGESTION ANAEROBIE : PRODUCTION DE BIOGAZ

1. INTRODUCTION:

Le biogaz est un gaz produit à partir de la biomasse, c'est-à-dire de la matière organique végétale et animale lors de la méthanisation. La méthanisation est un processus qui va dégrader la matière organique en biogaz dans un milieu sans oxygène (anaérobie) à l'aide de micro-organismes comme les bactéries, on parle aussi de la fermentation des déchets. Cela produit aussi un résidu appelé digestat que les usines envoient aux agriculteurs afin de fertiliser la terre.

Le biogaz de méthanisation est une énergie renouvelable peut être utilisée sous différentes formes : combustion production d'électricité et de chaleur, production d'un carburant, ou injection dans le réseau de gaz naturel après épuration [20].

2. DEFINITION DE LA DIGESTION ANAEROBIE :

La digestion anaérobie ou la méthanisation est la conversion de la matière organique humide sous l'action d'une communauté microbienne en absence d'oxygène pour produire un mélange gazeux appelé « Biogaz » composé principalement de méthane et de gaz carbonique avec des caractéristiques physico-chimique semblables à celle du gaz naturel. Un produit humide riche en matière organique partiellement stabilisée appelé digestat. Cette transformation est très répandue dans la nature, on la retrouve dans les marais, dans les intestins d'animaux, d'insectes... et de manière très générale lors du stockage de la matière organique en absence d'oxygène [21].

Le schéma suivant donne la structure générale d'une installation de méthanisation (figure II.1) :

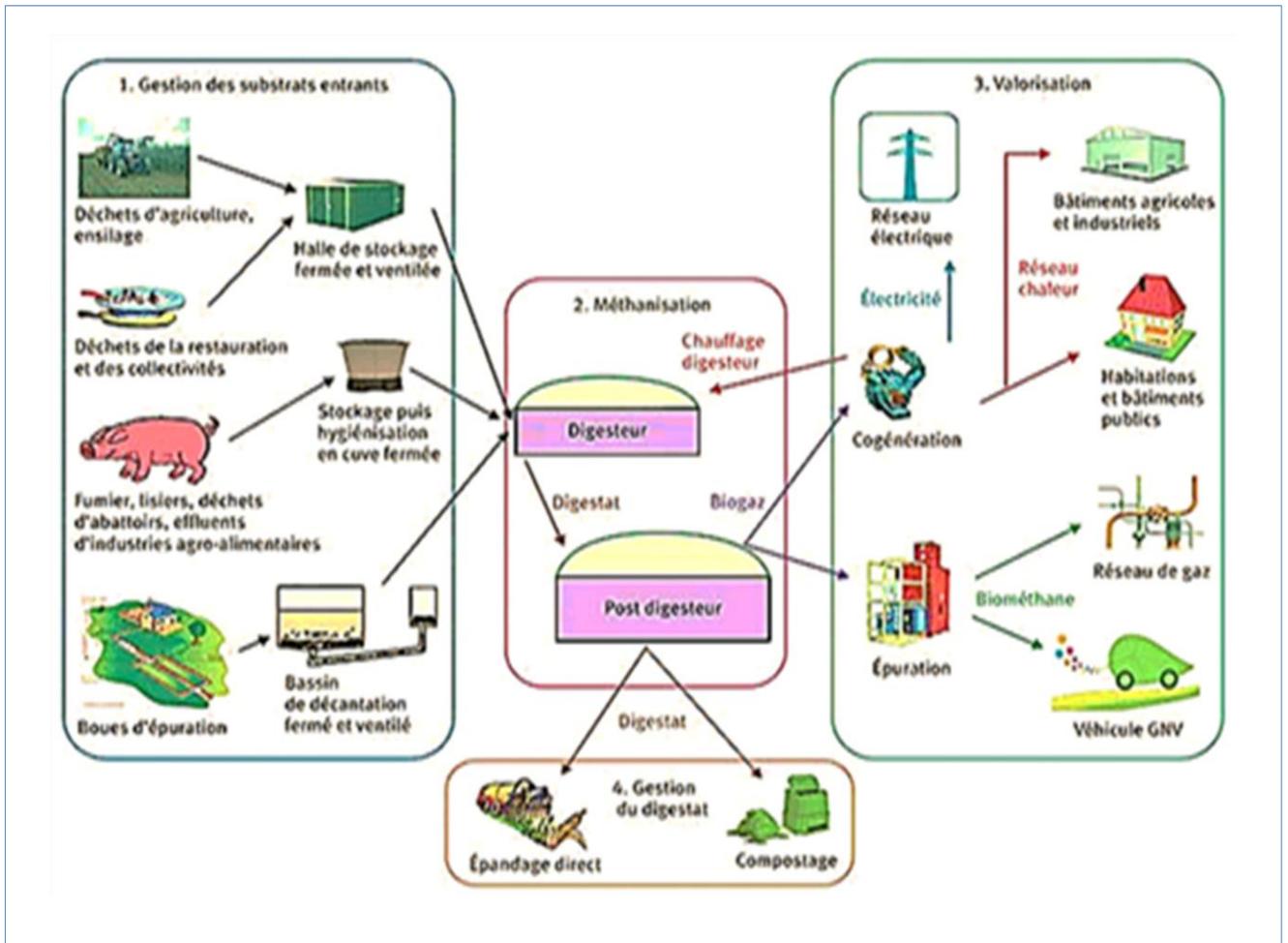


Figure :II.1 : Schéma général d'une installation de méthanisation [22]

3. HISTORIQUE DE LA METHANISATION :

L'utilisation de la digestion anaérobie ne date pas d'aujourd'hui, le biogaz semble avoir été utilisé au X^e siècle pour chauffer les bains en Assyrie [24]. Cependant, c'est à partir du XVII^e siècle que les scientifiques ont commencé à s'intéresser au processus de méthanisation, Boyle et Papin ainsi que Van Helmont ont découvert que la décomposition des plantes et des corps animaux produisait un gaz inflammable.

En 1776 le comte et savant italien Alessandro Volta collecta du gaz du lac de Côme et démontre que la formation de ce gaz dépend d'un processus de fermentation et qu'il peut former un mélange explosif avec l'air [24].

En 1808, le britannique Humphrey Davy démontre la présence de méthane dans les gaz produits lors de la décomposition de lisiers [22].

En 1821 le chimiste et physicien italien *Amedeo Avogadro* élucide pour la première fois la structure chimique du méthane (CH₄) [24].

En 1865 le nom "méthane" fut proposé et en 1892 il est confirmé par un congrès international de nomenclature chimique. Pendant ce temps, la présence de ce gaz est mise en évidence dans d'autres milieux (dont le fumier) et son origine est attribuée à l'activité microbienne.

En 1868, l'agronome Jules Reiset repère le dégagement de l'hydrogène photocarbone (gaz des marais), un gaz combustible en étudiant la dynamique de l'azote dans les fumiers. En 1896, le gaz issu des boues était utilisé pour l'éclairage des rues d'Exeter en Angleterre.

En 1897, un premier digesteur est construit par les Anglais en Inde à Matunga (près de Bombay) avec l'objectif de produire du carburant pour véhicule.

La recherche appliquée relative à la digestion anaérobie commença avec Buswell en 1920, ce dernier identifie les principaux processus de dégradation anaérobie et développe les premières filières à l'échelle de la ferme.

En 1923, le méthane est vendu pour la première fois en Allemagne aux usines publiques du gaz, au cours des années suivantes cette pratique est devenue de plus en plus courante en Europe.

Entre 1930 et 1940, plusieurs digesteurs entrent en service sur des stations d'épuration et la méthanisation connaît un regain d'intérêt durant la Deuxième Guerre mondiale pour suppléer le manque de carburants et les différents chocs pétroliers relancent l'activité biogaz [25].

De nos jours, les contraintes environnementales et les progrès technologiques réalisés donnent un nouvel attrait à ce mode de traitement des déchets organiques et un nombre important de systèmes technologiques de digestion anaérobie est en service pour le traitement de différents types de substrats et le développement est encore en marche

4. ETAPES DE LA DIGESTION ANAEROBIE :

La digestion anaérobie est réalisée en quatre phases clés successives (figure II.2). Les produits issus de chaque phase sont utilisés comme substrat pour les microorganismes dans les phases suivantes :

4.1 Hydrolyse:

Au cours de cette phase les macromolécules organiques (protéines, lipides, polysaccharides...) sont distinguées est convertie en monomères (acide aminé, acide gras, oses...) par un groupe de micro-organismes connus sous le nom de **bactéries hydrolytiques**.

Cette étape est déterminante pour la suite de la fermentation, car seules les molécules simples seront biodisponibles pour la suite du traitement. D'un point de vue cinétique l'hydrolyse est considérée comme une étape limitante [26].

4.2. Acidogènes:

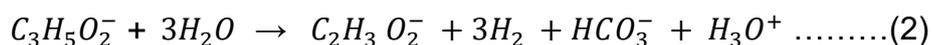
Les différents monomères issus de l'hydrolyse sont transformés en hydrogène, dioxyde de carbone, alcools et acides gras volatils, ce qui provoque une acidification du milieu. Les bactéries responsables de cette étape sont nombreuses, on les appelle les bactéries fermentaires [26].

Exemple de réaction : $C_2H_{12}O_6 \rightarrow 3C_2H_3O_2^- + H_3O^+ \dots\dots\dots(1)$

4.3 Acétogénèse:

Dans cette étape une grande partie des acides gras volatils (AGV) et des alcools est assimilée par les bactéries acétogènes autotrophes pour former de l'acide acétique (CH₃COOH). Une autre partie est convertie en hydrogène et dioxyde de carbone [27].

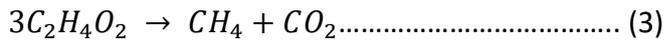
Exemple de réaction :



4.4. Méthanogénèse:

Au cours de cette dernière étape, les produits de l'étape précédente sont convertis en méthane par des microorganismes anaérobies stricts. Il existe deux voies de production du méthane

- **70%** du méthane est produit à partir de l'acétate par les bactéries méthanogènes acétoclastes, selon la réaction suivante :



- **30%** du méthane est produit à partir du dioxyde de carbone et de l'hydrogène par les bactéries méthanogènes hydrogénophiles, selon la réaction suivante :

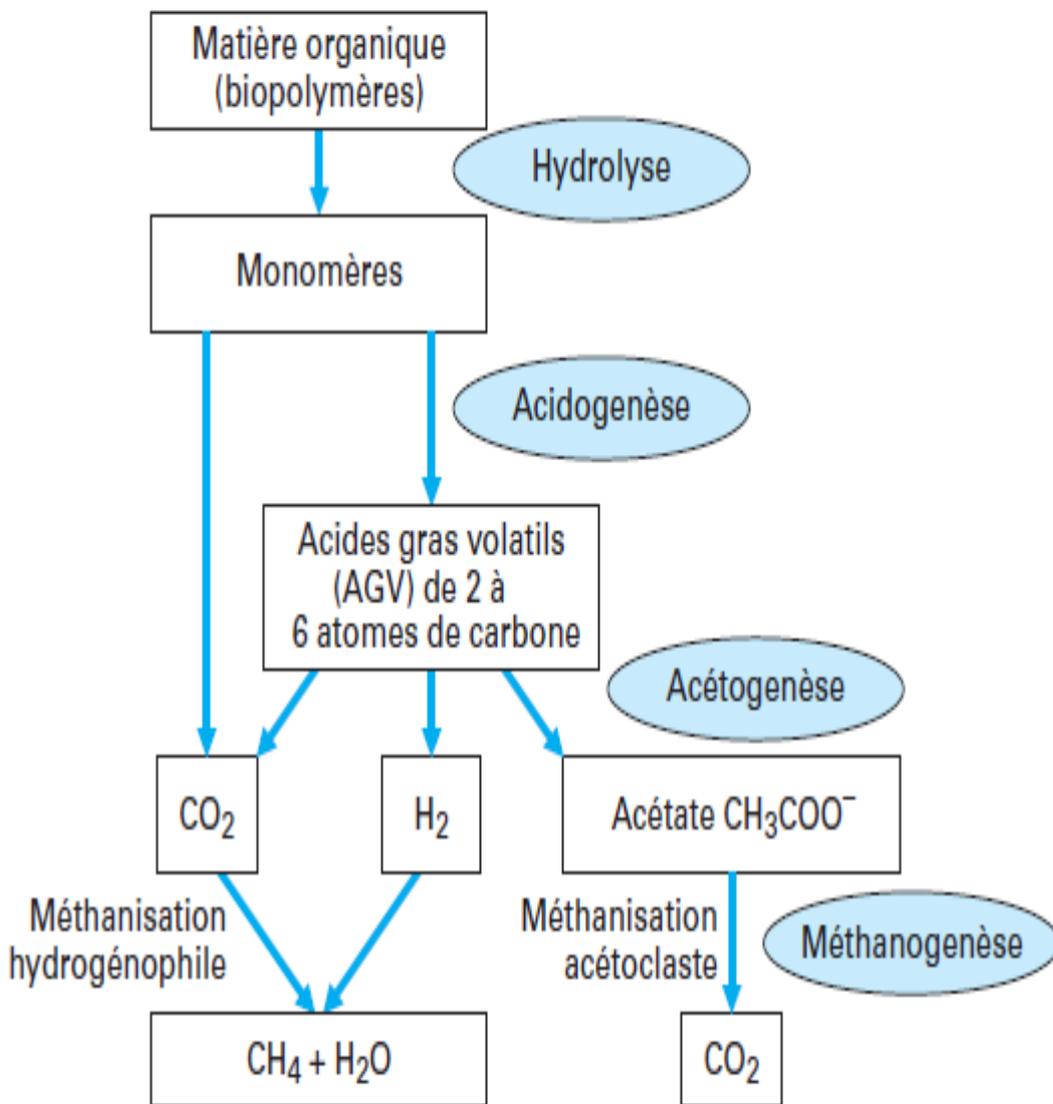
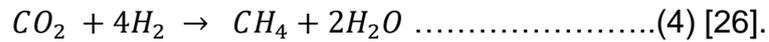


Figure II.2. Etapes de la digestion anaérobie de la matière organique [27]

5. LES FACTEURS INFLUENÇANT LA DIGESTION ANAÉROBIE :

Plusieurs facteurs interagissent entre eux et influencent la vitesse et l'efficacité de la digestion anaérobie. Les principaux sont :

5.1. Température :

La température est un paramètre important pour les procédés biologiques car elle affecte la cinétique de croissance des microorganismes et le transfert de matière. Il existe trois plages de température dans laquelle les microorganismes peuvent proliférer :

Les psychrophiles entre 15 et 25°C, les mésophiles entre 25 à 45°C avec un optimum aux alentours de 35°C et les thermophiles entre 45 et 65°C avec un optimum d'environ 55°C. En général, les procédés de traitement anaérobie sont plus sensibles aux changements de température que le processus de traitement aérobie [28].

5.2 .pH de fonctionnement :

Pour la majorité des procédés biologiques anaérobies, les microorganismes peuvent croître dans une plage de pH de 4 à 9. Généralement, la croissance maximale des microorganismes se situe entre 6,5 et 7,3. Les bactéries anaérobies sont sensibles aux variations de pH.

Pour cela, il est préférable d'ajuster le pH dans une plage optimale, afin de favoriser le traitement biologique des déchets organiques et assurer un bon fonctionnement du digesteur [29].

5.3 Anaérobiose :

L'oxygène est évidemment un inhibant (réaction anaérobie), cependant une petite quantité d'oxygène n'inhibe pas totalement et immédiatement la production de biogaz. Vu la présence d'un certains groupes de bactéries, appelées anaérobies facultatives, capable de tolérer et absorber une petite quantité d'oxygène évitant ainsi d'inhiber bactéries anaérobies strictes. Cependant l'absence de l'oxygène est une condition pour le développement des bactéries méthanogènes, qui sont anaérobie strict [30].

5.4 .Potentiels d'oxydoréduction :

Ce paramètre représente l'état de réduction du système, il affecte l'activité des bactéries méthanogènes. En plus de l'anaérobiose, les méthanogènes nécessitent un environnement, avec des potentiels redox inférieur à -400 mV pour initier leur croissance [29].

5.5 Taille particules :

La matière organique possède des formes très hétérogènes et la taille de ses particules est variée, cette taille affecte au déroulement du processus de méthanisation.

Les grandes tailles rendent la fragmentation de la matière organique difficile. Une taille minimale donne aux particules une surface spécifique plus appropriée pour l'action des bactéries au cours de la dégradation de la matière organique [31].

5.6 Teneur en matière sèche :

Ce paramètre permet de déterminer le type de la biomasse à traiter et choisir la technologie de digestion anaérobie à utiliser. Pour une teneur jusqu'à 10% la biomasse est considérée comme humide, tandis que pour une teneur comprise entre 10 et 50% la biomasse est considérée comme sèche.

Les micro-organismes présents dans le réacteur ont besoin d'une quantité d'eau élevée pour se développer correctement. La présence de l'eau permet le transport des matières solubles, dissoudre les nutriments ainsi que les substrats et assure leur diffusion depuis les milieux poreux jusqu'aux cellules bactériennes et par conséquent on peut dire que la production de biogaz augmente avec la diminution de la teneur en matière sèche [31] [29].

5.7 Taux de charge et temps de séjour :

Le taux de charge indique la quantité du substrat qu'est introduit dans le digesteur par unité de temps. Si le déchet est fortement biodégradable, il faut éviter les surcharges brutales car cela risque de déséquilibrer le processus et acidifier le milieu suite à la production trop rapide d'acide gras volatil (AGV).

Le temps de séjour ou de rétention est la durée moyenne durant laquelle la matière réside dans le bio digesteur avant d'être extraite sous forme de gaz ou de digestat. Généralement, le temps de séjour varie jusqu'à 40 jours, selon les caractéristiques et la composition du substrat, ainsi que la technologie utilisée pour le procédé de méthanisation [31] [32].

5.8 Rapport C/N

Le rapport carbone/azote est un paramètre important pour le bon déroulement de digestion anaérobie, Un rapport C / N compris entre 20 et 30 est considéré comme optimal pour la digestion anaérobie. Si ce rapport est trop élevé, l'azote est consommé rapidement par les méthanogènes pour répondre à leurs besoins en protéines et n'est plus disponible pour réagir sur la teneur en carbone résiduelle du matériau. En conséquence, la production de biogaz diminue.

Si le rapport est trop bas, de l'azote est libéré et s'accumule sous forme d'ammoniac. Ce qui augmente le pH du milieu. Lorsque le pH dépasse 8,5, il commence à exercer un effet toxique sur les bactéries méthanogènes [33].

5.9 Type du substrat :

Le type et la composition du substrat influent directement sur la quantité et la vitesse de production de biogaz. La biomasse lignocellulosique peut se dégrader et former du méthane, mais sa vitesse de décomposition est lente vue sa composition complexe qui est plus résistante à l'action des bactéries. Les résidus d'origine animale peuvent produire du biogaz mais leur potentiel est limité vue leur taux d'azote élevé qui perturbe l'activité bactériennes pendant la digestion anaérobie et diminue ainsi le taux du biogaz [31] [34].

5.10. Agitation

L'agitation permet de maintenir l'homogénéité du fluide et par la suite la stabilité du processus, elle permet aussi d'éviter la formation de croûtes et la décantation de particules denses, et d'éviter des gradients de température prononcés dans le digesteur, tout en interdisant l'entrée d'air dans le digesteur.

Un mélange très rapide peut perturber la communauté bactérienne tandis qu'une agitation trop lente peut entraîner un mélange inadéquat et un court-circuit [33].

5.11. Nutriments

Pour un bon fonctionnement des bio-digesteurs, en plus des matières organiques, sources de carbone et d'énergie, les bactéries nécessitent des nutriments et des oligo-éléments qui fournissent une condition physico-chimique appropriée pour une croissance optimale des micro-organismes. L'absence des nutriments rend les cellules microbiennes incapable de croître à une vitesse optimale pour produire de nouvelles cellules ce qui affecte la dégradation de la biomasse [29].

5.12. Inhibiteurs

Plusieurs substances peuvent avoir un effet nocif sur la digestion anaérobie on les nomme des inhibiteurs. Parmi ces inhibiteurs on a : les oxydants (oxygène, nitrates, sulfates, ...etc.) ; les acides gras volatils, les antibiotiques, l'ammoniac, les détergents...etc. [35]

6. LES TYPES DE REACTEURS DE LA METHANISATION :

Le digesteur est une cuve étanche dans laquelle un ensemble de substrats séjourne afin de subir une digestion, plusieurs concepts et technologies existent et peuvent être divisées selon différentes critères comme :

6.1. Selon le mode d'alimentation :

Selon le mode d'alimentations, les digesteurs anaérobies peuvent être classés en trois catégories :

- **Les digesteurs continus:** le digesteur est alimenté de façon continue, avec une quantité entrante de matières équivalente à celle évacuée. Toutes les étapes de la digestion anaérobie se déroulent sans interruption ce qui entraîne une production constante de méthane.

Ce type de réacteur est adapté aux grandes installations, et peut être classé en trois systèmes principaux :

- ❖ Système à cuve verticale ;
- ❖ Système à cuve horizontale ;
- ❖ Système à « cuves multiples »

- **Les digesteurs discontinus (batch).** Sa conception est simple et est adaptée à plusieurs types de biomasse, l'alimentation se produit en séquence. Lorsque le dégagement du biogaz chute ou devient nul, le réacteur est vidé et un nouveau lot y est introduit.
- **Les digesteurs semi continu (Fed batch).** C'est une combinaison du système continu et système batch. Son alimentation se fait progressivement sans retirer le digeste avant la fin du processus [32] [36].

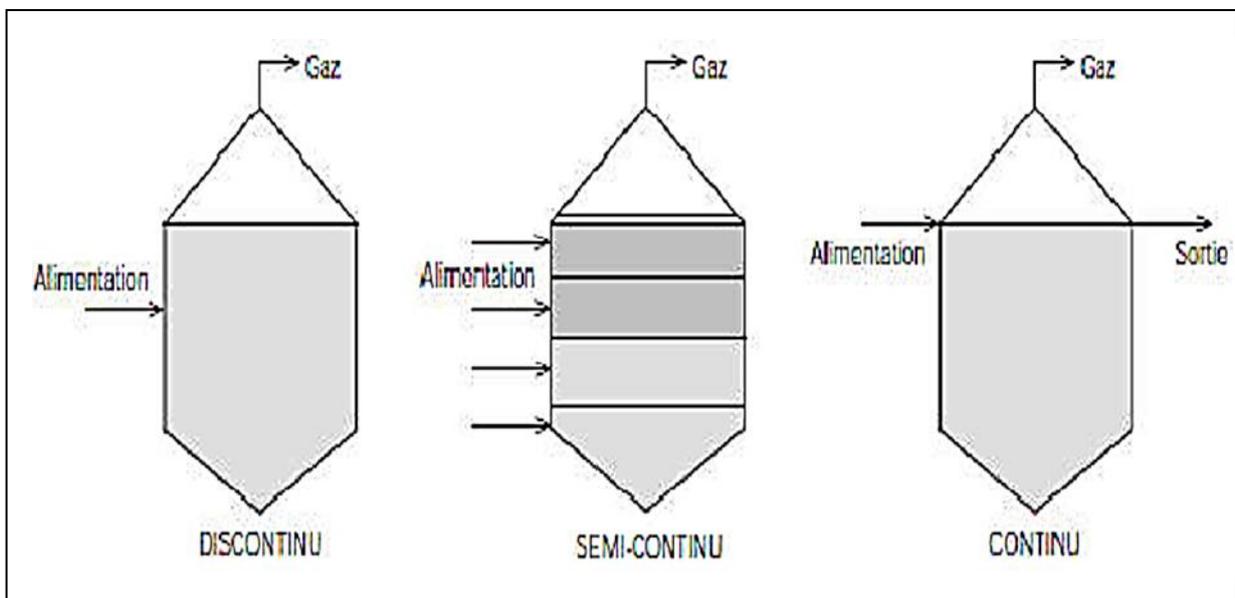


Figure II.3: Les types de digesteur selon Le mode de l'alimentation [37]

6.2. Selon le type de substrat

Cette classification de digesteur dépend de la teneur en matière sèche, et on distingue trois catégories :

- **Solide** : teneur en matière sèche >15% ;
- **Semi-solide ou pâteux** : teneur en matière sèche comprise entre 5 et 15 % ;
- **Liquide** : teneur en matière sèche inférieure à 5%.

6.3. Selon le nombre d'étape :

➤ Le procédé en mono-étape

Toutes les étapes de la digestion se déroulent dans le même réacteur, ils sont exploitables en continu ou en batch et principalement appliqués pour des substrats allant jusqu'à 40% de MS.

➤ Le procédé en bi-étape

La phase d'hydrolyse et l'acidogène se déroule dans un premier réacteur, et la méthanogènes dans un second réacteur. Cette séparation des phases, réduit le risque d'intoxication des cellules méthanogènes, et réduit le temps de dégradation de la matière solide [38] [37].

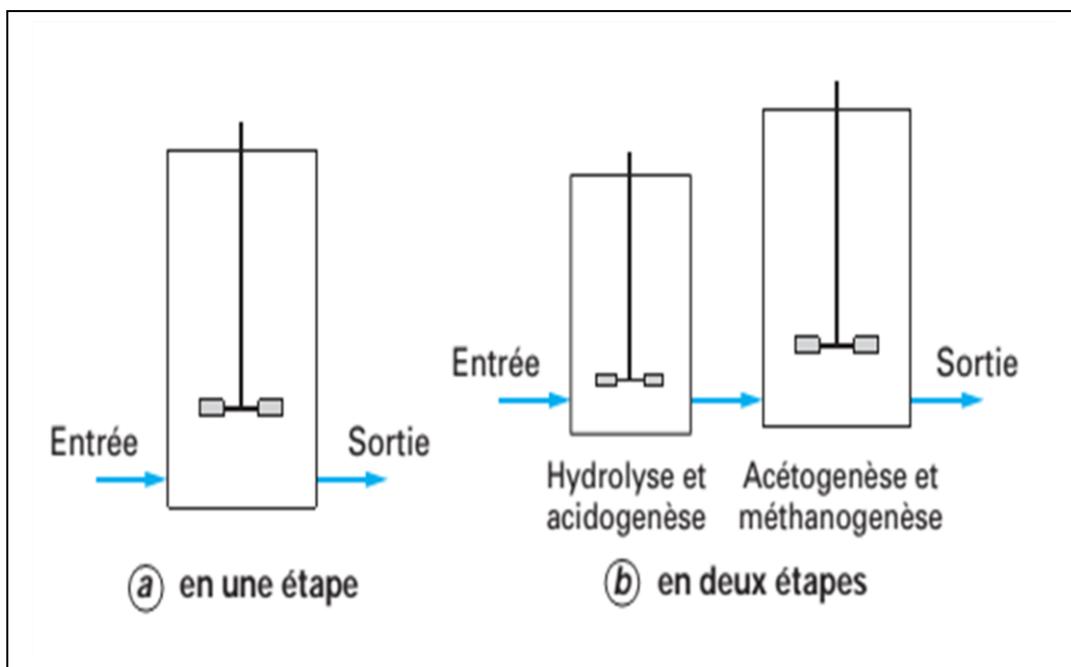


Figure II.4 : Digesteur anaérobique en une (mono) et deux (bi) étapes [38].

Le choix d'un digesteur dépend de plusieurs paramètres, comme la nature du substrat (solide, liquide, semi liquide), sa composition et sa quantité.

7. LES PRODUITS DE LA DIGESTION :

Lors de la dégradation de la matière organique par digestion anaérobique on a une production d'un mélange gazeux qui peut être utilisé comme source d'énergie appelé

biogaz et un résidu appelé digestat qui peut être utilisé comme fertilisant pour les sols agricoles [39].

7.1. Le digestat :

Le digestat est le produit résidu de la méthanisation, l'azote, le phosphore, le potassium, ainsi que les composés inorganiques ou bio-réfractaires (plastique, composés ligneux...) présents initialement dans le substrat, sont concentrés dans les fractions liquide ou solide du digestat.

Dans plusieurs cas, la fraction solide du digestat est compostée puis utilisée comme amendement des sols. La partie liquide qu'on appelle l'éluat, peut être utilisée directement comme fertilisant liquide à cause de sa richesse en éléments nutritifs [39] [40].

7.2. Biogaz :

Le biogaz issu des unités de méthanisation de la biomasse est principalement composé de méthane et de gaz carbonique. Mais il peut contenir d'autres gaz qui se sont formés lors de la dégradation biologique comme les composés soufrés (H_2S , mercaptans), l'ammoniac NH_3 , les composés halogénés (F, Cl...), les composés organo-siliciés (siloxanes) etc.

Le biogaz produit contient aussi de la vapeur d'eau à saturation mais également des gaz provenant des molécules volatiles présentes dans le substrat d'origine.

Certains de ces gaz minoritaires peuvent avoir un impact sur les procédés de valorisation en causant une corrosion des équipements et/ou des dépôts, ce qui entraîne une usure prématurée des installations en particulier des pièces des moteurs. Ce qui nécessite de prévoir une étape de purification du biogaz avant sa valorisation [40].

La quantité et la composition chimique du biogaz produit dépendent de la nature et composition du substrat, le pH, la teneur en matières Sèches du substrat, le rapport carbone / azote, le temps de séjour dans le digesteur, l'homogénéité et la granulométrie du substrat [30] [35].

La composition du biogaz varie selon la biomasse convertie et le temps de traitement. Le méthane et le CO_2 sont les deux principaux gaz qui compose le biogaz, d'autre gaz

sont présents en faibles concentrations comme le H₂S, le NH₃ en plus de la vapeur d'eau jusqu'à son point de saturation.

Ces gaz malgré leur faible concentration doivent être traités selon l'utilisation prévue pour le biogaz afin de ne pas endommager les équipements [39].

Le tableau II.1 indique la composition moyenne du biogaz.

Tableau II.1 : Composition moyenne du biogaz [39].

Biogaz	Teneurs habituelles
CH ₄	55-80%
CO ₂	20-45%
H ₂ S	0-1.5%
NH ₃	0-0.5%
H ₂ O	Saturé

8 .PURIFICATION DU BIOGAZ

Le biogaz nécessite une étape de purification avant d'être utilisé, car il peut contenir des substances nuisibles comme le sulfure d'hydrogène (H₂S) et le dioxyde de carbone (CO₂) qui peuvent diminuer son pouvoir calorifique et endommager les équipements de valorisation [35].

Le choix du type de traitement dépend de son mode de valorisation envisagé. Le tableau II.2 montre les substances polluantes du biogaz, qui doivent être éliminés en fonction du mode de valorisation.

Tableau II.2 : purification de biogaz requise en fonction du mode de valorisation [41].

	H ₂ S	CO ₂	Eau	Siloxanes	Composés halogénés
Chaudière à vapeur	✓	X	X	✓✓	X
Moteurs de cogénération	✓✓	X	✓✓	✓✓	✓✓
Micro-turbines	✓	X	✓✓	✓✓	✓✓
Production de H ₂ /Méthanol	✓✓	X	✓✓	✓✓	✓✓
Combustible pour véhicules	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
Injection dans le réseau de gaz naturel	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
X : élimination non nécessaire ✓ : élimination recommandée ✓✓ : élimination nécessaire					

Plusieurs technologies de purification de biogaz existent, le tableau II.3 montre quelque'une de ces technologies.

Tableau II.3 : Quelques techniques d'épuration de biogaz [42].

Composés à éliminer	Technique
Eau	Elimination de la vapeur d'eau à l'aide d'un purgeur (piège à l'eau)
Composés soufré	Adsorption sur charbon actif, ajout de chlorure de fer, filtration sur filtre d'oxyde de fer
Composés organohalogénés	Adsorption sur charbon actif
CO₂	Barbotage dans une solution de chaux

9. LES DIFFERENTS MODES DE VALORISATION DU BIOGAZ :

Le biogaz est utilisé principalement comme source d'énergie. L'énergie présente dans le biogaz est directement proportionnelle à sa concentration en méthane. Un mètre cube de biogaz avec 60 % de méthane correspond à 0,6 l de mazout ou à 5,8 kWh d'électricité [39].



Figure II.5 : Equivalence énergétique du biogaz

Plusieurs modes de valorisations de biogaz existent, certains sont exploités à l'échelle industrielle tandis que d'autres restent plus marginaux. Le choix de la voie de valorisation dépend de plusieurs critères comme la qualité du biogaz, sa stabilité ainsi que les besoins locaux.

Le biogaz est un composé à haute teneur en méthane, ce qui fait de lui un proche parent du gaz naturel fossile. Sa valeur énergétique moyenne varie de 5 à 10 kWh/Nm³, (en fonction de la teneur en méthane).

Généralement le biogaz peut être utilisé pour produire de l'énergie Thermique et/ou électrique. Tout comme il peut être utilisé comme un combustible fossile [43].

On distingue quatre types de valorisation:

- Valorisation thermique en chaudière ;
- Valorisation électrique par turbine à vapeur ou groupe électrogène ;
- Valorisation en carburant automobile ;
- Valorisation par injection dans le réseau de gaz de ville.

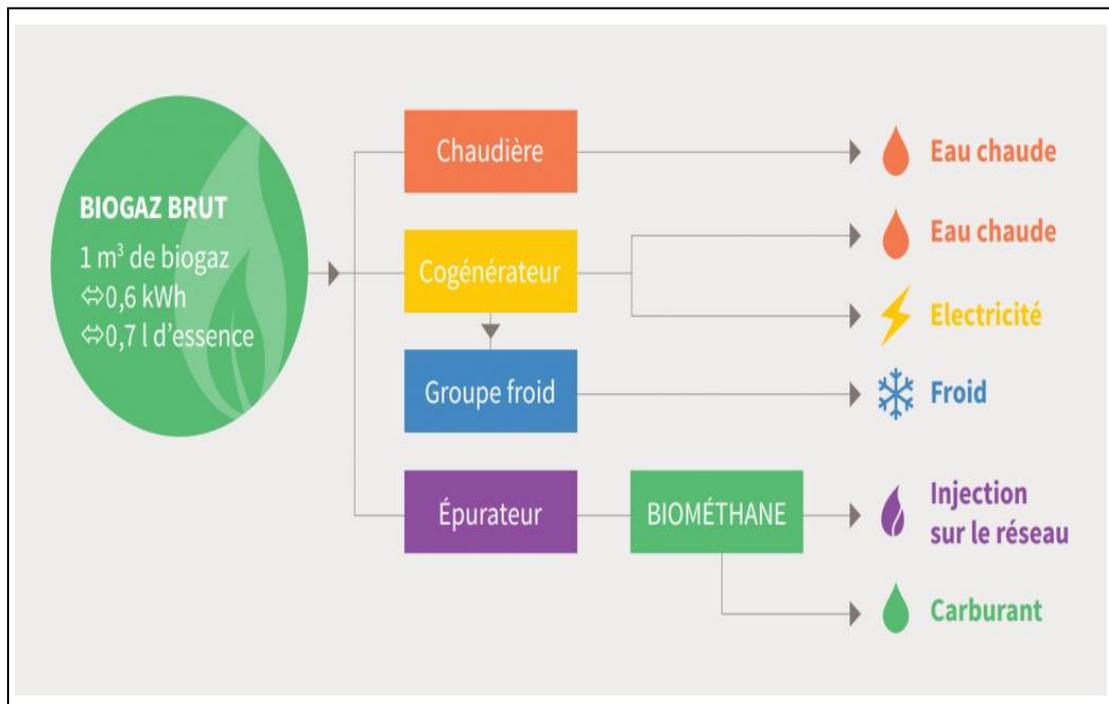


Figure II.6 : Différentes voies de valorisation du biogaz.

9.1 Valorisation thermique :

La valorisation du biogaz sous forme de chaleur est la voie la plus ancienne et la mieux maîtrisée.

La chaleur de combustion du biogaz peut servir pour la production d'eau chaude, de vapeur à moyenne ou haute pression, ou bien dans des fours de procédés. D'une manière générale, les valorisations thermiques nécessitent des débouchés de proximité la chaleur est utilisée soit in situ pour faire fonctionner l'installation de méthanisation, soit pour faire fonctionner des structures proches de l'installation.

9.2 Valorisation électrique :

La production d'électricité peut être envisagée lorsque le volume de biogaz produit est important. Le biogaz peut alimenter un moteur à gaz (ou une turbine), qui produit de l'électricité. La cogénération produit de l'électricité et de la chaleur. La chaleur peut être utilisée pour le chauffage des digesteurs et le reste peut servir à tout autre usages : séchage du digestat, production d'eau chaude, alimentation d'un chauffage domestique.

L'électricité produite peut être utilisée directement sur site pour assurer la ventilation des bâtiments l'éclairage et le fonctionnement des différents équipements. Lorsque les réseaux distribution d'électricité le permettent, il est possible d'alimenter le réseau avec surplus d'énergie produite [44].

9.3 Valorisation sous forme de carburant automobile :

Cette utilisation nécessite une grande pureté du biogaz avec 96% de méthane au minimum et une teneur en eau inférieur à 15 mg/ Nm³.

Cette technique permet d'utiliser, au même titre, le biogaz épuré afin d'avoir un biogaz comparable au gaz carburant « GPL » (gaz propane liquéfié) utilisé comme carburant de véhicules [30] [42].

9.4 Valorisation par injection dans le réseau de gaz de ville :

Le biogaz est épuré et enrichi avant d'être injecté dans le réseau de gaz naturel et pour les mêmes utilisations que ce dernier (cuisson, chauffage) la composition finale du biogaz injectable ainsi que sa pression dépendent des spécifications imposées par le gestionnaire du réseau. Ces dernières portent principalement sur les teneurs en méthane, en gaz carbonique, en hydrogène sulfuré et en oxygène. Le gaz injecté doit être odorisé avant l'injection [43].

10. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA DIGESTION ANAEROBIE :

10.1 Les avantages :

- Réduction des gaz à effet de serre
- La diversité de forme énergétique obtenue à partir du Biogaz (chauffage, cogénération d'électricité, froid, carburant).
- Adaptation du procédé aux faibles températures.
- Simplicité et flexibilité du système de digestion.
- Faible consommation d'énergie.
- Besoin de peu d'éléments nutritifs ou de produits chimiques pour le fonctionnement.
- Adaptation des bactéries pour la destruction de nombreux produits toxiques.
- Réduction de plusieurs bactéries pathogènes.
- Intérêt agronomique, par digestat qui présente un fertilisant riche en nutriment.
- Procédé adapté avec différents déchets biodégradables.

10.2 Les inconvénients :

- Forte sensibilité aux composés toxiques
- Difficulté d'enlever les nutriments ou les cellules pathogènes.
- Période de démarrage variable et peut être très longue selon la nature du déchet traité.
- Dégagement des mauvaises odeurs.
- Une forte dépendance du pH et sensibilité aux variations environnementales
- Une écologie microbienne complexe, impliquant différents types de microorganismes ce qui rend difficile l'obtention des conditions optimales simultanément pour tous les organismes.

11. CONCLUSION :

La digestion anaérobie, ou bio méthanisation, est un procédé très ancien qui permet de mettre en valeur la matière organique non utilisable et/ou qui est classé comme déchet. La méthanisation contribue efficacement à la sauvegarde de l'environnement par la valorisation des déchets de nature organique (déchets d'abattoir, eaux usées, ordures ménagères) pour donner naissance à un combustible à haute valeur énergétique et de ce fait elle permet de réduire le recours aux énergies fossiles.

CHAPITRE III: MATERIELS ET METHODES

1. PRÉSENTATION DE LIEU DE STAGE

Cette étude a été réalisée au niveau du laboratoire de division thermique (Équipe Bioconversion) de l'Unité de recherche en énergie renouvelable en milieu saharien URER-MS (Wilaya d' Adrar). Il s'agit de collecter, exploiter, traiter et analyser l'ensemble des données nécessaires à une évaluation précise des gisements solaire, éolien et de biomasse dans les régions sahariennes.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL :

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'ensemble des dispositifs expérimentaux et toutes les méthodes d'analyses utilisées.

2.1 Préparation des échantillons (Biomasse=substrat) :

Notre échantillon est un mélange des déchets ménagers fraîche et cuit comme le montre la photo III.1



Photo III .1: Substrats utilisés. (a) déchets frais, (b) déchets cuit.

Le substrat utilisé dans cette étude pour l'alimentation de digesteur, est constitué des déchets ménagers qui sont principalement composés des déchets de cuisine. Nous avons effectué un prétraitement physique par un broyage mécanique des substrats pour assurer une homogénéisation de l'échantillon (photo III. 2).

Dans ce travail, nous suivons certains des facteurs de revenu qui contrôlent la production du biogaz:

2.2 La matière séchée de l'échantillon (MS):

Avant d'entamer les mesures de la MS, on broie d'abord les ingrédients pour obtenir un mélange homogène, est ainsi recommandé.



Photo III. 2: Mélange homogène (broyées).

- Nous choisissons trois creusets vides photo 3-a, numérotées 1, 2, 3. Nous pesons ces creusets vides séparément avec une balance.
- Nous prenons une masse du mélange homogène photo 3-b et 3-c ($M=15g$). Ensuite, nous mettons la même valeur dans chaque creuset . Puis on mesure un poids (substrat + poids de creuset), soit M_1 la masse de cette prise.

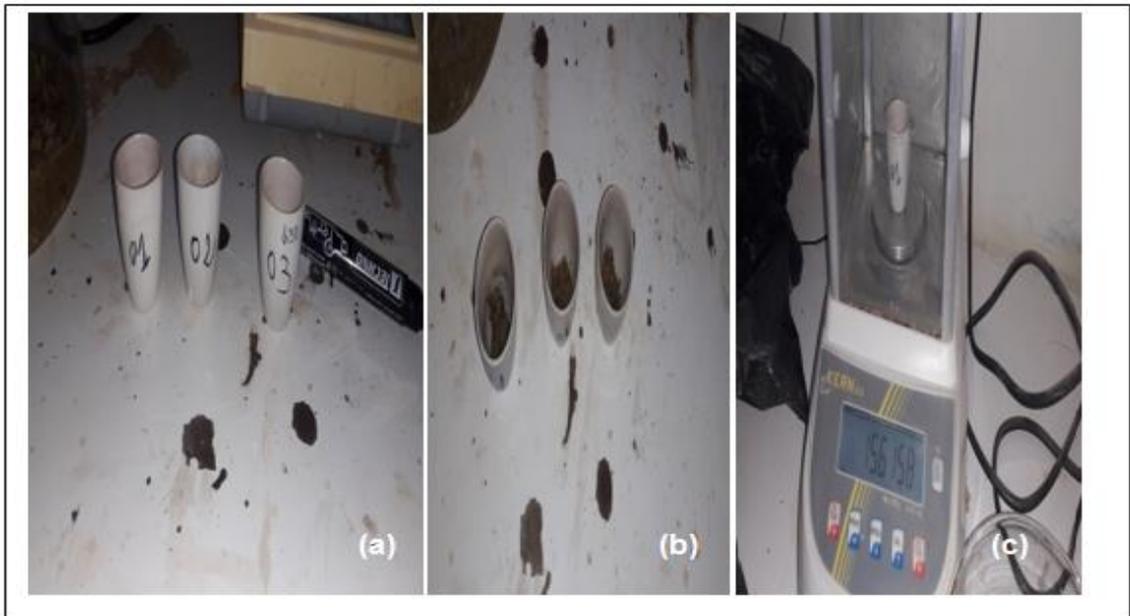


Photo III. 3: Les échantillons dans creuset (a) creusets vides, (b) creuset + substrat et (c) poids substrat +creuset.

Nous prenons les trois échantillons et les mettons dans une étuve à 105°C photo 4-a. Chaque deux heures la capsule est refroidie dans un dessiccateur avant d'être pesée, jusqu'à ce que le poids soit constant entre deux pesés soit M2 la masse de l'échantillon après séchage photo 4-b.



Photo II. 4: (a) étuve et (b) dessiccateur

La matière sèche s'obtient selon la méthode de Michaud :

$$MS\% = 100 \times \frac{M_2}{M_1} \dots \dots \dots (6)$$

M1 : Masse de l'échantillon avant dessiccation.

M2 : Masse de l'échantillon après dessiccation.

2.3. La matière organique (MO) :

Une prise d'essai M2 préalablement séchée est calcinée à 550 °C, pendant 2 heures dans un four à moufle. Le pourcentage en matière organique (MO) est obtenu par différence de pesée entre la masse de l'échantillon séché à 105 °C et la masse de l'échantillon après calcination M3. On en déduit le pourcentage de matière organique dans l'échantillon sec.

Le calcul de MO, s'obtient selon la méthode de Michaud

$$MO\% = 100 \times \frac{M_2 - M_3}{M_2} \dots \dots \dots (7)$$

M2 : masse de l'échantillon après dessiccation (g)

M3 : masse de l'échantillon après calcination (g)

MO% : pourcentage de matière organique contenue dans l'échantillon.



Photo III.5 : L'échantillon dans un four à moufle

2.4. Mode opératoire de la méthanisation par digesteur utilisé

2.3.1 Description du digesteur:

Les essais ont été réalisés dans des digesteurs de type discontinu (Batch), ces digesteurs en verre, très simple (Photo III.6), permettant d'assurer l'anaérobie de milieu de culture. Les réacteurs sont munis de deux trous, le premier pour le prélèvement des échantillons liquides à l'aide d'une seringue et l'autre pour assurer l'échappement du gaz pour la mesure du volume du biogaz produit.

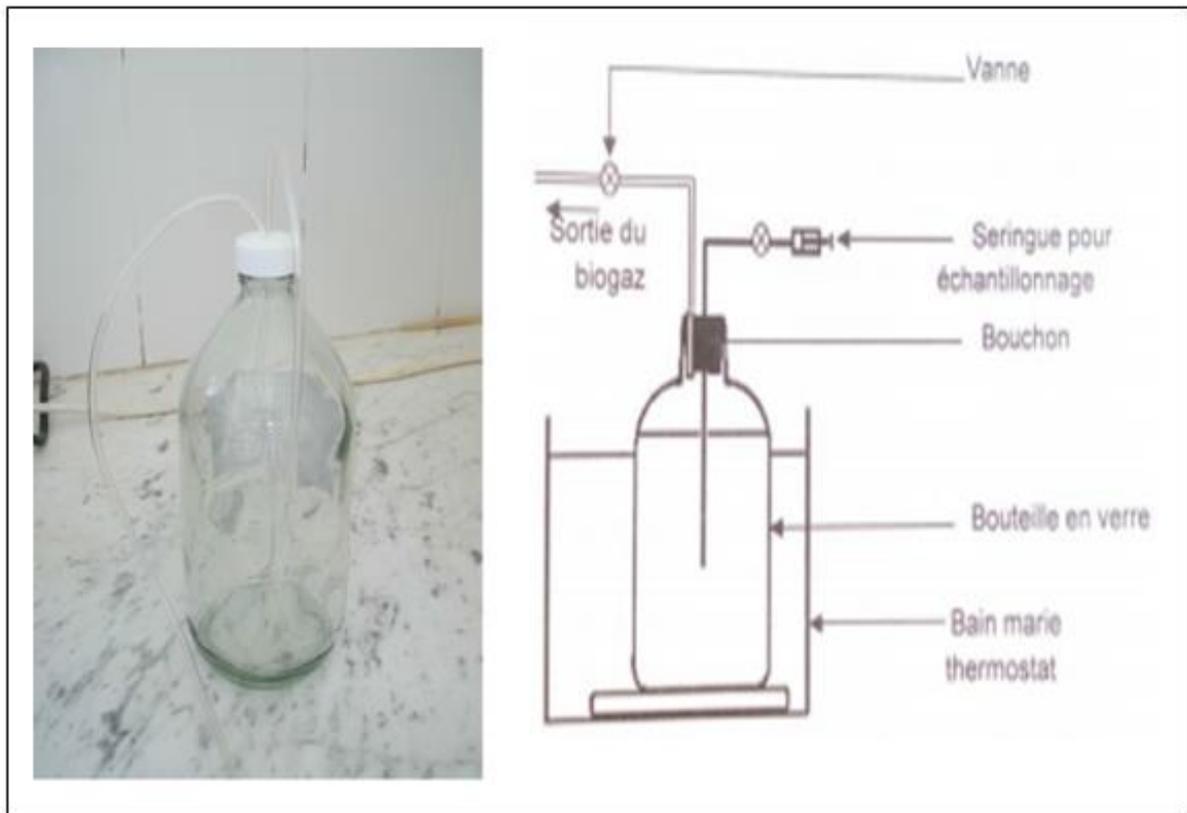


Photo III. 6: Digesteur vide.

Pour obtenir du gaz, nous préparons trois digesteurs D_1 , D_2 et D_3 . Nous prenons un échantillon du mélange homogène masse égale 53 g, puis le mettons dans chaque digesteur de la même quantité, puis remplissons les digesteurs avec l'eau distillé jusqu' à 1L et les fermons bien pour qu'il n'y ait pas de fuite. Et surveiller également le pH de la solution.

2.3.2 Analyse physico-chimique de digestat liquide :

Le contrôle des digesteurs est nécessaire pour assurer la réussite de l'opération. A cause de la complexité du processus de la digestion anaérobie due à la sensibilité des groupes microorganismes à plusieurs facteurs, il est important de pouvoir détecter le déséquilibre de processus au début et donc l'action peut être prise à temps pour empêcher l'échec du processus. Pour cela pendant la durée de la digestion, nous avons suivi les paramètres du fonctionnement et paramètres d'épuration.

***Paramètres du fonctionnement :** Dans cette étude on a suivi les paramètres qui nous renseignent sur le fonctionnement du réacteur tel que le pH et le volume du biogaz total AGV et TAC.

- **pH**

Le pH est un facteur important pour la digestion anaérobie. La variation du pH nous renseigne sur le déroulement de la réaction de dégradation des matières organiques.

Les mesures de pH sont réalisées à l'aide d'un pH-mètre (marque Basic.20) photo III.7 dans milieu liquide photo III. 8. La calibration du pH-mètre est faite à température ambiante en utilisant une solution tampon de pH=7, puis une autre solution tampon de pH=3.



Photo III. 7: pH-mètre

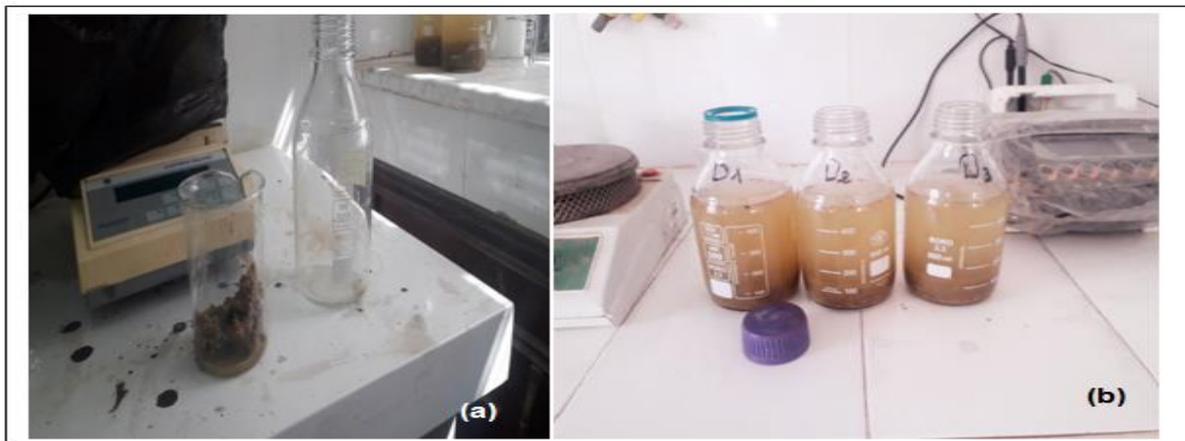


Photo III. 8: (a) biomasse solide (b) biomasse liquide

- **Volume du biogaz produit**

Sur le bouchant nous avons confectionné deux sorties. La première sortie sert pour le prélèvement des échantillons à l'aide d'une seringue et la deuxième permet au biogaz produit de s'échapper. Cette sortie est reliée au dispositif de mesure du volume du biogaz. Les réacteurs sont maintenus à une température de 37°C (plage mésophile) dans un bain marie chauffé et régulé par un thermostat et agité manuellement en le secouant une à deux fois par jour pour assurer un bon contact entre les bactéries et les déchets dans le milieu (photo III.9).



Photo III. 9: Les réacteurs dans un bain marie chauffé et régulé à 37°C (milieu aérobie).

Après une journée d'incubation (méthanisation), nous commençons à mesurer le volume de biogaz produit à l'aide des équipements suivants (photo III.10):

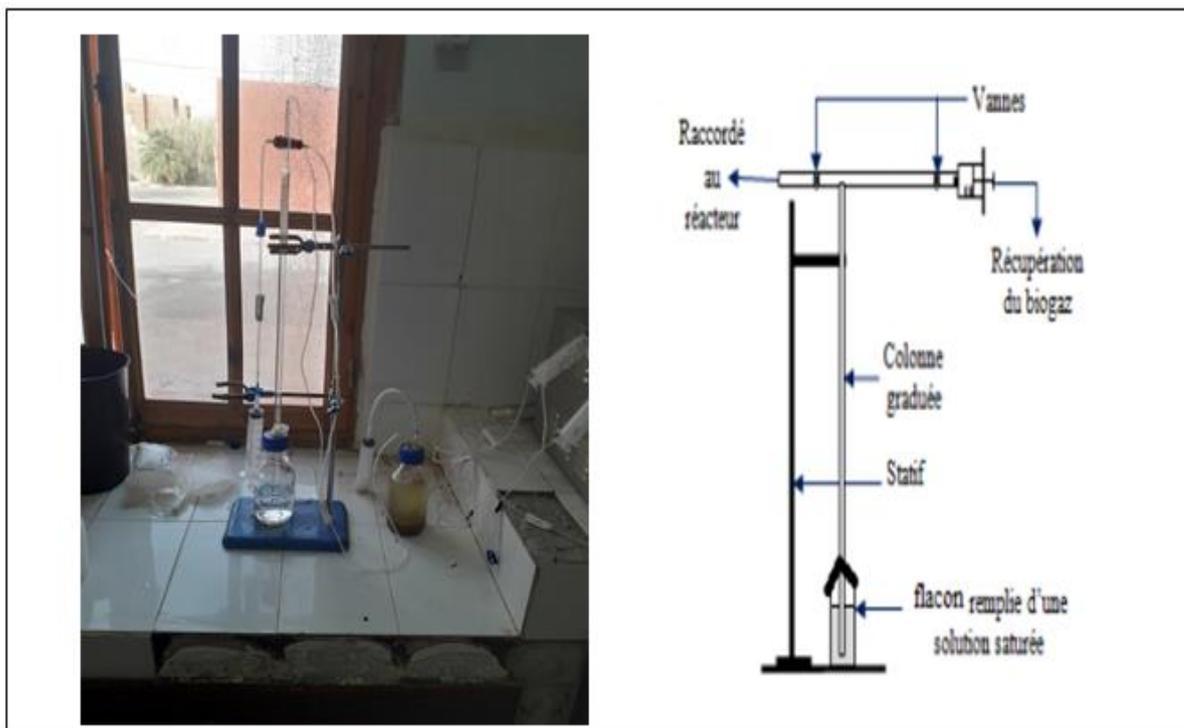


Photo III. 10: Photo et schéma de dispositif de mesure du volume du biogaz produit.

Les productions gazeuses sont suivies avec des fréquences journalières, le volume de biogaz est mesuré à l'aide d'un système hydraulique (déplacement du liquide), ou le gaz produit en sortie du digesteur, passe dans une burette graduée plongée dans une solution saturée en sel (acide citrique 5%, NaCl 20%, pH=2) (aucune réaction chimique entre le biogaz produit et cette solution), ce qui va déplacer le niveau du liquide contenu dans la burette et indique ainsi le volume du biogaz produit.

- **Acides organiques et Acides gras volatils :**

Pour surveiller et contrôler la qualité de fermenteur vis-à-vis des acides organiques et acides gras volatils, nous avons dosé de titre alcalimétrique complet (TAC) et des acides gras volatils (AGV) :

***Le titre alcalimétrique complet (TAC)** : représente le dosage des carbonates et bicarbonates, responsables du pouvoir tampon du fermenteur vis-à-vis des acides organiques et acides gras volatils. Cette alcalinité permet au pH de rester aux alentours de la neutralité malgré la présence d'acides.

***Le contrôle des acides gras volatils (AGV)** : stade intermédiaire obligatoire de la fermentation méthanique, est indispensable. L'accumulation de ces acides provoque un ralentissement de l'activité des bactéries méthanogènes et peut même bloquer le processus fermentaire.

Ces deux paramètres sont dosés pour contrôler le bon fonctionnement de la digestion anaérobie deux fois par semaine, et également dans le cas où une chute du pH est observée.

❖ **Mode opératoire : Dosage Titre Alcalimétrique Complet (TAC):**

- On prélève pour chaque bouteille D_1, D_2, D_3 un volume $V=5\text{ml}$.
- On fait la dilution d'échantillon : choisir 3 erlenmeyer numéroté 1, 2 et 3.
- Dans chaque erlenmeyer nous mettons 1ml, Ensuite, nous le complétons jusqu'à le titré avec l'eau distillé.
- Nous prenons 3ml de chaque échantillon et nous mettons dans des tubes à essai numérotés comme le montre le photo III. 11, T (Témoin), 1, 2 et 3 (Echantillons). Nous ajoutons 4ml de catalyseur et 2ml d'oxydant.
- Nous mettons les échantillons dans le four à la température 150°C pendant 120 min.



Photo III. 11: Dosage de Titre Alcalimétrique Complet (TAC).

❖ **Mode opératoire : Dosage des Acides Gras Volatils (AGV) :**

- o Nous choisissons trois béchers de 25 ml puis plaçons un volume $V=5\text{ml}$ de chacun digesteur D_1, D_2, D_3 .
- o Nous calculons le pH initial
- o On verse ensuite (H_2SO_4 0,1N) jusqu'à un pH=3,5. faire alors bouillir le liquide à pH=3,5 pendant 3min exactement. laisser refroidir.
- o Porter le liquide refroidi sous les électrodes du pH-mètre et verser sous agitation avec une burette au 1 /10 (NaOH 0,1 N) jusqu'à pH=4, soit V_2 le volume obtenu.
- o Continuer à verser jusqu'à pH=7 et soit V_3 le nouveau volume.
- o On fait le même travail pour chaque bécher.
 - o Acidité volatile $= (V_3 - V_2) \times 4 \times 0,06$ en g.l^{-1} d'acide acétique...(8)

***Paramètres d'épuration.**

• **Demande chimique en oxygène**

La demande chimique en oxygène, ou DCO, est l'un des paramètres de la qualité d'une eau. Elle représente la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder toute la matière organique contenue dans une eau.

Cette valeur est obtenue en faisant réagir des échantillons d'eau avec un oxydant puissant (le bichromate de potassium) et s'exprime en milligramme d'oxygène par litre d'eau. On calcule le DCO par la relation suivante :

$$\text{DCO}_{\left(\frac{\text{mg}}{\text{l}}\right)} = \frac{(V_T - V_E) * 8000 * T}{V_e} \dots \dots \dots (9)$$

V_e : volume d'échantillon = 3ml

V_T : Volume du sel de Mohr pour tube témoin

V_E : Volume du sel de Mohr pour tube échantillons

❖ **Mode opératoire : Dosage DCO**

- Nous remplissons la burette avec une solution sel de mhor.
- Nous préparons les échantillons (T ,1 ,2 et 3) après chauffage et commençons le titrage avec l'échantillon T.
- Videz le tube dans bécher, puis ajoutez-y deux gouttes de réactif coloré.
- Ensuite, nous ouvrons le robinet de burette graduée .On suit le titrage goutte à goutte et on mélange bien en même temps, jusqu'à ce que la couleur du mélange change en miel, on s'arrête et on enregistre le volume enregistré dans la burette V_T .
- Nous faisons le même travail avec les autres échantillons, en tenant compte du fait qu'à chaque opération, nous remplissons la burette à 0 avec la solution sel de mhor.

CHAPITRE VI: RESULTATS ET DISCUSSION

1. Introduction :

Dans cette partie, nous menons une étude appliquée pour produire du biogaz à partir de déchets ménagers, frais ou cuits.

Cela se fait en suivant les facteurs importants contrôlant l'augmentation de l'efficacité de la production de gaz, Aussi, dans cette expérience, nous comparons différents substrats du déchet ménager et leur rôle dans la production du biogaz.

2. Production du biogaz

Les déchets ménagers ont été introduits séparément dans un digesteur de capacité d'un litre. Le digesteur est fermé hermétiquement pour assurer l'anaérobiose, puis il est plongé dans un bain marie réglé à 37 °C. Le volume du biogaz formé est mesuré à l'aide de la méthode de liquide déplacé.

2.1 L'inflammabilité du biogaz :

Après avoir mesuré le volume du biogaz, nous traitons l'inflammabilité de ce gaz pour vérifier son efficacité en prenant un volume spécifique avec une seringue, nous amenons un briquet brûlant et le rapprochons de la buse de la seringue. Le biogaz est retiré à l'aide d'une seringue et soufflé à travers une flamme.



Photo VI.1: (a) Production du biogaz, (b) Teste l'inflammabilité du biogaz

2.2 Les valeurs de volume du biogaz :

Le système manuel installé pour récupérer le biogaz dégagé de réacteur, nous a permis de quantifier le biogaz en terme de volume. Les valeurs enregistrées sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau VI.1: Valeur de volume (ml) du biogaz en fonction du temps

jour	Déchets frais			Déchets cuits		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3
0	0	0	0	0	0	0
1	8,7	35	Fuite	Fuite	Fuite	Fuite
2	Fuite	Fuite	10,2	333,3	15,8	412,4
3	25,7	38	42,2	612,1	110	357,8

D'après les valeurs de volume du biogaz en fonction du temps, on observe le volume du biogaz augment avec le temps de séjours. Le digesteur des déchets cuits (D1, D2

et D3), le volume du biogaz augmente jusqu'à la valeur 612 ml (D1) pour les déchets cuits par rapport aux déchets frais.

Nous avons remarqué que le biogaz récupéré avec les déchets frais ou cuits est devenu inflammable qui c'est un signe de l'existence de CH₄. C'est qui conduit à dire que ces valeurs reflètent la bonne valorisation des déchets ménagers par la digestion anaérobie.

Valorisation énergétique

Le pouvoir calorifique d'un composé combustible représente l'énergie dégagée par la combustion de ce dernier. Le méthane est le seul composé du biogaz qui soit énergétiquement intéressant et le pouvoir calorifique du mélange dépend uniquement de la pression partielle en méthane. Pour du méthane pur, le pouvoir calorifique est de 9,94 kWh/m³, et pour un biogaz contenant 60% de CH₄ il sera donc de E_t=0,002147 kWh (pour volume 0,00035997 m³-biogaz). Pour exploiter cette énergie on doit connaître la quantité et la qualité du biogaz produit.

On calcule l'énergie par la méthode suivante :

On utilise le volume du biogaz : V=359,97 ml =0,00035997 m³ de la 3 jours de production pour 0,5 de mètre de culture des déchets frais.

- On propose 60 % CH₄
- Energie totale (E_t)

$$1 \text{ m}^3 (\text{CH}_4) \rightarrow 9,94 \text{ kWh}$$

$$E_t = \text{PCI} \cdot \% \text{ CH}_4 \cdot V_{\text{biogaz}}$$

$$E_t = 9,94 \cdot 0,6 \cdot 0,00035997$$

$$E_t = 0,002147 \text{ kWh}$$

- **Par exemple l'énergie valorisable (E_v) par le moteur on admet 5% de perte :**

$$E_v = 0,95 \cdot E_t = 0,95 \cdot 0,002147$$

$$E_v = 0,0020397 \text{ kWh.}$$

- **L'énergie fournie par le biogaz en un heur :**

$$E(t=1h)=E_v/360*24=0,0020397/360*24$$

$$E(t=1h)=2,361*10^{-7} \text{ kW}$$

Le moteur choisir est : la micro-turbine à gaz, la puissance à partir de 25 kW, le rendement électrique est de 35%.

- **La production annuelle :**

$$E_{\text{él}}=E_v*0,35=0,000714 \text{ kWh}$$

➤ Les composants de la chambre

Éclairage : 36 w

Bureautique : 150 w

On calcule la consommation énergétique (E_C) pour 1 heure :

$$E_C=36+150=186 \text{ Wh}=0,186 \text{ kWh}$$

On note que cette valeur calculé pour un petit digesteur (0,5L).

3. Les analyses de digestat liquide :

Les analysées physico – chimique de digestat liquide récupéré de digesteur à durée 3 jours sont reportées dans le tableau suivant :

Tableau VI.2: Analyses physico-chimique de digestat liquide

Paramètres	Temps (jour)	Déchets frais			Déchets cuits		
		D1	D2	D3	D1	D2	D3
pH	0	5,20	5,21	5,25	6,33	6,45	6,47
	3	3,43	3,55	3,65	4,99	4,74	4,54
MS (mg/l)	0	8,60	63,64	10,13	26,28	26,07	26,40
MO (%)	0	99,14	99,89	99,11	99,06	99,06	99,06
TCA mg/l	0	2,80	2,24	2,72	2,00	1,92	1,44
	3	16,72	17,2	16,76	17,76	16,64	16,72
AGV mg/l	0	1,52	0,47	0,43	0,72	1,12	0,92
	3	4,04	3,92	4,00	2,88	4,48	3,68
DCO (mg/l)	0	187,5	175,0	175,0	150,0	25,00	108 ,33
	3	91,81	66,67	89,58	58,33	54,16	54,16
AGV/TAC	0	0,54	0,20	0,15	0,36	0,58	0,63
	3	0,24	0,22	0,23	0,16	0,26	0,22

Nous avons constaté qu'il y'avait une chute de pH de 6,5 jusqu'à une valeur minimale proche de 3 pour les deux expériences. Cette chute est expliquée par la dégradation de la matière organique et la formation des acides organiques et les acides gras volatils.

La variation de la concentration du titre alcalimétrique complet (TCA) dans le digesteur influe directement sur le rendement de la digestion ainsi que sur la qualité et le volume du biogaz produit.

Pour un bon fonctionnement de la digestion anaérobie le TAC doit être inférieur à 100mg/l [44].

Nous constatons que toutes les valeurs de TAC sont dans la plage de fonctionnement optimale (<100mg/l), ce qui permettent un bon fonctionnement de la digestion.

La variation de la concentration des acides gras volatiles (AGV) est comprise entre 0,5 - 4,1 mg/l. Nous constatons que, la plupart de nos valeurs d'AGV sont inférieures à 100mg/l. permettent un bon fonctionnement de la digestion.

Plusieurs auteurs utilisent un rapport AGV/TAC inférieur à 0,5 comme indice de bon déroulement de la fermentation méthanique [45].

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté une forte charge organique contenue dans notre échantillon, malgré sa teneur faible en matière sèche.

Finalement nos valeurs du rapport confirment un bon fonctionnement de la digestion anaérobie.

En comparant les résultats figurés dans le tableau (VI.2) avec les normes de rejets international, on constate que ce digestat est très pollué. Dans ce contexte et devant cette contrainte une proposition d'un traitement complémentaire est nécessaire. La solution qu'on la propose est d'essayer de réutiliser le digestat dans le domaine agricole tout en tenant compte les mesures de précautions et de sécurité sur le plan sanitaire vis avis de faune et la flore.

CONCLUSION GENERALE

La digestion anaérobie offre une solution intéressante aux déchets ménagers voulant optimiser leur fonctionnement. L'utilisation des déchets ménagers pour la production d'énergie renouvelable s'accompagne de nombreux avantages, comme la réduction du volume, la diminution des odeurs, la production d'électricité, de chaleur ou de biométhane, mais également la quantité agricole du digestat dans les pays où l'épandage est autorisé.

L'objectif principal de notre travail était de suivre le fonctionnement de la digestion anaérobie des déchets ménagers de la ville d'Adrar. Les conditions de fonctionnement ont été définies à l'aide de différents paramètres qui ont permis de vérifier le bon fonctionnement de l'installation anaérobie.

Les paramètres sont ceux de tout procédé biologique : la température à 37°C, le pH, les AGV, le TAC, le rapport AGV/TAC, et enfin la production de biogaz.

Les résultats obtenus dans cette étude ont montré que les valeurs de pH sont proches de la plage de fonctionnement optimal, ce qui permet la formation des AGV au cours de l'étape d'acidogènes. Les DCO des déchets ménagers digérés et leur élimination sont presque de 50%, cela indique une fermentescibilité moyenne. Les valeurs d'AGV et de TAC sont conformes à une bonne digestion anaérobie. De même, pour le rapport AGV/TAC, les valeurs sont comprises dans la plage de fonctionnement optimal. A reforme ce qui concerne le volume du biogaz et le teste de l'inflammabilité montrent que la composition du biogaz est bonne (présence CH₄). Puis dans un dernier temps nous avons vu les valorisations et les utilisations du biogaz dans le domaine de l'électricité, dans le domaine thermique et à l'échelle de l'automobile avec le biogaz carburant.

Le biogaz produit par la méthanisation des déchets ménagers est généralement utilisé immédiatement et les surplus brûlés par une torchère. L'énergie produite par la méthanisation est disponible pour l'usage interne du site de production. Le biogaz est convertible en plusieurs formes utiles d'énergie. Il est utilisé principalement pour

la production de chaleur (efficacité de 80 %) pour alimenter une chaudière, chauffer les bâtiments, le garage, la maison ou la piscine, ou encore, pour le séchage de matériaux ou la réfrigération. Il est important de considérer que de 20 à 30 % du biogaz sera nécessaire pour chauffer le digesteur afin de maintenir la température de celui-ci à 37 °C. En général, le chauffage du digesteur se fera par un échangeur à l'intérieur du digesteur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1].Ademe, La valorisation de la biomasse. (2007). Récupérer sur Guide d'information à l'attention des administrations et des établissements publics.
- [2].Claude, S. (2018, juin 13). encyclopedie-energie. Récupérer sur encyclopedie-energie.org: <https://www.encyclopedie-energie.org/biomasse-et-energie-des-ressources-primaires-aux-produits-energetiques-finaux/>
- [3]. COUTURIER, Ch. Technique de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse – Rapport final. Février 2009.
- [4]. Feddal-Benabed, Badra, thèse, Etude des propriétés thermophysiques des mélanges contenant. s.l. UAB-Tlemcen (Algérie), p13_14, 2015.
- [5].Djamila, Faradji Née Kherbouche,thèse,Contribution à la valorisation énergétique de la biomasse. Tlemcen : U.Tlemcen, 2011.
- [6]. Demirbas, Ayhan,livre, Biorefineries : for biomass upgrading facilities. London : Springer, 2010.
- [7]. Akunna, Joseph C,livre, Anaerobic Waste-Wastewater Treatment and Biogas Plants. Boca Raton, : Taylor & Francis Group, 2018.
- [8]. Sourisse, Claude,article, Biomasse et énergie : des ressources primaires aux produits énergétiques finaux. Encyclopédie de l'énergie. 03 05 2020, p. 2.
- [9]. BENABDELLAZIZ, Merouane,article, espaceslibres / actualités. biomasse, que faut-il savoir ? 27 06 2020, p. 01.
- [10]. Basu, Prabir. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction,Practical Design and Theory. San Diego, USA : Elsevier Inc., 2018.
- [11]. Dufour, Anthony. Optimisation de la production d'hydrogène par conversion du méthane dans les procédés de pyrolyse/gazéification de la biomasse. s.l. : Institut nationale polytechnique de Lorraine, 2007.
- [12]. ANTONINI, Gérard. Traitements thermiques des déchets Procédés et technologies associées. Techniques de l'Ingénieur. 10 janvier 2005, pp. G 2 051-1 -G 2 051 -2.

- [13]. Boumediène, KHODJA Farouk et Djamila, ABOUBEKR. Etude sur la valorisation énergétique par conversion Biomasse de boues résiduaires urbaines – cas de la station d'épuration ONA - Tlemcen. Tlemcen : Université Abou BakerBelkaid, 2014.
- [14]. Lis RAMIREZ, these, Production de bio-carburants de 3ème génération à partir de microalgues, p 6, 19 décembre 2013
- [15]. Dareen ALKADEE, TECHNIQUES DE REDUCTION ET DE TRAITEMENT DES EMISSIONS POLLUANTES DANS UNE MACHINE THERMIQUE,these,p 41, 2011
- [16]. NIETO Christian,thèse, Valorisation par digestion anaérobie des déchets organiques ménagers de la ville de Cuenca, Équateur,p25, 2019
- [17]. Julien BOLLON, Etude des mécanismes physiques et de leur influence sur la cinétique de méthanisation en voie sèche : essais expérimentaux et modélisation
- [18]. S. Igoud, I. Tou, S. Kehal, N. Mansouri(1) et A. Touzi,article, Division Biomasse-Energie, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzaréah, Alger, Rev. Energ. Ren. Vol. 5 (2002)123-128
- [19]. N. Hajjaji^{1,2}, M.N. Pons¹, V. Renaudin¹, A. Houas,article, production du biogaz par digestion anaerobie :aspects technologiques et environnementaux, 28 janvier 2010
- [20]. Guillaume, Bastide, article ,mechanisation. France : Adele angers, 2015.
- [21]. Moletta, R,article,Méthanisation. 2003, La digestion anaérobie des déchets municipaux, pp. 1-16.
- [22]. Béline, Fabrice, et Al., article, la méthanisation en milieu rural et ses perspectives de développement en france. 2013, sciences eaux & territoires, pp. 6-13.
- [23]. Khanal, Samir Kumar,livre,anaerobic biotechnology for bioenergy production. New Delhi, India : The U.S. Library Of Congress., 2008.
- [24]. Dieter Deublein, Angelika Steinhauser,livre Biogas from Waste and Renewable Resources. Germany : Wiley-Vch Verlag Gmbh & co. kga,weinheim, 2008.
- [25]. (Béline, Peu, Dabert, Trémier, Guen, & Damiano, 2013; CONNAISSANCE DES ÉNERGIES, 2015; Deublein & Steinhauser, 2008)

- [26]. Lalès, Joseph, livre, méthanisation des boues de stations : règle de l'art et état des lieux sur les bassins rhône-méditerranée et corse. Lyon : agence de l'eau rhône méditerranée corse, 2012.
- [27]. Progeco, traitement anaérobie des déchets organiques. s.l. : recomap, 2011.
- [28]. Kamal, Samir Kumar, livre, anaerobic biotechnology for bioenergy production. new Delhi, India : the use library of congress., 2008.
- [29]. Moletta, René, article, Le traitement des déchets. France : Tec & Doc & Lavoisier, 2011.
- [30]. Djamila, Faradji Née Kherbouche, thèse, Contribution à la valorisation énergétique de la biomasse. Tlemcen : Tlemcen, 2011.
- [31]. Nieto Orellana, Christian Ricardo, article, valorisation par digestion anaérobie des déchets organiques ménagers de la ville de Cuenca : finalité énergies renouvelables, 2019.
- [32]. Arras, Wassila, thèse, étude expérimentale et modélisation de la digestion anaérobie de matières organiques résiduelles dans des conditions hyper thermophiles. Montréal : école de technologie supérieure, 2017.
- [33]. Abbasi, Tasneem, Tauseef, S.M. et Abbasi, livre, S.A. Biogas Energy. 1. New York : Springer-Verlag, 2012.
- [34]. Derbal, Kerroum, thèse, digestion anaérobie des déchets solides mélanges avec les boues de station d'épuration. Constantine : université mentouri constantine, 2012
- [35]. Nabila, Laskri, thèse, 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. Annaba : université n.m Annaba, 2016.
- [36]. Akunna, Joseph C, livre, anaerobic wastewater treatment and biogas plants. Boca Raton : Taylor & Francis, 2019.
- [37]. Mlouki, Ismail Et Aissaoui, Abdelkrim. l'effet de prétraitement chimique alcalin par KOH sur la production du biogaz à partir des boues de la station de lagunage de la ville d'Adrar. Adrar : Université Ahmed Draïa, 2017.

- [38]. Moletta, René, article, méthanisation de la biomasse. technique de l'ingénieur. 10 mai 2008, pp. 1-21.
- [39]. Amarante, João Alberto Lima, thèse, biométhanisation des déchets putrescibles municipaux technologies disponibles et enjeux pour le Québec. marc olivier : université de Sherbrooke, 2010.
- [40]. Escudie, Renaud Et Cresson, Romain, article, méthanisation de la biomasse. techniques de l'ingénieur . 10 octobre 2017.
- [41]. Condorchem Envitech, article, traitement du biogaz: nettoyage, séchage et valorisation du biogaz. [en ligne] 2019. [citation : 4 septembre 2020.] <https://condorchem.com/fr/blog/traitement-du-biogaz/>.
- [42]. Mekadem, Hamza Et Kouki, Assia, thèse, valorisation énergétique des déchets organique par méthanisation. Adrar : Université Ahmed Draïa, 2013.
- [43]. Slimane, Kalloum, thèse, étude des parametres physico-chimiques de la digestion anaerobie des dechets organiques. mostaganem : Universite Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2012.
- [44]. Khoja Farouk Boumediene, Abouler Djamila, thèse, étude sur la valorisation énergétique par conversion biomasse de boues résiduaires urbaines – cas de la station d'épuration on - Tlemcen. Tlemcen : Univar Si Tee About Barbell Kid – Tlemcen, 2014
- [45]. Document interne de SEAAL BARAKI, manuel de l'opérateur tome 1 partie 3 fonctionnements de la digestion anaérobie