



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEM

MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Par :

M^{elle} CHIKHAOUI Rokia Amira

Sur le thème

Production de Biogaz à partir des déchets entièrement d'origine agricole et des eaux usées

Soutenu publiquement le 09 Juin 2024 à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr BENYUCEF Abdellah	MCA Université de TLEMCEM	Président
Mr BABA AHMED Nassim	MCA Université de TLEMCEM	Encadrant
Mme KHERBOUCHE Djamila	MCA ESSA TLEMCEM	Examinatrice

Année Universitaire : 2023 ~ 2024

Dédicace

Louange à Dieu tout puissant, qui m'a permis de voir ce jour tant attendu

Je tiens à dédier cet humble travail à :

À mon très cher père Mohamed Chikhaoui et ma tendre mère.

Mes premiers maîtres et mes plus grands soutiens. Votre amour, votre soutien indéfectible et vos sacrifices ont été les fondations solides sur lesquelles repose ma réussite académique.

À mon encadrant Mr. Baba -ahmed et mes enseignants en particulier

Pr. Liazid : je vous remercie du fond du cœur pour avoir partagé avec générosité vos connaissances et vos expériences. Vos enseignements ont nourri ma soif de savoir et m'ont permis de repousser mes limites intellectuelles.

À mes chères sœurs Malak et Douaa et mon frère Anes :

Vous êtes les êtres qui ont partagé mes joies, mes peines et mes rêves tout au long de ce parcours académique. Votre amour inconditionnel, votre soutien indéfectible et vos encouragements constants ont été la force qui a nourri ma motivation et ma détermination.

Mes amis et mes collègues, je ne peux passer sous silence votre précieuse présence. Vos encouragements, vos conseils et vos sourires ont illuminé mes journées les plus sombres et ont rendu ce voyage encore plus mémorable.

Enfin, La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Cette citation résume parfaitement la manière dont nous avons abordé les défis et les épreuves de ce travail. Nous avons allié savoir et action pour surmonter les obstacles et atteindre les objectifs.

Avec une gratitude infinie,

Rokia Amira

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant qui nous éclaire le bon chemin.

On m'aurait dit au début de la rédaction que les remerciements seraient la partie la plus difficile à écrire, je n'y aurais pas cru. Et pourtant, je peux le confirmer maintenant. Ils représentent bien souvent la partie la plus lue d'un mémoire de thèse, ou du moins celle qu'un lecteur regardera naturellement en premier. Il s'agit donc de trouver les mots justes pour chacun, tout en n'oubliant personne. Je commencerai donc par remercier toute personne que j'aurais pu malencontreusement oublier par la suite. Contrairement aux idées reçues, une thèse n'est pas le résultat d'un travail purement personnel. Au-delà d'être une expérience scientifique incroyable, c'est également une aventure humaine inoubliable qui m'a permis de rencontrer et côtoyer des personnes extraordinaires, qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail. C'est donc naturellement et en toute sincérité que je vais maintenant remercier l'ensemble des personnes qui m'ont entourée pendant ces quelques années !

Je remercie vivement et chaleureusement mon encadreur Docteur BABA AHMED Nassim Maître de conférences « A » à l'université de Tlemcen. Je tiens à lui exprimer toute ma gratitude pour son aide technique, scientifique et morale ; pour son encouragement et surtout pour la patience et la disponibilité dont il a fait preuve à mon égard.

Je tiens ensuite à adresser mes remerciements à l'ensemble des membres du jury pour le temps qu'ils ont accordé à la relecture du manuscrit.

Je remercie en particulier Monsieur BENYOUCEF Abdellah Maître de conférences « A » à l'université de Tlemcen de vouloir présider le jury de ce Master. Je suis très honorée par la présence de Madame KHERBOUCHE Djamila Maître de conférences « A » à l'école supérieure des sciences appliquées de Tlemcen et je la remercie pour avoir accepté de siéger dans ce jury en tant qu'examinatrice. Je remercie tous les membres du jury pour leur expérience et leur regard critique qu'ils ont porté sur mon travail.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : Généralités sur les énergies renouvelables et la biomasse

Figure 1.1 : Schéma d'un système photovoltaïque	05
Figure 1.2 : Schéma de deux capteurs thermique	06
Figure 1.3 : Les quatre technologies principales pour la production de chaleur et/ou d'électricité d'origine solaire	06
Figure 1.4 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	07
Figure 1.5 : Le champ d'éoliennes offshore de Middelgrunden, dans l'Øresund	07
Figure 1.6 : Éolienne à axe verticale de type Darrieus	08
Figure 1.7 : Schéma de géothermie haute énergie	09
Figure 1.8 : Schéma de principe de puits canadien	10
Figure 1.9 : Schéma de cycle du carbone	12
Figure 1.10 : Différents ressources de la biomasse	12
Figure 1.11 : Les grandes étapes de la DA d'après Gracia (1990)	17
Figure 1.12 : Intensité de la fermentation en fonction de la température	18
Figure 1.13 : Production de gaz à différentes températures en fonction des jours	18
Figure 1.14 : Schéma de digesteur	20
Figure 1.15 : Digesteur à alimentation continue en substrat sans recyclage des bactéries	20
Figure 1.16 : Digesteur à alimentation continue en substrat avec recyclage des bactéries	21
Figure 1.17 : Digesteur à alimentation continue en substrat sans recyclage des bactéries	21
Figure 1.18 : Différentes géométries de digesteurs	21
Figure 1.19 : Comparatif énergétique	23
Figure 1.20 : Élimination des digestats par centrifuge	23
Figure 1.21 : Stockage des digestats sur une dalle en béton	23

Chapitre 2 : Etude expérimentale

Figure 2.1 : Image des dispositifs	31
Figure 2.2 : Image de préparation des trous	32
Figure 2.3 : Image de poche pour collecter le gaz	32
Figure 2.4 : Image de l'installation finale de digesteur	32
Figure 2.5 : PH-mètre 5 en 1	32
Figure 2.6 : Photo de substrat utilisée	33
Figure 2.7 : Le premier digesteur	33
Figure 2.8 : Préparation de substrat	34
Figure 2.9 : Rajout de l'eau	34
Figure 2.10 : Préparation de quatrième expérience	34
Figure 2.11-a : Photo originale de DRX	37
Photo 2.11-b : Exécution de l'échantillon	37

Chapitre 3 : Résultats et interprétations

Figure 3.1 : Température à l'intérieur du digesteur durant l'expérience	40
Figure 3.2 : Variation du PH durant l'expérience	40
Figure 3.3 : Variation du PH en fonction de la température	41
Figure 3.4 : Variation de la salinité du produit final durant l'expérience	42
Figure 3.5 : Variation de la salinité du produit final en fonction de la température	42
Figure 3.6 : Variation de la salinité du produit final en fonction du PH	43
Figure 3.7 : Variation de la conductivité électrique du produit final durant l'expérience	44
Figure 3.8 : Variation de la conductivité électrique du produit final en fonction de la température	44

Figure 3.9 : Variation de la conductivité électrique du produit final en fonction du PH ...	45
Figure 3.10 : Test d'inflammabilité dans le premier digesteur	46
Figure 3.11 : Test d'inflammabilité dans le deuxième digesteur	46
Figure 3.12 : Spectre d'un échantillon neuf de la bouse de vache issu de la DRX	47
Figure 3.13 : Spectre d'un échantillon ancien de 15 jours de la bouse de vache issu de la DRX	47
Figure 3.14 : Photo de sachet de biogaz	48
Figure 3.15 : Echantillon après la fermentation	50

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1 : Généralités sur les énergies renouvelables et la biomasse

Tableau 1.1 : Composition du biogaz issu de déchets organiques	22
---	-----------

Tableau 1.2 : Rendement de production de biogaz en fonction de la nature du substrat	22
---	-----------

Chapitre 3 : Résultats et interprétations

Tableau 3.1 : Répartition des éléments restitués à partir de l'échantillon neuf de la bouse de vache	48
---	-----------

Tableau 3.2 : Répartition des éléments restitués à partir de l'échantillon séché de la bouse de vache	48
--	-----------

Liste d'abréviations :

DA	Digestion anaérobie
AGV	Acides gras volatils
PH	Potentiel d'hydrogène
C/N	Carbone / Azote
TRH	Temps de rétention hydraulique
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
CE	Conductivité électrique
TDS	Total des solides dissous
T	Température
DRX	Diffraction des rayons X
URMER	Unité de recherche sur les matériaux et énergies renouvelables
M	Masse
N	Azote
P	Phosphore
K	Potassium
Ca	Calcium
Mg	Magnesium
Na	Sodium

Liste des unités :

°C	Degrés Celsius
PPM	Parties par million
g	Gramme
ml	Millilitre
Å	Angström
µS/cm	Micro siemens par centimètre

TABLE DES MATIERES

Dédicace	I
Remerciement	II
Liste des figures	III
Liste des tableaux	IV
Abréviations	V
Table des matières	VI
Introduction générale	01
Chapitre 1 : Généralités sur les énergies renouvelables et la biomasse	
I - Introduction	05
II- Notions sur Les énergies renouvelables	05
II-1- Définition	05
II-2- Les types d'énergie renouvelables	05
II-2-1- L'énergie solaire	05
II-2-2- L'énergie éolienne	07
II-2-3- L'énergie hydraulique	09
II-2-4- La géothermie	09
III- La biomasse	11
III-1- Définition de la biomasse	11
III-2- Les ressources de la biomasse	12
III-3- Les types de la biomasse	12
III-3-1- La biomasse sèche	13
III-3-2- La biomasse humide	13
III-4- Biomasse agricole	13
III-4-1- Le lisier	13
III-4-2- Les effluents d'élevage ...	13
III-4-3- Le fumier	13
III-5- les principales voies de valorisation énergétique de la biomasse	14
III-5-1- La voie thermochimique	14
III-5-2- La voie biochimique	14
III-6- La digestion anaérobie	15
III-6-1- Définition	15
III-6-2- Historique de la méthanisation	15
III-6-3- les différentes étapes de la méthanisation	16
III-6-4- Paramètres influençant la digestion anaérobie	17
III-6-5- Le digesteur	20
III-6-6- Les produits de la méthanisation	21
Conclusion	24

Références bibliographiques	24
Chapitre 2 : Etude expérimentale	
Introduction	31
1. Matériel d'étude	31
1.1. Description du bio-digesteur	31
1.2. Les étapes de réalisation	31
1.3. Tableau des résultats	35
1.4. Diffraction des rayons X (DRX)	36
Conclusion	38
Références bibliographiques	38
Chapitre 3 : Résultats et interprétations	
Introduction	40
I. Production du Biogaz	40
I.1. Influence de la température pendant la production du biogaz	40
I.2. Influence du PH pendant la production du biogaz	40
I.3. Influence de la salinité pendant la production du biogaz	42
I.4. Influence de la conductivité pendant la production du biogaz	43
I.5. Inflammabilité du gaz	45
II. Analyse DRX	46
III. Caractérisation de digestat	49
Conclusion	50
Conclusion générale et perspectives	51

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie a été depuis des dizaines d'années le moteur de l'activité humaine, elle joue un rôle très important dans la vie quotidienne et dans le développement des nations. L'augmentation de la consommation mondiale énergétique augmente au détriment de l'environnement. Cependant, la plupart de l'énergie électrique est produite par combustion de ressources non renouvelables. De plus, ce type de production d'électricité est principalement responsable de la production de CO₂ rejeté dans l'atmosphère engendrant le phénomène de l'effet de serre qui confronte la planète aux phénomènes de réchauffement climatique et qui risque d'avoir des effets indésirables sur les équilibres physiques, économiques, sociaux et politiques de notre planète. En effet, les énergies fossiles sont utilisées de manière abusive. Ces énergies sont polluantes et limitées. La recherche des ressources d'énergie alternatives est donc devenue une question cruciale de nos jours.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom). Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués. Principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants, énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...). Au cours de ces dernières décennies, l'humanité a été témoin d'une accélération sans précédent des changements climatiques, mettant en lumière l'urgence croissante d'agir de manière décisive pour atténuer les effets dévastateurs du réchauffement planétaire. À l'origine de cette crise climatique se trouve une dynamique complexe, largement alimentée par les choix énergétiques de notre société moderne.

Le secteur agricole, bien qu'essentiel à la production alimentaire, contribue de manière significative aux émissions de gaz à effet de serre et à la pollution de l'eau. Les déchets agricoles, y compris les résidus de cultures, les effluents d'élevage et les eaux usées, posent un problème important d'élimination. Souvent incinérés à l'air libre ou mal gérés, ils exacerbent davantage les problèmes environnementaux.

Au sein de ce panorama énergétique en évolution, la biomasse se distingue comme une source d'énergie renouvelable particulièrement intéressante. En effet, les déchets agricoles et les eaux

usées, souvent considérés comme des problèmes environnementaux, peuvent être transformés en une ressource précieuse grâce à la méthanisation. Ce processus, qui consiste à produire du biogaz par fermentation anaérobie de la matière organique, présente un double avantage : il contribue à la gestion durable des déchets tout en générant une source d'énergie propre et renouvelable.

Le présent mémoire se propose d'explorer de manière approfondie le potentiel de la production de biogaz à partir des déchets agricoles. Dans cette perspective, il s'articule en trois chapitres distincts, chacun contribuant à une compréhension globale et approfondie de cette thématique cruciale.

Le premier chapitre offre une revue de la littérature détaillée, mettant en lumière les enjeux liés aux énergies renouvelables, en particulier la biomasse, et se focalise sur la méthanisation comme processus clé dans la production de biogaz. Cette étude bibliographique pose les fondements théoriques nécessaires à la compréhension des aspects techniques, environnementaux de la méthanisation.

Le deuxième chapitre constitue une étude expérimentale, visant à explorer de manière concrète et empirique les possibilités offertes par la méthanisation des déchets agricoles tels que les cultures des animaux. À travers une approche méthodologique rigoureuse, cette étude cherche à évaluer les paramètres influençant le rendement et l'efficacité du processus de méthanisation.

Enfin, le troisième chapitre présente les résultats obtenus au cours de l'expérience, offrant une analyse approfondie des données recueillies et des conclusions qui en découlent. En examinant les performances de la méthanisation dans la production de biogaz à partir des déchets agricoles et des eaux usées, ce chapitre vise à mettre en évidence les implications pratiques et les perspectives futures de cette approche en termes de gestion des déchets, de production énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Nous achevons ce travail par une conclusion générale et quelques perspectives relatant ce travail.

À travers ce travail, nous aspirons à contribuer à la recherche de solutions viables pour préserver notre planète et assurer un avenir plus durable pour les générations futures.

CHAPITRE 1 :

Généralités sur les énergies renouvelables et la biomasse

I - Introduction :

La croissance rapide de la population et de l'urbanisation dans le monde pourrait aggraver la pollution atmosphérique et de l'environnement, ce qui poussent les sociétés humaines à entamer une transition énergétique orientée vers les énergies renouvelables [1]. En croissance régulière depuis plusieurs années, les énergies renouvelables représentent 14 % de la consommation d'énergie primaire en 2022, contre 8,8 % dix ans plus tôt [2]. Alors ce chapitre présente d'une manière générale les énergies renouvelables et leur importance surtout la biomasse qui joue un rôle important à la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre.

II- Notions sur Les énergies renouvelables :

II-1-définition : L'énergie renouvelable est une énergie issue de ressources naturelles et illimitées (Vent, soleil, de la géothermie, des chutes d'eau marées et de la biomasse), qui se renouvelle plus rapidement qu'elle n'est consommée. L'énergie renouvelable est appelée aussi « énergie propre » ou « énergie verte » [3].

II-2- les types d'énergie renouvelables :

II-2-1- L'énergie solaire : L'énergie solaire est une énergie générée grâce aux rayonnements électromagnétiques produite par le soleil qui sont ensuite captés, puis transformés en chaleur ou en électricité exploitable grâce à des panneaux solaires [4].

Il existe 4 types d'énergie solaire :

II-2-1-a- L'énergie solaire photovoltaïque : Les cellules photovoltaïques permettent de transformer la lumière en électricité. La lumière est composée de minuscules particules énergétiques appelées « photons ». La matière présente dans les cellules, qui est un semi-conducteur, a la capacité de capter ces photons et de les transformer en électricité. Chaque module est donc constitué de plusieurs cellules photovoltaïques agissant chacune à la façon d'une pile dès qu'elles sont exposées au soleil [4].

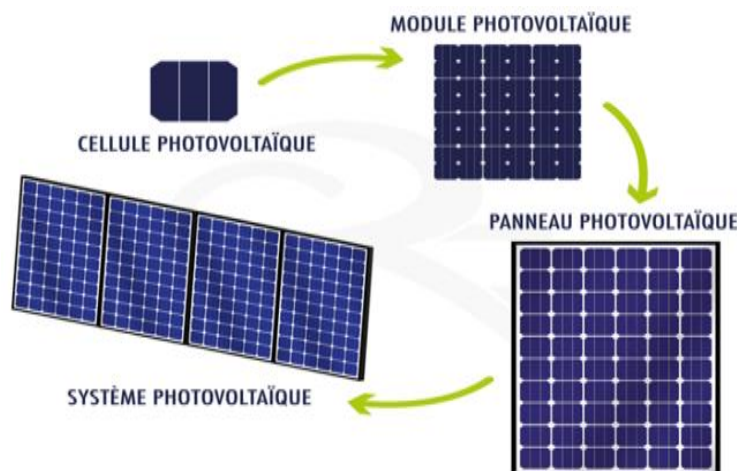


Figure I.1 : Schéma d'un système photovoltaïque [5]

II-2-1-b- L'énergie solaire thermique : L'énergie solaire thermique est l'énergie thermique issue du rayonnement solaire. Il est capté afin de chauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut alors être utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage...) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner un alternateur d'énergie électrique, génération de froid...). Le capteur solaire thermique est l'instrument utilisé pour transformer le rayonnement solaire en chaleur. Les principes physiques fondamentaux qui fondent cette production d'énergie sont notamment l'absorption et la conduction thermique [6].

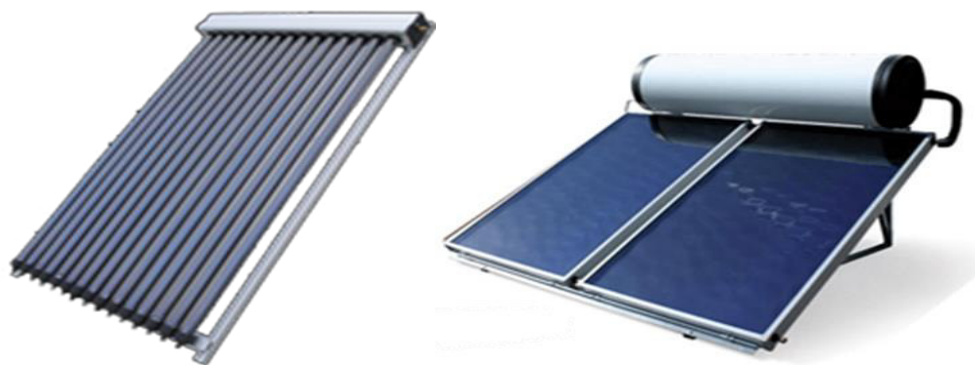


Figure I.2 : Schéma de deux capteurs thermiques [7]

II-2-1-c- L'énergie solaire thermodynamique : L'énergie solaire thermodynamique est un terme qui regroupe toutes les techniques permettant de convertir les rayons du soleil en chaleur. Étant donné que les dispositifs optiques concentrent le rayonnement solaire, les fluides peuvent être chauffés à des températures très élevées. Une fois générée, cette chaleur peut être utilisée pour produire de l'hydrogène ou produire de l'électricité [8].

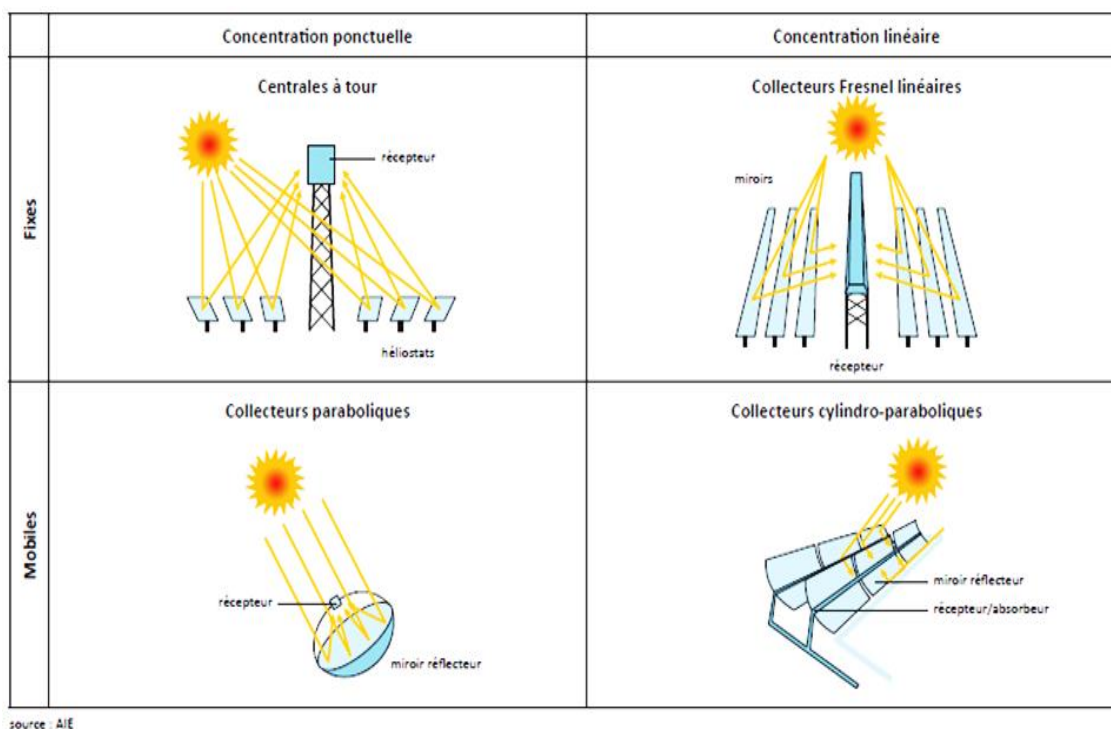


Figure I.3 : Les quatre technologies principales pour la production de chaleur et/ou d'électricité d'origine solaire [9]

- **Les avantages de l'énergie solaire:**

- L'énergie solaire est une énergie renouvelable et donc inépuisable à l'échelle humaine.
- L'énergie solaire permet également de réaliser des économies intéressantes.
- Les installations bien conçues sont fiables même dans les conditions climatiques extrêmes [10].

- **Les inconvénients :**

- Le prix des installations et de fabrication est un des principaux inconvénients de l'énergie solaire, car la production est toujours assez importante en raison de l'utilisation de technologies avancées [10].
- La nécessité de dispositifs de stockage coûteux pour palier l'intermittence [11].
- L'installation nécessite beaucoup d'espace [12].

II-2-2- L'énergie éolienne :

II-2-2-1- Définition : L'énergie éolienne fait référence à la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cela implique l'utilisation d'éoliennes composées de grandes pales, d'un rotor, d'un générateur et d'autres composants. Lorsque le vent souffle, l'énergie est captée par les pales du rotor, les mettant ainsi en mouvement. La rotation des pales entraîne le générateur (Figure I.4), produisant du courant électrique qui peut être exploité à diverses fins [13].

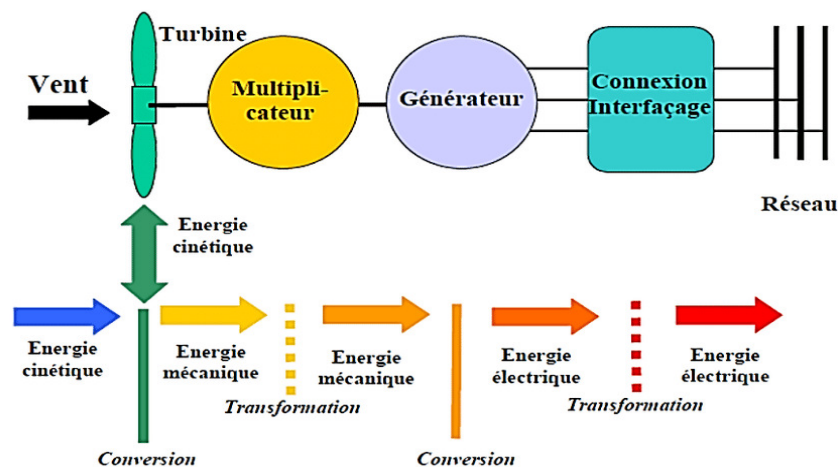


Figure I.4 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [14]

II-2-2-2- Les différents types d'éoliennes :

❖ **Les éoliennes à axe horizontal :** On les appelle aussi « éoliennes à hélice », basées sur le principe du moulin à vent. Elles s'orientent suivant la direction du vent et se compose de trois lames. Ce sont les plus courants. Elles sont situés dans les zones Rural ou offshore parce qu'elles ont besoin d'espace [15].



Figure I.5 : Le champs d'éoliennes offshore de Middelgrunden, dans l'Øresund [16]

❖ **Les éoliennes à axe vertical :** L'axe du rotor est perpendiculaire au sol. Elles ne nécessitent aucun système pour les orienter dans la direction du vent, mais leur efficacité reste médiocre par rapport aux éoliennes à axe horizontal car elles captent seulement la moitié de l'énergie éolienne. Il existe deux types d'éoliennes à axe vertical : le type Savonius et le type Darrieus. Les éoliennes à axe vertical sont généralement moins performantes que les éoliennes à pales « classiques » [15].



Figure I.6 : Éolienne à axe verticale de type Darrieus [17]

II-2-2-3- Les avantages et les inconvénients des éoliennes : La croissance de l'énergie éolienne est liée aux avantages de l'exploitation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie présente également des inconvénients qu'il convient d'étudier pour que ces ne deviennent pas un obstacle à son développement.

A. Les avantages :

- L'énergie éolienne est une énergie propre (sans émissions de gaz ni de déchets toxiques ou radioactifs).
- L'utilisation de l'énergie éolienne présente une caractéristique non continue étant donné que les éoliennes en fonctionnement peuvent être interrompues facilement, contrairement aux procédés continus prévalant dans la plupart des centrales thermiques et nucléaires. Ces dernières génèrent de l'énergie même lorsqu'elle n'est pas nécessaire, ce qui entraîne des pertes significatives et par conséquent, une efficacité énergétique médiocre.
- Le démantèlement des parcs éoliens s'effectue de manière aisée [18].

B. Les inconvénients :

- Les vitesses du vent sont difficiles à prévoir et il est important de noter que même si les éoliennes nécessitent un minimum de vent pour démarrer, elles cesseront de fonctionner si la vitesse du vent dépasse 90 km/h.
- Un autre inconvénient majeur souvent souligné par les riverains est le bruit produit par le dispositif.
- Les éoliennes ont un impact sur le milieu naturel (oiseaux, plantes, animaux sauvage...) là où elles sont établies, mais les précautions prises peuvent les réduire séquence.
- L'énergie générée par les parcs éoliens ne peut pas être stockée. cela nécessite une connexion au réseau, ce qui peut causer des problèmes.
- La production des éoliennes est variable [18].

II-2-3- L'énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par diverses formes de mouvement de l'eau: chute, courant marin et vague. Cette action peut être utilisée directement, par exemple à l'aide d'un moulin à eau, ou plus communément transformé, par exemple : énergie électrique provenant d'une centrale hydroélectrique. Trois parties composent une centrale hydraulique :

- Le barrage qui retient l'eau.
- la centrale de production d'électricité.
- Les lignes électriques qui transportent et évacuent l'énergie [19].

Avantages :

- C'est une source d'énergie flexible car on peut contrôler le débit d'eau et produire de l'électricité.
- Dans les centrales hydroélectriques, la puissance de sortie ne varie que progressivement de jour en jour et non pas de minute en minute [20].

Inconvénients :

- Les installations hydroélectriques peuvent avoir de graves conséquences sur les écosystèmes, notamment autour du barrage et des retenues d'eau. On note que dans certains cas elles peuvent former un obstacle à la migration des poissons.
- La construction d'installation est très coûteuse.
- Les installations hydroélectriques peuvent engendrer une augmentation de la sécheresse en aval du barrage [20].

II-2-4- La géothermie :

La Géothermie, du grec Géo (La terre) et thermie (la chaleur). Par extension, l'énergie géothermique issue de l'énergie de la terre qui est convertie en chaleur. Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable.

Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité [21].

II-2-4-1- Les types de gisements géothermiques :

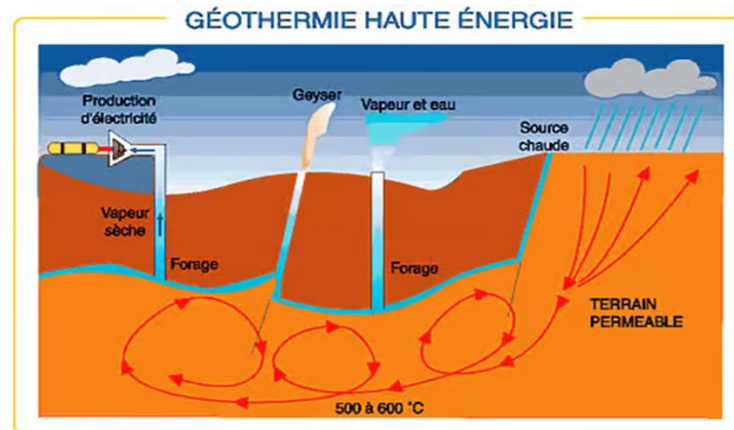


Figure I.7 : Schéma de géothermie haute énergie [22]

i. Géothermie haute énergie : La géothermie haute énergie exploite les réservoirs de vapeur, qu'ils soient secs ou humides (composés d'eau et de vapeur). Ces réservoirs se distinguent par des températures dépassant 150 °C. On trouve ce type de géothermie dans les zones volcaniques (volcans) et sismiques (frontières de plaques) où le gradient géothermique est particulièrement élevé. Son principal usage réside dans la production d'électricité. La vapeur extraite du réservoir géothermique est acheminée vers une turbine connectée à un alternateur pour générer de l'électricité. La vapeur sèche est directement utilisée, tandis que la vapeur humide, plus courante, nécessite l'utilisation d'un séparateur [22].

ii. Géothermie moyenne énergie : La chaleur géothermique à moyenne température, également appelée enthalpie moyenne, se présente sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide avec des températures variant de 90 °C à 150 °C. Ces ressources sont généralement présentes à une profondeur d'environ 1 000 mètres dans les zones géothermiques à haute énergie, mais peuvent aussi être trouvées dans les bassins sédimentaires situés entre 2 000 et 4 000 mètres de profondeur. Pour produire de l'électricité, l'eau extraite est utilisée pour chauffer un autre fluide dans un système fermé, avec une température d'évaporation inférieure à celle de l'eau. Ce processus s'effectue au moyen d'un échangeur de chaleur [22].

iii. Géothermie basse énergie : Ce système a été conçu pour exploiter les températures des eaux souterraines, se situant entre 30°C et 90°C, présentes dans les bassins diamantifères à des profondeurs allant de 1500 à 2000 mètres. Il est fréquemment employé pour le chauffage résidentiel et commercial via un réseau de distribution de chaleur. De plus, il est utilisé de manière limitée dans certaines applications industrielles [22].

- iv. **Géothermie très basse énergie** : L'énergie géothermique à très basse énergie se produit à faible profondeur (aquifères) avec des températures comprises entre 10 et 30°C. Il est utilisé pour refroidir et chauffer le bâtiment à partir de puits canadiens (qui est représentée dans la figure 07). Une pompe à chaleur peut également être utilisée pour exploiter cette énergie [22].

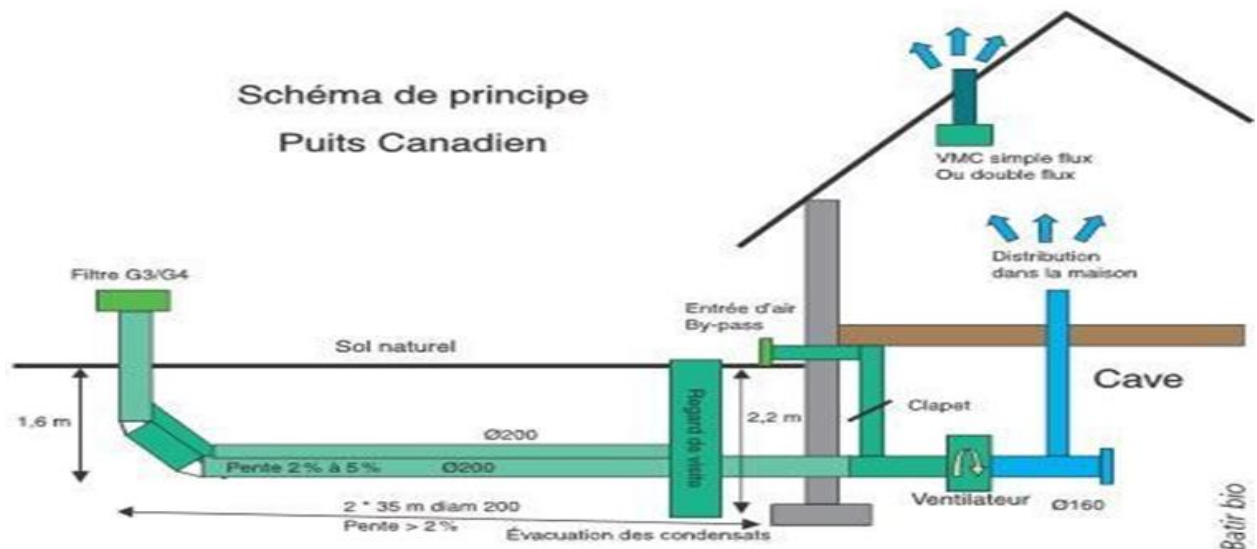


Figure I.8 : Schéma de principe de puits canadien [23]

II-2-2-4-2-Les avantages de la géothermie :

- La géothermie est une source d'énergie renouvelable, car elle exploite la chaleur naturelle du sous-sol terrestre, qui est continuellement régénérée par les processus géologiques.
- La géothermie de profondeur est indépendante des conditions atmosphériques telles que le soleil, la pluie ou le vent.
- C'est une source d'énergie quasi-continue.
- Les gisements géothermiques ont une longévité de plusieurs décennies, en moyenne de 30 à 80 ans, et sont présentes dans tous les sous-sols de la planète [22].

II-2-2-4-3-Les inconvénients :

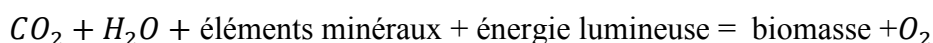
- Les coûts d'investissement et de maintenance sont particulièrement élevés.
- Possibilité d'instabilité du sol avec le risque de glissement de terrain.
- L'extraction de la géothermie peut avoir un impact sur les ressources en eau souterraine, pouvant entraîner des problèmes d'approvisionnement en eau dans certaines régions.
- Bien que considérée comme une source d'énergie propre, l'extraction de la géothermie peut parfois libérer des gaz à effet de serre et d'autres substances indésirables [22].

III- La biomasse :

La bioénergie moderne est aujourd'hui la plus grande source d'énergie renouvelable au monde, représentant 55 % de l'énergie renouvelable et plus de 6 % de l'approvisionnement énergétique mondial. Le scénario Net Zero Emissions by 2050 (NZE) prévoit une augmentation rapide de l'utilisation de la bioénergie pour remplacer les combustibles fossiles d'ici 2030. L'utilisation de la bioénergie moderne a augmenté en moyenne d'environ 3 % par an entre 2010 et 2022 et suit une

tendance à la hausse. Des efforts supplémentaires sont nécessaires pour accélérer le déploiement des bioénergies modernes afin de respecter le scénario NZE, qui nécessite que le déploiement augmente de 8 % par an entre 2022 et 2030, tout en garantissant que la production de bioénergie n'entraîne pas de conséquences sociales et environnementales négatives [24].

III-1- Définition de la biomasse : La bioénergie, également connue sous le nom d'énergie de la biomasse. Au sens large, le terme « biomasse » englobe la masse totale des êtres vivants présents dans un environnement naturel spécifique. En bref, ce sont toutes des matières organiques issues des plantes [25]. Les animaux et les produits qu'ils produisent à travers différentes transformations (déchets organiques). La biomasse provient directement ou indirectement du processus de photosynthèse chlorophyllienne. Dont la réaction de base s'écrit de manière simplifiée :



Généralement, la photosynthèse transforme moins de 1% de la lumière du soleil disponible. Cette énergie est emmagasinée dans les liaisons chimiques des végétaux [26]. Lors de l'utilisation de la biomasse dans un processus de valorisation (processus biologique, chimique ou thermique). Nous extrayons l'énergie en oxydant les atomes de carbone pour produire du dioxyde de carbone (CO_2) et de l'eau. Ce processus est cyclique, car le CO_2 ainsi généré est disponible pour la production de nouvelle biomasse [27].

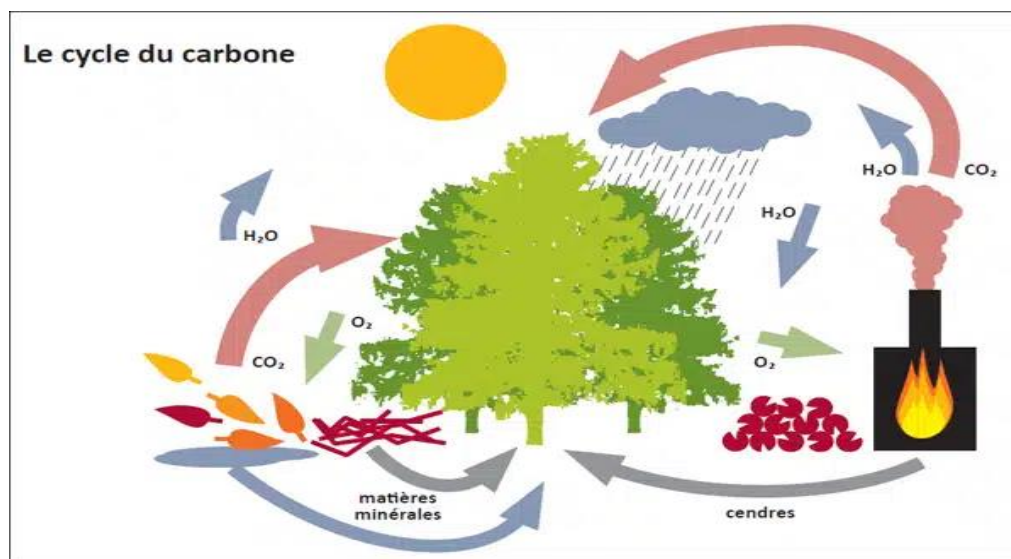


Figure I.9 : Schéma de cycle du carbone [28]

III-2- Les ressources de la biomasse :

Les ressources de la biomasse présentent une diversité en fonction de leur application spécifique. En tête de liste, on trouve le bois et ses déchets, qui contribuent à hauteur de 64 % dans l'utilisation globale. Les déchets représentent la deuxième principale source de bioénergie, englobant les déchets urbains et industriels, les résidus agricoles, ainsi que les déjections animales. Par ailleurs, l'utilisation de ces déchets joue un rôle significatif dans la diminution de la pollution environnementale et la préservation des ressources renouvelables [29].

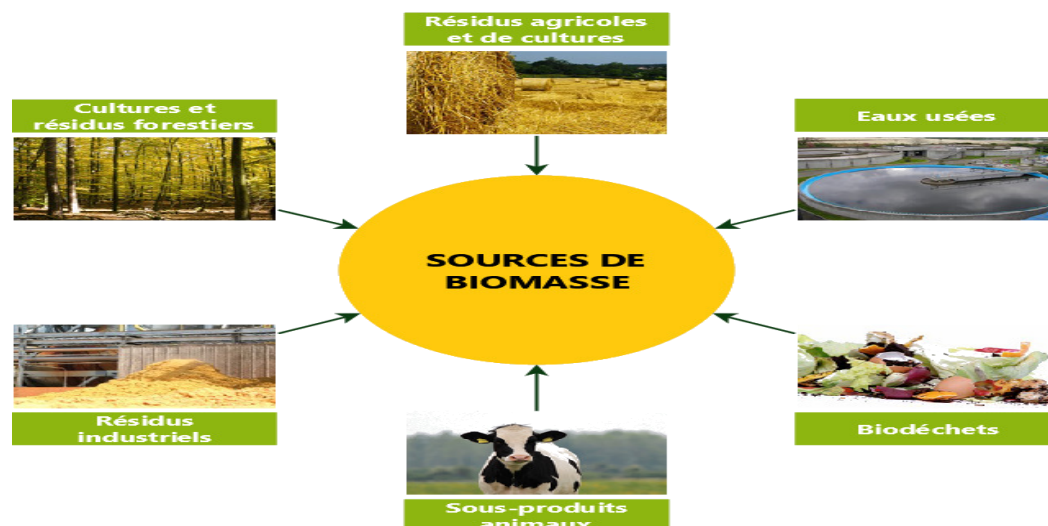


Figure I.10 : Différents ressources de la biomasse [30]

III-3- Les types de la biomasse :

Il existe divers procédés de valorisation énergétique de la biomasse, variée en fonction de la catégorie de la ressource et de l'usage recherché, on utilise deux types de biomasse :

III-3-1- La biomasse sèche : Il s'agit des « herbacées sèches » et du « bois », qui sont utilisés comme combustibles. Actuellement, il est envisageable de les convertir en gaz au sein d'installations spécifiques, permettant ainsi d'optimiser leur rendement énergétique [29].

III-3-2- La biomasse humide : Il englobe l'ensemble des déchets organiques mouillés tels que les déchets qui sont issue : 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 résiduels). Cette catégorie des déchets seront naturellement dirigées vers les procédés humides, tels que la fermentation [31].

III-4- Biomasse agricole : La biomasse agricole englobe toutes les matières organiques générées par les activités agricoles, telles que : la viande, le lait, les cultures, l'herbe, les résidus de culture et les effluents d'élevage. Avec une demande croissante de produits agricoles à des fins alimentaires, énergétiques et matérielles et une diminution des surfaces agricoles disponibles, la biomasse agricole est soumise à une pression croissante, susceptible de créer des conflits d'utilisation nécessitant une gestion efficace.

III-4-1- Le lisier : Il s'agit de matières fécales animales mélangées avec une faible teneur en matière sèche. Elles peuvent inclure des traces de paille ou des résidus d'alimentation. Ces déchets sont recueillis dans une fosse, parfois exposée à de légères infiltrations d'eau de pluie, donnant ainsi lieu à un mélange principalement liquide [32].

III-4-2- Les effluents d'élevage : Les effluents, issus des activités d'élevage, proviennent principalement de l'élevage bovin, ovin, caprin et vaches. Les fumiers et les lisiers représentent la majeure partie de ces effluents. La nature et la quantité des déjections d'élevage sont directement liées au type d'animal, à la structure du bâtiment d'élevage, ainsi qu'au temps que les animaux

passent à l'intérieur. Les volumes de fumiers et de lisiers produits par les animaux varieront en fonction de la catégorie d'animaux, que ce soit des vaches laitières, des porcs charcutiers ou des poules pondeuses [32].

III-4-3-Le fumier : Le fumier est le produit obtenu par le mélange, dans les structures d'élevage, des excréments des animaux avec de la paille (ou une litière faite de copeaux, de sciures, etc.). Ce mélange génère un effluent relativement sec, facile à manipuler et à stocker. Après le raclage, ces fumiers sont entreposés sur une plate-forme. Généralement, ils sont répandus sur les terres agricoles pour apporter des éléments fertilisants et de la matière organique, contribuant ainsi à améliorer la structure du sol. Il existe plusieurs catégories de fumier :

- **Fumier très compact :** Il provient de la litière accumulée, notamment dans le cadre de systèmes d'élevage en stabulation avec aire paillée intégrale, par exemple.
- **Fumier compact :** Il est issu de la litière accumulée, que ce soit dans une stabulation à pente paillée ou dans une étable entravée.
- **Fumier mou :** Il provient du raclage des logettes ou d'une aire d'exercice paillée, par exemple.

Par conséquent, la quantité de lisier issue de ces fumiers peut varier en fonction de leur composition, ce qui signifie qu'il existe plusieurs situations où les déjections ne correspondent pas nécessairement à ces catégories définies. De plus, ces déjections présentent un potentiel méthanogène significatif, ce qui qualifie ce type de biomasse comme une source d'énergie renouvelable [32].

III-5- les principales voies de valorisation énergétique de la biomasse :

La biomasse, en tant que source d'énergie, présente des défis lorsqu'elle est utilisée à l'état brut. Cependant, sa transformation offre la possibilité d'obtenir des combustibles plus avantageux, se présentant sous différentes formes, telles que solide (granulés, plaquettes, charbon de bois), liquide (éthanol, biodiesel, bio-huiles de pyrolyse) et gazeuse (gaz de décharge, biogaz, gaz de bois ou d'autres résidus utilisables dans des moteurs, chaudières ou turbines). La conversion énergétique de la biomasse repose principalement sur deux types de procédés de conversion, à savoir :

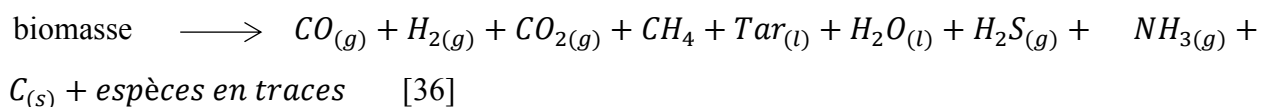
- La voie thermochimique ou sèche, incluant des processus tels que la combustion, la gazéification et la pyrolyse.
- La voie biochimique ou humide, comprenant des procédés tels que la digestion et la fermentation [33].

III-5-1- La voie thermochimique : Les procédés de la voie thermochimique englobent diverses méthodes qui reposent sur le craquage des biomolécules sous l'effet de la chaleur :

➤ **La combustion :** La combustion est une dégradation en présence d'oxygène, idéalement une décomposition convertie complètement le matériau carboné initial en CO_2 et H_2O tout en libérant de l'énergie thermique (énergie de combustion) [34].

➤ **La pyrolyse** : La pyrolyse trouve son origine dans les mots grecs "pyro", qui signifie feu, et "lyse", faisant référence à la décomposition ou à la désagrégation en constituants. En bref, la pyrolyse représente la dégradation thermique du combustible solide initial dans une atmosphère sans oxygène ou en présence d'une quantité d'oxygène inférieure à celle requise pour une combustion complète. Elle aboutit à la production de solides (résidu carbonisé ou charbon), de liquides ou de vapeurs condensables (eau, goudrons et bio-huiles) et de gaz non condensables (mélange contenant principalement CO, CO₂, CH₄ et H₂) [35].

➤ **La gazéification** : La gazéification de la biomasse est effectuée en présence d'un agent gazéifiant pour produire du syngaz. Ensuite, le syngaz peut être amélioré pour produire des carburants hydrocarbonés (HC) ou des produits chimiques grâce à une amélioration chimique/catalytique. Une réaction de gazéification simplifiée peut être représentée dans l'équation. (1) comme ci-dessous :



III-5-2- La voie biochimique : Les conversions biochimiques sont des transformations naturelles de décomposition sous l'influence des bactéries. Cependant, il est envisageable de les gérer de manière à générer un combustible aisément exploitable. On distingue des différentes procédées biochimiques :

III-5-2-1- La fermentation alcoolique : La fermentation est une réaction biochimique qui se produit dans le cytoplasme, au cours duquel l'énergie stockée dans un substrat organique est libérée grâce à l'action d'enzymes microbiennes. Cela résulte en une oxydation incomplète du substrat [37]. La fermentation alcoolique désigne le processus où les levures transforment les sucres fermentescibles en conditions anaérobies, générant de l'alcool, du dioxyde de carbone et dégageant de l'énergie sous forme de chaleur [38].

III-5-2-2- La fermentation méthanique : Actuellement, la fermentation méthanique émerge comme la voie la plus prometteuse dans le domaine de la bioénergie parce qu'elle permet de produire un mélange gazeux combustible appelé biogaz. Ce biogaz peut être utilisé en l'état pour des besoins de chauffage ou d'électricité. Les progrès récents de la recherche ont ouvert la voie à son application industrielle, la rendant progressivement tangible. Les techniques disponibles présentent déjà une performance suffisante pour rendre économiquement viables les systèmes proposés. Cependant, cela ne marque qu'un début prometteur. La poursuite des recherches permettra, à l'avenir, d'apporter des améliorations continues et d'optimiser davantage ces systèmes.

III-6- La digestion anaérobie :

III-6-1- Définition : La méthanisation, également connue sous le nom de digestion anaérobie (DA) ou la fermentation méthanique est un processus naturel où la matière organique est convertie en énergie par des bactéries méthanogènes en l'absence d'oxygène. Elle se déroule dans des enceintes confinées appelées "digesteurs", où les réactions de fermentation sont optimisées et régulées. Ces

digesteurs génèrent du biogaz, principalement composé de méthane, tout en réduisant de moitié la quantité de matières organiques issues de divers déchets ou sous-produits biodégradables. Le résidu résultant de la digestion anaérobie, également appelé digestat, présente des caractéristiques de stabilité et largement débarrassé des germes pathogènes [39].

III-6-2- Historique de la méthanisation : L'utilisation de biogaz est connue depuis longtemps, remontant au moins au Xe siècle avant J.-C., où il aurait été utilisé en Assyrie pour chauffer les bains. Cependant, c'est au XVIIe siècle que les scientifiques ont commencé à s'intéresser au processus de méthanisation, Boyle, Papin et Van Helmont ont découvert à cette époque que la décomposition des organismes animaux et végétaux produisait un gaz inflammable. Un siècle plus tard, Volta a établi une corrélation directe entre la quantité de matière organique en décomposition et la quantité de gaz produite. Entre 1804 et 1810, Dalton, Henry et Davy ont identifié la composition chimique du méthane généré lors de la décomposition des animaux. En 1876, Herter a démontré que les boues pouvaient se convertir en méthane et CO_2 selon des proportions stœchiométriques. Le premier digesteur industriel a été construit en 1859 en Inde, dans une colonie de Bombay. Dès 1897, le gaz provenant de la fermentation des effluents sanitaires d'une léproserie (Matinga Leper) était utilisé pour l'éclairage, tandis qu'en 1896, le gaz issu des boues était également utilisé pour l'éclairage des rues à Exeter, en Angleterre. La recherche appliquée sur la digestion anaérobie a débuté avec Buswell en 1920. Il a identifié les principaux processus de dégradation anaérobie, établissant la stœchiométrie associée, et a également développé les premières filières à l'échelle de la ferme [40].

III-6-3- les différentes étapes de la méthanisation : La méthanisation implique un processus de fermentation anaérobie complexe qui comprend plusieurs étapes biochimiques, chacune étant le résultat de l'action de différents groupes bactériens. L'ensemble des réactions se déroulant dans un digesteur peut se diviser en quatre étapes principales :

- **L'hydrolyse :** est l'étape la plus lente durant laquelle les macromolécules composant la matière organique se décomposent en monomères respectifs (monosaccharides, acides aminés et acides gras à longues chaînes) sous l'action des enzymes par des bactéries hydrolytiques [41].
- **L'acidogenèse :** l'acidogenèse implique la conversion des monomères obtenus à l'étape d'hydrolyse en acides gras volatils (AGV, acides gras de six carbones ou moins tels que l'acide acétique, propionique, butyrique, valérique, etc.), alcools, en H_2 et en CO_2 par des bactéries acidifiantes, La cinétique de l'acidogenèse peut être élevée relativement aux autres étapes de la méthanisation (s'accomplit parfois en quelques heures) [41].
- **L'acétogenèse :** dans cette étape, les acides gras volatils et les alcools se transforment en acide acétique (CH_3COOH), dioxyde de carbone et hydrogène à cause de 03 catégories de bactéries : les acétogènes productrices obligées d'hydrogène (qui sont des bactéries syntrophiques ayant pour caractéristiques d'effectuer des réactions dont les variations d'enthalpie libre standard sont

positives), les bactéries homo-acétogènes, et des sulfato-réductrices qui peuvent posséder une des fonctions précédentes. Il y a des homo-acétogènes produisant l'acétate à partir d'un substrat carboné et celles le produisant à partir de la réduction du dioxyde de carbone par l'hydrogène. La production d'hydrogène ne se poursuit que si les bactéries qui le consomment sont présentes (les bactéries homoacétogènes, méthanogènes hydrogénophiles, sulfato-réductrices...) sinon, il y a inhibition. Les processus réactionnels de l'acétogénèse à des vitesses relativement lentes [41].

➤ **La méthanogénèse** : c'est la dernière phase au cours de laquelle le méthane est généré à partir de l'acide acétique, des acétates ou d'un mélange d'hydrogène et de gaz carbonique. Ce mécanisme est possible grâce à des archéobactéries méthanogènes, également désignées sous les termes d'archéobactéries acétoclastes ou hydrogénotrophes en fonction de leur capacité à convertir respectivement l'acide acétique ou l'hydrogène en méthane, accompagné de gaz carbonique ou d'eau. Les premières présentent une croissance lente, s'étalant sur une période de 0,5 à plusieurs jours, mais elles sont généralement responsables d'environ 70 % de la production totale de méthane à partir de matières organiques. En revanche, les secondes, connues sous le nom d'hydrogénophiles, affichent des temps de dédoublement de l'ordre de quelques heures lorsqu'elles transforment l'hydrogène et le gaz carbonique en méthane et en eau. Ces archéobactéries méthanogènes sont des microorganismes strictement anaérobies, sensibles aux variations de leur environnement, et sont souvent qualifiées d'extrémophiles en raison de leurs différences physiologiques significatives par rapport aux bactéries environnementales communes [41].

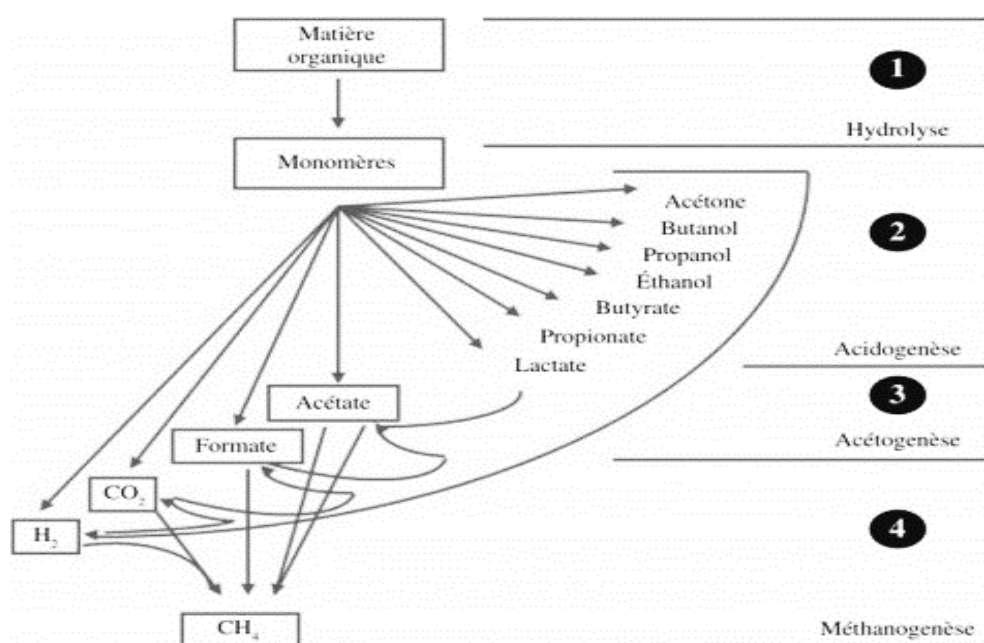


Figure I.11 : Les grandes étapes de la DA d'après Gracia (1990) [42]

III-6-4- Paramètres influençant la digestion anaérobie : Plusieurs paramètres régissent le bon déroulement d'une fermentation méthanique. D'après la littérature, la température et surtout l'humidité des déchets sont identifiées comme les deux principaux facteurs régissant l'activité microbienne et la production de biogaz. Outre ces éléments, d'autres paramètres tels que la

composition des déchets et leurs propriétés "mécaniques" (densité, porosité, etc.) ainsi que le pH du milieu se révèlent également significatifs en ce qui concerne les cinétiques de dégradation [43].

a. Température : L'élévation de la température augmente l'efficacité de la méthanisation, comme pour d'autres processus biochimiques, car la méthanisation est peu oxydative et donc peu exothermique[44]. Cependant, il est important de noter que l'amélioration de l'efficacité n'évolue pas de manière constante, mais plutôt présente des plages de température optimales. Le maintien de la température à l'intérieur de l'une de ces plages est crucial pour garantir l'efficacité du processus [43].

La fermentation méthanique anaérobie peut s'effectuer à trois gammes de températures, en fonction des préférences écologiques de la flore bactérienne :

- Psychrophiles : $T < 20\text{ °C}$.
- Mésophiles : $20\text{ °C} < T < 45\text{ °C}$ avec un optimum à 35 °C
- Thermophiles : $45\text{ °C} < T < 65\text{ °C}$ avec un optimum à 55 °C [45]

L'activité des micro-organismes, qui influence directement la production de méthane, varie en fonction de la température du milieu. Entre 32 °C et 40 °C , on estime qu'une augmentation de la température de 1 °C entraîne une augmentation de 5% de la production de biogaz [27].

Nous observons la présence de deux optima, l'un pendant la phase mésophile et l'autre lors de la phase thermophile.

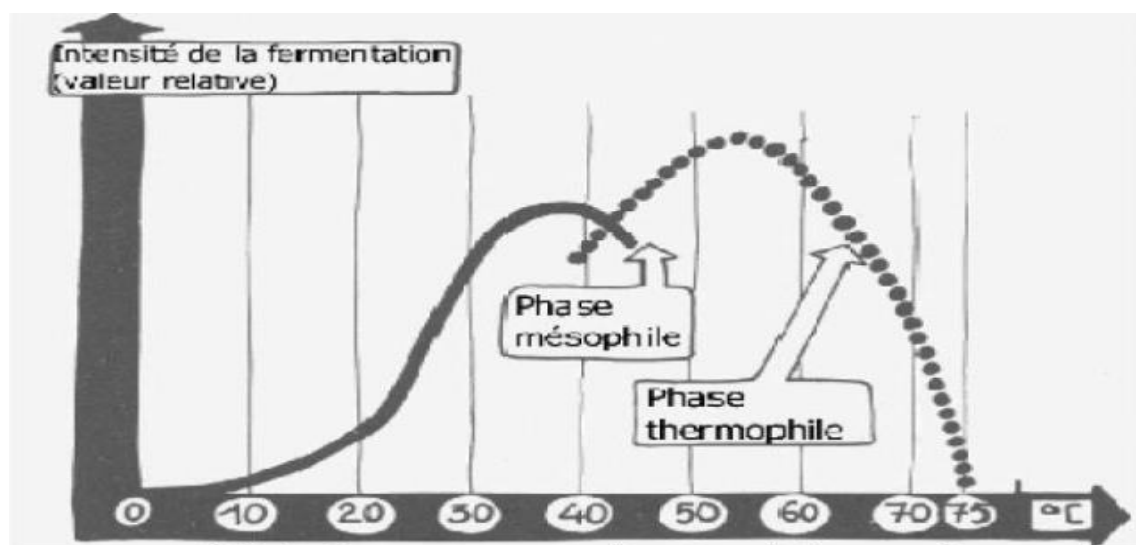


Figure I.12 : Intensité de la fermentation en fonction de la température [27]

La plage de température entre 10 °C et 20 °C est qualifiée de psychrophile. Compte tenu de l'activité microbienne accrue à des températures spécifiques, il est compréhensible que, pour une masse équivalente à digérer, la durée soit d'autant plus courte que l'intensité de la fermentation est élevée. La courbe suivante nous montre la production de gaz en fonction de la température :

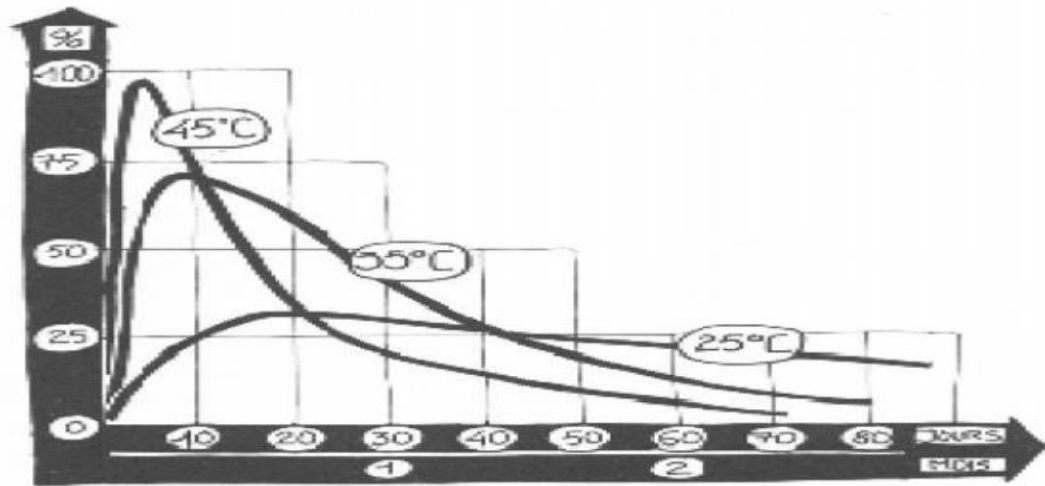


Figure I.13 : Production de gaz à différentes températures en fonction des jours [27]

b. Ph : Le pH est un paramètre important, la baisse du pH jusqu'en dessous de 4 implique inévitablement une inhibition significative de la phase méthanogène [46]. La plage optimale de pH se situe entre 6,4 et 7,2. Une acidification induite par l'accumulation d'acides gras volatils non dissociés peut entraver la production de gaz [27].

c. L'humidité : La production de méthane à partir de déchets solides est directement influencée par la teneur en eau, agissant à travers les réactions métaboliques, le transport des nutriments et des microorganismes. La présence d'eau facilite la diffusion des composés dans le milieu [47]. Des expérimentations réalisées avec des boues contenant des composés solides ont révélé que la production de méthane diminue proportionnellement à la baisse de la teneur en eau. Une réduction de la production de méthane de 100 % à 53 % a été observée pour des teneurs en eau diminuant de 96 % à 90 % [48]. La même observation a été faite lors de la décomposition de déchets ménagers, avec une réduction de la production de méthane constatée à des teneurs en matière sèche allant de 10 % à 35 %. alors Pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable. L'humidité minimale est de 60 à 70%.

d. L'anaérobiose : Les trois premières étapes de la fermentation peuvent se dérouler en présence d'oxygène. En revanche, la phase méthanogène nécessite un environnement sans oxygène, caractérisé par une flore strictement anaérobie. Il est essentiel que le potentiel d'oxydoréduction du milieu soit maintenu autour de -300 mV [27].

e. Le rapport C/N : De manière similaire à la digestion aérobie, le rapport entre le carbone et l'azote dans la matière organique joue un rôle crucial dans le fonctionnement optimal des réacteurs. Des recherches suggèrent qu'une proportion idéale se situe entre 20 et 30, 25 étant considéré comme le ratio optimal. Un apport accru en azote peut conduire à une production accrue d'ammoniac, entraînant des effets néfastes sur les microorganismes et provoquant une inhibition de la méthanisation [49].

f. Acides Gras Volatiles : La surveillance d'un traitement anaérobie nécessite une attention particulière à la concentration en acides gras volatils, un paramètre d'une importance cruciale car les

AGV sont convertis en méthane par les bactéries méthanogènes, contribuant ainsi à la production de biogaz. Le fait de connaître la concentration en acides gras de l'effluent d'un traitement anaérobie nous permet de savoir si la dégradation est complète ou non [50].

g. Temps de rétention hydraulique (TRH) : Le temps de séjour moyen du substrat dans le réacteur est essentiel dans le processus de digestion anaérobie. Il représente la durée pendant laquelle le substrat est retenu dans le fermenteur et est calculé en divisant le volume utile du fermenteur par le débit volumique du substrat. Ce paramètre opérationnel joue un rôle crucial dans les différentes réactions de la digestion. Si le temps de séjour est inférieur à 5 jours, cela peut entraîner une instabilité de la digestion en raison du lessivage des microorganismes méthanogènes. Par conséquent, il est important de veiller à ce que le temps de séjour soit adéquat pour maintenir une digestion stable et efficace [9].

h. Nature des déchets : La biodégradabilité des déchets et leur nature constituent des facteurs cruciaux dans l'évaluation du potentiel méthanogène où plus la part des déchets pouvant se décomposer naturellement est élevée, plus les rendements en gaz sont susceptibles d'être élevés [51]. Trois catégories de déchets, distinguées par leur taux de dégradation, ont été identifiées :

- Les déchets rapidement biodégradables : Cela inclut principalement les matières putrescibles, les déchets verts, les fruits et légumes, ainsi que les matières animales.
- Les déchets moyennement biodégradables : Cette catégorie englobe tout ce qui est constitué de boue ou de graisse.
- Les déchets lentement biodégradables : Ils comprennent les papiers, cartons et bois.

Les recherches sur l'influence de la taille et de la densité des particules demeurent sujettes à controverse.

III-6-5- Le digesteur : Le digesteur, également connu sous les noms de fermenteur ou de bioréacteur anaérobie, il représente le réacteur chimique où s'opère la fermentation des déchets riches en matière organique. Ce réacteur se compose d'un réservoir cylindrique hermétiquement fermé, et de préférence isolée thermiquement de l'extérieur, où des micro-organismes interagissent pour décomposer chimiquement et biologiquement les effluents organiques. Il peut être équipé d'un système de chauffage, d'agitation, de prélèvement et de mesure de la teneur en gaz, permettant ainsi le contrôle de différents paramètres tels que la pression, pH...etc. [52].

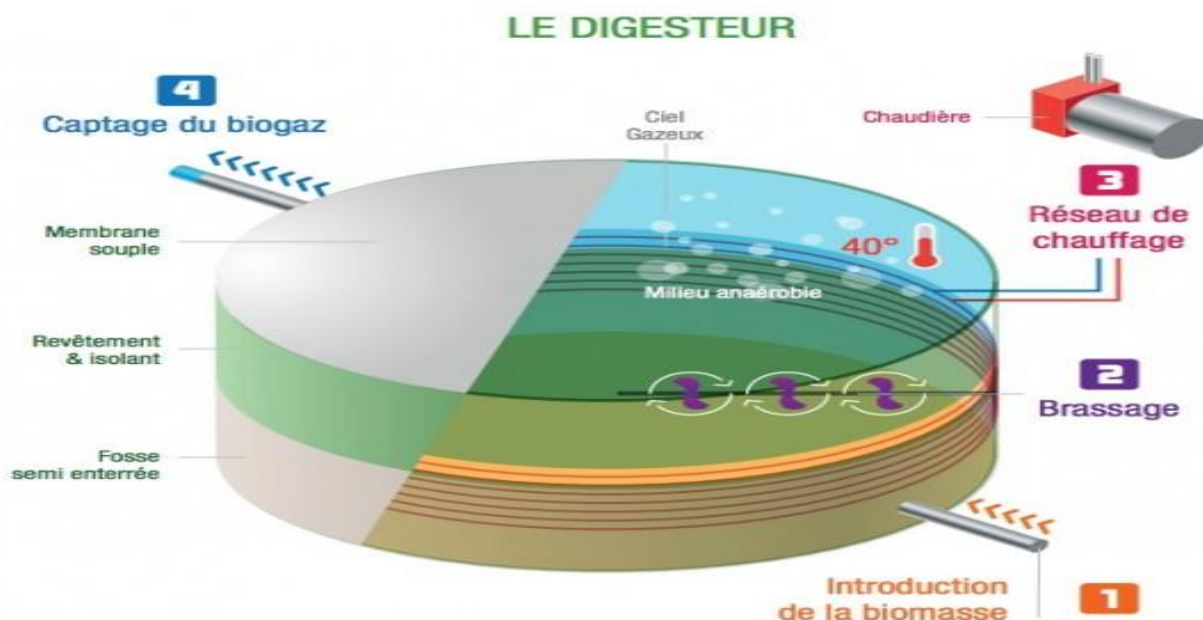


Figure I.14 : Schéma de digesteur [53]

III-6-5-1- les différents types des digesteurs : On distingue 02 types de digesteurs :

III-6-5-1-1- Le digesteur à alimentation continue : Un digesteur anaérobie à alimentation continue, ou digesteur anaérobie en flux continu, est un système de digestion qui traite un flux constant de matières organiques sans interruption. Les matières organiques alimentent le digesteur en continu et la production de biogaz est également continue. L'alimentation continue permet une utilisation optimale de la capacité du digesteur et une utilisation plus efficace des substrats [54]. Ici on peut distinguer deux sous-catégories :

– **Les digesteurs sans recyclage de microorganismes actifs :** constitués de digesteurs continus infiniment mélangés, les digesteurs du type piston.

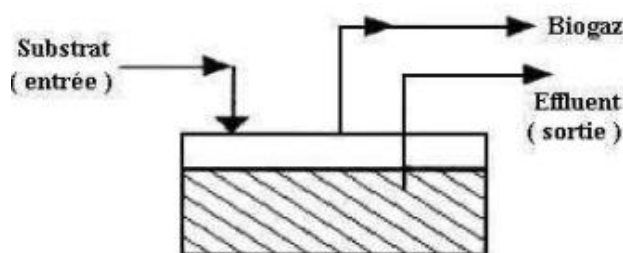


Figure 1. 15 : Digesteur à alimentation continue en substrat sans recyclage des bactéries [48]

– **Les digesteurs avec recyclage de microorganismes actifs :** dans le contexte du digesteur, il existe deux approches différentes, soit sans support (tel que le digesteur à lits de boues), soit avec support (tel que le digesteur à lits fixés). Ces deux méthodes offrent des avantages et des inconvénients spécifiques en termes d'efficacité de la digestion et d'élimination des matières organiques, comme illustré dans le schéma ci-après :

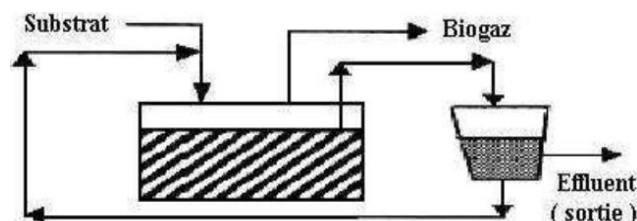


Figure 1. 16 : Digesteur à alimentation continue en substrat avec recyclage des bactéries [48]

III-6-5-1-2- Le digesteur à alimentation discontinue (digesteurs type batch) : L'alimentation en substrats peut être effectuée en une seule fois ou de manière progressive sur une période de temps donnée.

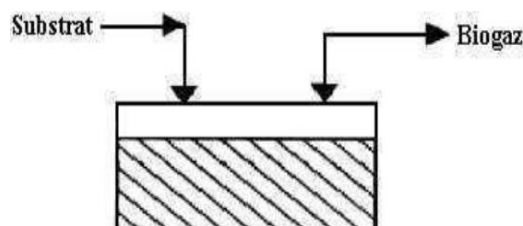


Figure 1. 17 : Digesteur à alimentation continue en substrat sans recyclage des bactéries [48]

III-6-5-2- Géométrie des digesteurs : La géométrie des digesteurs peut varier selon leur conception et leur fonctionnement. Ils peuvent être de forme cylindrique, sphérique, en forme de tour, de cuve ou même de lits fluidisés. La géométrie dépend des contraintes physiques, des objectifs de traitement et des caractéristiques des matériaux traités [55].

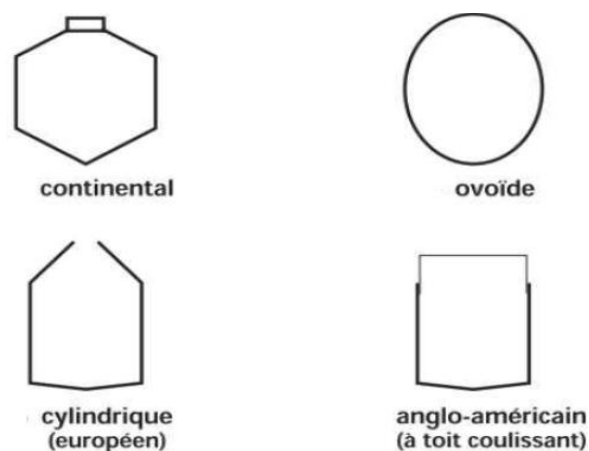


Figure 1. 18 : Différentes géométries de digesteurs [56]

III-6-6- Les produits de la méthanisation :

➤ **Le biogaz :** Le biogaz est un mélange de gaz produit par la décomposition des matières organiques, il est principalement composé de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2), ainsi que de petites quantités d'autres gaz tels que le sulfure d'hydrogène (H_2S), l'ammoniac (NH_3) et des traces de contaminants.

Gaz produits en conditions anaérobie	Teneurs habituels
CH_4	50 à 70 %
CO_2	35 à 40 %

Gas divers: $H_2S, NH_3, C_nH_{2n}, \dots$	1 à 5 %
N_2	1 à 3%
O_2	0,1% à 1%

Tableau 1.1 : Composition du biogaz issu de déchets organiques [57]

Concernant la production de biogaz sur les différents substrats et à la lumière des valeurs consignées dans le tableau II, il est évident que les eaux usées sont le substrat le plus favorable pour la production de biogaz. Cependant, il est possible d'utiliser les bouses de vaches et les fientes de volailles comme sources alternatives de matières organiques pour produire du biogaz, surtout lorsque ces substrats sont mélangés. Ces deux derniers substrats sont en effet des options intéressantes, notamment pour des raisons de commodité.

Déchets	Rendement moyen (Litre/kg de M.S.)
<u>Déchets animaux</u>	
Bouse de vaches	200
Crottins de chevaux	200
Fientes de volailles	310
Fumier de moutons	135
<u>Eaux d'égout</u>	340

Tableau 1.2 : Rendement de production de biogaz en fonction de la nature du substrat [58]

- **Le pouvoir calorifique du biogaz** : En sortant du digesteur, le biogaz brut présente des propriétés énergétiques moins avantageuses que celles du gaz naturel. Cependant, en purifiant le biogaz brut, notamment pour améliorer son pouvoir calorifique inférieur (PCI), on peut obtenir des propriétés similaires à celles du gaz naturel. En général, le biométhane issu du biogaz purifié offre une compétitivité comparable à d'autres sources d'énergie. La figure 1.17 illustre les équivalences énergétiques d'un mètre cube de biométhane [59].

Le biogaz peut être valorisé de différentes manières pour produire de l'énergie :

- **La production de chaleur** : le biogaz peut être brûlé dans une chaudière traditionnelle pour produire de la chaleur.
- **La production combinée de chaleur et d'électricité** : le biogaz peut être utilisé à la fois dans une chaudière et dans un moteur thermique relié à un alternateur, permettant ainsi de produire à la fois de l'électricité et de la chaleur.
- **L'injection de biogaz dans le réseau de gaz de ville après purification.**
- **L'utilisation du biogaz comme carburant pour les véhicules** : une unité de traitement de 20 000 tonnes de déchets par an peut produire suffisamment de biogaz pour permettre à 2000 voitures de

parcourir 10 000 km par an. En résumé, un kilogramme de déchets peut être converti en énergie suffisante pour parcourir un kilomètre en voiture [60].

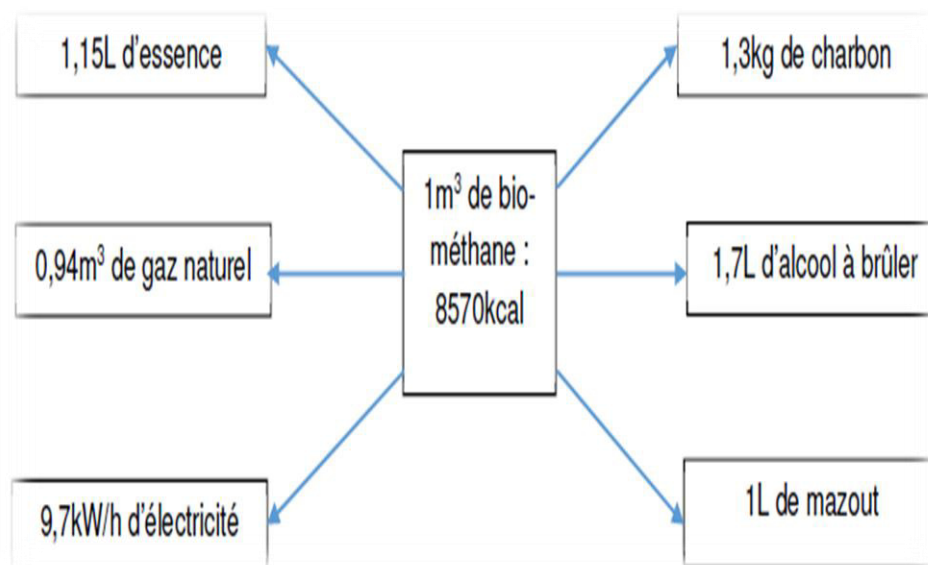


Figure 1. 19 : Comparatif énergétique [59]

➤ **Le digestat** : Le digestat est le résidu obtenu après la méthanisation. Il est composé de matière organique non dégradable, de substances minérales telles que l'azote et le phosphore, ainsi que d'une certaine quantité d'eau. Ce mélange est stocké dans des fosses ou des dalles en béton [61].



Figure 1.20 : Élimination des digestats par centrifuge [61]



Figure 1.21 : Stockage des digestats sur une dalle en béton [61]

Caractéristiques du digestat :

- L'absence d'odeurs est due à la digestion des matières organiques dans le méthaniseur, ce qui permet d'éliminer les nuisances olfactives.
- La réduction des germes pathogènes est obtenue grâce à l'hygiénisation lors du processus de méthanisation.

- La valeur amendante des matières organiques est préservée car la fraction ligneuse, qui contribue à la formation d'humus, n'est pas altérée.
- La valeur fertilisante est améliorée car l'azote est converti en forme ammoniacale, ce qui facilite son assimilation par les plantes. Cependant, cette forme plus volatile de l'azote nécessite une gestion spécifique lors du stockage et de l'épandage, comme son enfouissement au printemps.
- Le digestat, étant plus fluide que le lisier non traité, pénètre plus rapidement dans le sol. Il peut être séparé en une fraction solide riche en matières organiques et en éléments phosphatés, qui peut être utilisée comme amendement, et une fraction liquide contenant de l'azote ammoniacal et peu de matières organiques, qui peut être utilisée comme engrais liquide en remplacement des engrais minéraux azotés [62].

Valorisation du digestat : Pour valoriser efficacement le digestat, il est nécessaire d'avoir une qualité optimale, qui dépend du type d'entrée (et de la co-digestion), du procédé de conversion, ainsi que des traitements et du type de stockage. Les indicateurs de qualité du digestat incluent son innocuité (chimique et microbiologique), sa teneur en éléments nutritifs et son absence de biodégradabilité (stabilité). L'efficacité agronomique du digestat dépend des modalités d'épandage et des conditions pédoclimatiques. Le plus souvent, le digestat est utilisé comme engrais sans aucun traitement. Lorsqu'il est séparé en phases liquide et solide, la fraction solide peut être considérée davantage comme un amendement organique que comme un engrais, car elle contient plus de carbone que le digestat brut [63].

Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a abordé les aspects fondamentaux des énergies renouvelables, en mettant particulièrement l'accent sur la biomasse en tant que source d'énergie renouvelable avantageuse, car elle offre des avantages considérables en termes de disponibilité, de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de promotion de l'autosuffisance énergétique.

En outre, ce chapitre a souligné l'importance de la méthanisation en tant que moyen de transformation durable des déchets organiques en énergie renouvelable, offrant ainsi une alternative prometteuse pour atteindre nos objectifs environnementaux et économiques.

Référence :

- [1] B. Augé, « Les majors pétrolières, du tout pétrole aux énergies renouvelables, décryptage d'un changement de modèle ou de communication: », *Hérodote*, vol. N° 188, n° 1, p. 11-26, mars 2023, doi: 10.3917/her.188.0011.
- [2] Chiffres clés des énergies renouvelables - Édition 2023. Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports. Disponible sur <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-des-energies-renouvelables-edition-2023>.

- [3] A.FARES et A.BOUCHELAGHEM « Contribution à l'étude d'un système aérovoltaique Soutenu publiquement », mémoire de master, Université 8 Mai 1945 ,Guelma,2021.
- [4] A.NECHMI « Aperçu sur le système de pompage photovoltaïque destiné POUR l'alimentation en eau potable », mémoire de master, école national supérieure d'hydraulique - Arbaoui Abdellah, 2015.
- [5] « Cellule photovoltaïque », Groupe Roy Énergie. Disponible sur: <https://www.greenr.fr/cellule-photovoltaïque/>
- [6] A. Zidane , « les systèmes photovoltaïque connectes au réseau » mémoire de master, université Badji Mokhtar, Annaba,2017.
- [7] « Panneaux solaires thermiques : Guide d'achat - Conseils Thermiques ». Disponible sur https://conseilsthermiques.org/contenu/panneau_solaire_thermique.php
- [8]: Alain FERRIÈRE, « Centrales solaires thermodynamiques », 10 avr. 2008, doi: <https://doi.org/10.51257/a-v1-be8903>.
- [9] « L'énergie solaire thermodynamique- éducol STI ». Disponible sur: https://eduscol.education.fr/sti/ressources_techniques/lenergie-solaire-thermodynamique
- [10] Bc. Monika Kokrdová, « L'ENERGIE SOLAIRE », UNIVERSITÉ PALACKY, OLOMOUC, 2011.
- [11] B. mehdi Bendjddou mohamed, « énergie solaire photovoltaïque », mémoire de master, université de 08 mai 1945, Guelma, 2017.
- [12] Dabo Antsoura, « étude technico-économique pour la réalisation d'une installation photovoltaïque avec stockage pour l'électrification de la bnda », institut international d'ingénierie (i2E), Burkina Faso, 2014.
- [13] A. Chaudhuri, R. Datta, M. P. Kumar, J. P. Davim, et S. Pramanik, « Stratégies de conversion d'énergie pour les systèmes éoliens : aspects électriques, mécaniques et matériels », *Materials*, vol. 15, n° 3, p. 1232, févr. 2022, doi: 10.3390/ma15031232.
- [14] H. Mesai Ahmed, Y. Djeriri, et N. KAIS, « Commande de la machine asynchrone à double alimentation – apport des techniques de l'intelligence artificielle », 2017. Doi: 10.13140/RG.2.2.21789.41446.
- [15] N. H. E. Belaid, « Energie éolienne », mémoire de master, Université BADJI MOKHTAR,Annaba, 2021.
- [16] « Parc éolien de Middelgrunden », *Wikipédia*. 26 novembre 2023. Disponible sur https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Parc_%C3%A9olien_de_Middelgrunden&oldid=21001991
- [17] R. G. Lavillat Théo, « Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus », Ecosources. .Disponible sur: <https://www.ecosources.org/eolienne-verticale-darrieus>.

- [18] A. LARABI, « conception de la commande d'une machine asynchrone destinée à l'énergie renouvelable », mémoire de master, université Mohamed Boudiaf, Oran, 2018.
- [19] « badi_mossab_abd_raouf.pdf ». Disponible sur: http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/14982/1/badi_mossab_abd_raouf.pdf
- [20] CHEMOUL et GHERABI, « ETUDE ET CHOIX D'UNE TURBINE HYDROELECTRIQUE », mémoire de master, université Mohamed Boudiaf, Msila, 2022.
- [21] B. Hocine, « Etude du Rafraîchissement par la Géothermie, Application à l'Habitat », Mémoire de magistère, Université Mohamed Khider, Biskra, 2009.
- [22] M.BELACHI et Ch.BOUGOFFA, « Etude paramétrique des performances de l'échangeur de chaleur air-sol pour les applications de refroidissement. », mémoire de master, université KASDI MERBAH, OUARGLA, 2022.
- [23] « Puits Canadien : Principe, Avantages & Inconvénients | BatirBio », Batirbio - Puits canadien. Disponible sur: <https://www.batirbio.org/puits-canadien/>.
- [24] « Energy system », IEA. Disponible sur: <https://www.iea.org/energy-system>.
- [25] A. KHELFA « Etude Des Etapes Primaires De La Dégradation Thermique De La Biomasse Lignocellulosique », thèse de doctorat, Université Paul Verlaine Metz, France, 2006.
- [26] G.MALIKA « Modélisation de l'activité photosynthétique de la feuille au couvert : cas d'une jachère post -culturale », thèse de doctorat, Université TOULOUSE III- PAUL SABATIER U.F.R SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE, France, 2006.
- [27] FARADJI née KHERBOUCHE Djamila, « Contribution à la valorisation énergétique de la biomasse », thèse de doctorat, université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2011.
- [28] « Comment ça marche l'énergie de la biomasse ? », MtaTerre. Disponible sur: <https://mtaterre.fr/articles/comment-ca-marche-lenergie-de-la-biomasse/>
- [29] A. Lamir, « Production du biogaz à partir des folioles et pétioles des palmiers dattiers (Phoenix dactylifera L) variété H'mira: Etude comparative », mémoire de master, Université Ahmed Draïa, Adrar, 2020.
- [30] « La biomasse | biomasse-conseil.fr ». Disponible sur: <https://www.biomasse-conseil.fr/content/la-biomasse>.
- [31] B. FEDDAL-BENABED, « Etude des propriétés thermophysiques des mélanges contenant des composés dérivés de la biomasse », thèse de doctorat, université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2015.
- [32] M. IKHLEF et R. OUAZENE, « Étude technico-économique d'un projet de micro-cogénération alimenté au biogaz », mémoire de master, École Nationale Polytechnique, 2019.

- [33] M. KECHKAR, « PROCÉDE DE CONVERSION DE LA BIOMASSE POUR LA PRODUCTION DURABLE DE BIOCARBURANTS », thèse de doctorat, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, 2020.
- [34] Y. ROGAUME, « La combustion du bois et de la biomasse », *Pollution atmosphérique*, vol. 65, 2009, Disponible sur: https://www.appa.asso.fr/wp-content/uploads/2020/02/Rogaume_2009.pdf
- [35] M. ABOU RJEILY, « Production de gaz de synthèse par pyrolyse de biomasse et reformage catalytique de volatils », thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE, ARDENNE, 2022.
- [36] V. S. Sikarwar, M. Zhao, P. S. Fennell, N. Shah, et E. J. Anthony, « Progress in biofuel production from gasification », *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 61, p. 189-248, juill. 2017, doi: 10.1016/j.pecs.2017.04.001.
- [37] I. Chibane, R. Ghouba, « La bio-production d'éthanol par *Saccharomyces cerevisiae* cultivé sur milieu à base de déchets de dattes », mémoire de master, Université L'Arbi Ben Mhidi Oum El Bouaghi, 2021.
- [38] L. Pasteur, *Mémoire sur la fermentation alcoolique*. BoD – Books on Demand, 2023.
- [39] S. Kalloum, M. Khelafi, et M. Djaafr, « Etude de l'influence du pH sur la production du biogaz à partir des déchets ménagers », *Revue des Energies Renouvelables*, vol. Vol. 10 N°4 (2007) 539 – 543, nov. 2007.
- [40] F. Béline, P. Peu, P. Dabert, A. Trémier, G. Le Guen, et A. Damiano, « La méthanisation en milieu rural et ses perspectives de développement en France », *Sciences Eaux & Territoires*, vol. Numéro 12, n° 3, p. 6-13, 2013, doi: 10.3917/set.012.0006.
- [41] P. M. Ngoma, S. Hiligsmann, E. S. Zola, M. Ongena, et P. Thonart, « Potentiel d'élimination des déchets végétaux (feuilles de *Mangifera Indica* et de *Manihot Utilissima*) par méthanisation à Kinshasa (République Démocratique du Congo) », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, n° Volume 15 Numéro 1, Art. n° Volume 15 Numéro 1, mai 2015, doi: 10.4000/vertigo.15944.
- [42] « La biométhanisation ». Disponible sur: <https://ww2.acpoitiers.fr/biochimie/spip.php?article447>
- [43] B. MEBARKI, « Etude technicoéconomique de la conversion électrique du biogaz en Algérie. Cas du CET de Batna », thèse de doctorat, Université Mostefa Benboulaïd, Batna, 2018.
- [44] T. T. M. Nguyen, L. Wissing, et M. S. Skjøth-Rasmussen, « High temperature methanisation: Catalyst considerations », *Catalysis Today*, vol. 215, p. 233-238, oct. 2013, doi: 10.1016/j.cattod.2013.03.035.

- [45] F. Béline, P. Peu, P. Dabert, A. Trémier, G. Le Guen, et A. Damiano, « La méthanisation en milieu rural et ses perspectives de développement en France », *Sciences Eaux & Territoires*, vol. Numéro 12, n° 3, p. 6-13, 2013, doi: 10.3917/set.012.0006.
- [46] S. Kalloum, M. Khelafi, et M. Djaafri, « Etude de l'influence du pH sur la production du biogaz à partir des déchets ménagers ».
- [47] S. Pommier, D. Chenu, M. Quintard, and X. Lefebvre, « A RTICLE A Logistic Model for the Prediction of the Influence of Water on the Solid Waste Methanization in Landfills », vol. 97, n° 3, p. 473-482, 2007.
- [48] A. Saidi et B. Abada, « La biométhanisation: une solution pour un développement durable », *Rev. Energ. Ren.: CER*, vol. 7, p. 31-35, 2007.
- [49] E. K. EKOUEJEN, F. D. ADAMON, et L. FAGBEMI, « Modélisation de l'influence du ratio carbone sur azote (C/N) de la matière organique sur la composition molaire du biogaz », *Rapport de stage, Master Recherche en Efficacité Énergétique et Énergie Renouvelable, École Doctorale des Sciences de l'ingénieur, Université d'Abomey-Calavi, Bénin*, vol.83,2017,Disponiblesur:
https://www.academia.edu/download/56988893/MEMOIRE_MASTER_RECHERCHE_KAROL_VERSION_IMPRIMABLE.pdf
- [50] M. Castiello, B. Gonzalez Vazquez, M. Peyre-Lavigne, C. Dumas, et E. Paul, « Production d'acides gras volatils (AGV) à partir de pelures de pommes de terre », Université de Toulouse ; INSA ; INRAE ; CNRS, avr. 2022. Consulté le: 2 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-04250367>
- [51] M. L.E, « La méthanisation des effluents et déchets organiques : état des connaissances sur le devenir pathogène », thèse de doctorat, université Paul- Sabatier de Toulouse, France, 2001.
- [52] « R. GOURDON - LAEPSI (INSA de Lyon). Aide à la définition des déchets dits biodégradables, fermentescibles, méthanisables, composables. Février 2002. - Recherche Google.
- [53] O. Cheknane, « biomasse ». cours, 2016.
- [54] F. Douard, « Liffre, première injection de biomethane dans le réseau de gaz de Bretagne », *MAGAZINE ET PORTAIL FRANCOPHONE DES BIOÉNERGIES*. Disponible sur: <https://www.bioenergie-promotion.fr/43303/a-liffre-premiere-injection-de-biomethane-dans-le-reseau-de-gaz-de-bretagne/>
- [55] J. Yan et C. A. Salman, « Chapter 2 - Waste-to-energy (WtE): Current technologies and their future potential », in *Waste Biorefineries*,, Éd., Elsevier, 2023, p. 25-61. doi: 10.1016/B978-0-323-91761-2.00005-2.

- [56] S. Meryem, « Les procédés de digestion anaérobie pour la production du Biogaz », CDER, 2013. Disponibles sur:
https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_028_02.pdf
- [57] « Méthanisation des boues de stations : Règle de l'art et état des lieux sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse ». Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, décembre 2012.
- [58] LAGRANGE, B. 'Biométhane, Principe – Techniques – Utilisation', Ed. Edi sud, 1979, 246
- [59] I. Tou, S. Igoud, et A. Touzi, « Production de Biométhane à partir des Déjections Animales », *Rev. Energ. Ren.: Production et Valorisation-Biomasse*, p. 103-108, 2001.
- [60] Bahlali Mohamed *et al.*, « MIG Biogaz », 2015.
- [61] J. B. Zhang, « Procédé de traitement anaérobie des boues et de valorisation du biogaz », *INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE*, 2011,. Disponible sur:
http://docnum.univ-lorraine.fr/public/INPL_2011_ZHANG_JIN_BAI.pdf
- [62] Nasko environnement « Valorisation des digestat issus de la méthanisation », 2009. Disponible sur: https://www.biogaz-energie-renouvelable.info/digestats_valorisation.html
- [63] L. Alibardi et R. Cossu, « Stabilization of digestates from wet and dry anaerobic digestion », in *Proceedings Venice: Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venice, Italy*, 2010, p. 8-11.

CHAPITRE 2 :

Etude expérimentale

Dans ce chapitre, nous nous plongerons dans une étude expérimentale, nous allons présenter l'ensemble des dispositifs expérimentaux, les capteurs de mesures, les méthodes d'analyse utilisées ainsi que l'origine des substrats utilisés.

1. Matériel d'étude :

1.1. Description du bio-digester : Les bio-digesteurs utilisés sont des dispositifs de 5 litre en plastique transparent. (la figure 2.1). La principale raison pour laquelle nous avons optés pour un digesteur en plastique transparent est la possibilité de surveiller directement l'intérieur du digesteur en temps réel. Cette transparence nous a permis d'observer facilement le processus de méthanisation et de détecter rapidement tout problème ou anomalie. En outre, les digesteurs en plastique transparent peuvent être fabriqués dans différentes formes et tailles, ce qui permet une plus grande flexibilité dans la conception des installations de méthanisation. Cela permet de s'adapter aux contraintes d'espace et aux besoins spécifiques de chaque projet.

1.2. Les étapes de réalisation : Dans la partie suivante nous allons démontrer toute les étapes de réalisation de digesteur de type de discontinu :

1- Les réacteurs utilisés sont des bouteilles en plastique de 5 litre avec un bouchon hermétique.



Figure 2.1 : Image des dispositifs

2- On a nettoyé soigneusement la bouteille en plastique et le bouchon pour éviter toute contamination.

3- Le réacteur est muni de deux trous, le premier pour le ph mètre et l'autre pour assurer l'échappement du gaz comme indique **la figure 2.2**.

4- On a inséré un tuyau dans le premier trou du bouchon pour permettre l'échappement des gaz vers la poche.

5- On a scellé hermétiquement la poche à l'extrémité du tuyau avec du Scotch pour prévenir les fuites de gaz (**figure 2.3**).

6- On a inséré dans le deuxième trou le Ph mètre (voir la figure 2.5).



Figure 2.2 : Image de préparation des trous



Figure 2.3 : Image de poche pour collecter le gaz



Figure 2.4 : Image de l'installation finale de digesteur



Figure 2.5 : PH-mètre 5 en 1

Pour la confection de ce dispositif, quelques matériels d'appui ont été nécessaires, dont entre autre :

- Des tuyaux flexibles.
- Des poches.
- De la colle thermo fusible.
- De la colle scotch.

- **Ph mètre 5 en 1** : Le pH-mètre 5 en 1 utilisé dans cette étude est un instrument de mesure multifonctionnel essentiel pour évaluer plusieurs paramètres clés . cet appareil combine cinq fonctions principales, à savoir la mesure du pH, de la conductivité électrique (CE), du Total des Solides Dissous (TDS), de la température et de la salinité.

- Et un bâton en bois a permis d'effectuer leur brassage.

L'origine et caractérisation du substrat utilisé : Le substrat utilisé dans cette étude pour l'alimentation de digesteur pour produire le biogaz est d'origine agricole, il est constitué des déchets animaux principalement les bouses des vaches.

Les déchets provenant des différentes fermes de wilaya de Tlemcen.

Matériels utilisée :

- Balance, éprouvette gradué, entonnoir, ph

La première expérience :

On a préparé 3.521 gramme de bouse de vache ($M_{\text{bouse}} = 3.521 \text{ g}$)



Figure 2.6 : Photo de substrat utilisée

On a ajouté 1600 ml d'eau et on a bien fermée le digesteur



Figure 2.7 : Le premier digesteur

La deuxième expérience : On a préparé 1990 gramme de bouse de vache et on a ajouté 1600 ml d'eau. La température de l'eau est 37.2 °C.



Figure 2.8 : Préparation de substrat

Les analyses physico-chimiques des bouses dans le premier jour :

Ph	T	TDS	EC	Salinité
7.63	22	2730	8220	0.27%

La troisième expérience : On a ajouté de l'eau à 500 g de bouse.



Figure 2.9 : Rajout de l'eau

La quatrième expérience : On a préparé 02 réacteurs le premier 2500 g de bouse en ajoutant 1500 ml d'eau et le deuxième 1500 g de bouse.



Figure 2.10 : Préparation de quatrième expérience .

Les analyses physico-chimiques des bouses dans le premier jour :

Ph	T	TDS	EC	Salinité
7.08	20.7	1430	2860	0.14%

1.3. Diffraction des rayons X (DRX) :

Cette technique analytique permet de mettre en évidence les différentes phases cristallines présentes dans un échantillon par comparaison aux fiches internationales de diffraction JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard). Un rayonnement X est produit par un bombardement électronique sur une cible au cuivre appelée anticathode. Le faisceau de rayons X, après avoir subi divers traitements, converge vers l'échantillon plat où il est diffracté par les plans cristallographiques formant un angle 2θ avec le faisceau incident. Un compteur enregistre un signal proportionnel à l'intensité du rayon diffracté. Le traitement du signal permet de connaître les paramètres de la maille cristalline et de caractériser les phases cristallines de l'échantillon. La DRX est basée sur la mesure des angles de diffraction des rayons X par les plans cristallins de l'échantillon à analyser. Les angles de diffraction sont reliés aux caractéristiques du réseau cristallin (d_{hkl} = distance interréticulaire de la famille de plan hkl) et du rayonnement incident (longueur d'onde λ) par la loi de Bragg [1] :

$$2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda \quad (1)$$

d_{hkl} (Å) : la distance interréticulaire d'un faisceau,

θ (°) : l'angle formé par les faisceaux incidents et diffractés (angle de Bragg),

λ (Å) : la longueur d'onde du faisceau incident, n : ordre de diffraction de Bragg.

Les analyses DRX ont été réalisées au niveau de l'unité de recherche URMER de l'université de Tlemcen. L'appareil utilisé est un diffractomètre RIGAKU (voir la figure 2.11), équipé d'une anode en cuivre Cu ($\lambda K\alpha_1 = 1,54060$ Å) et d'un monochromateur arrière en graphite et piloté par un micro-ordinateur. Les conditions générales d'acquisition correspondent à un intervalle angulaire 2θ allant de 10 à 80° avec un pas d'analyse de 0,3° pour une durée d'acquisition de 1s par pas.



Figure 2.11-a : Photo originale de DRX

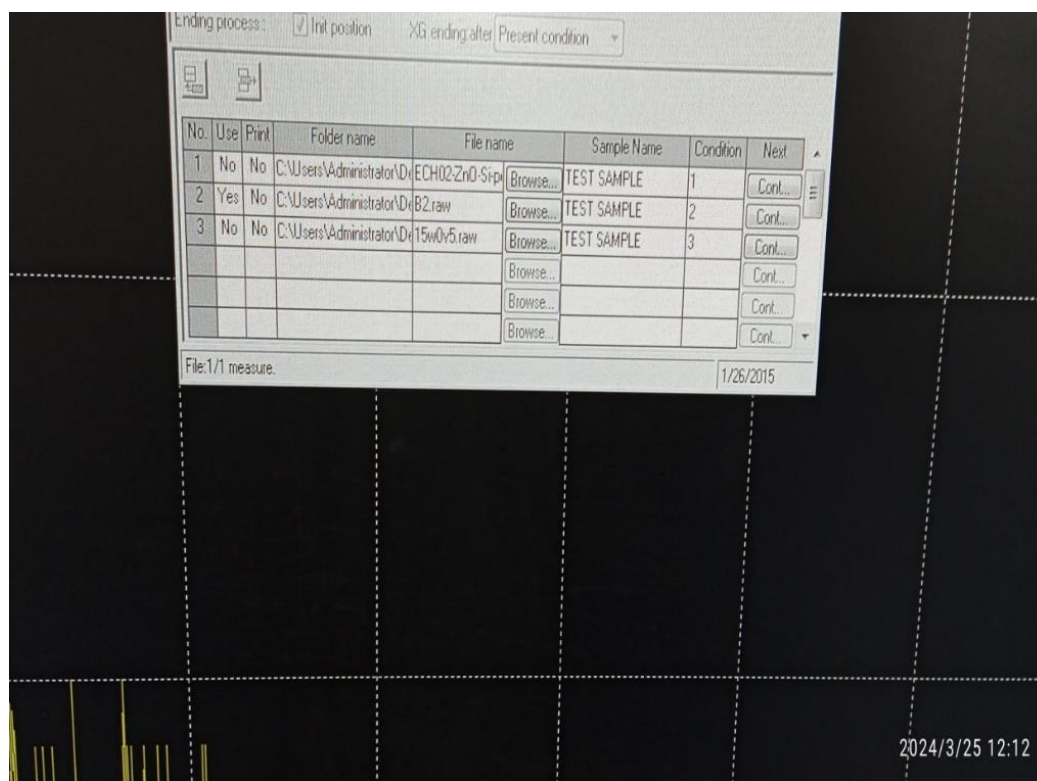


Photo 2.11-b : Exécution de l'échantillon

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté les matériaux étudiés où on a étalé toutes ses caractéristiques théoriques et mesurées expérimentalement. Ensuite, les techniques expérimentales et de

caractérisation ont été développées. Dans le chapitre 3, nous traitons les résultats qui seront présentés et discutés.

Références :

[1] J. P. Eberhart, “Analyse structural et chimique des Matériaux”, Ed. Dunod, 1989.

CHAPITRE 3 :

Résultats et interprétations

Ce chapitre représente la discussion des résultats obtenus lors de la réalisation du présent mémoire qui concernent toutes les étapes suivies. Le travail commence par la préparation des échantillons des substrats utilisés. La deuxième étape concerne un suivi des paramètres de contrôle de processus de digestion anaérobie. Nous allons présenter les résultats relatifs à la production du Biogaz ainsi que l'effet des différents paramètres liés à la méthanisation de déchets solides.

I. Production du Biogaz :

Dans cette partie de notre travail nous discuterons l'influence des principaux paramètres qui affectent la biométhanisation à savoir :

I.1. Influence de la température pendant la production du biogaz :

La température est un paramètre très important dans la production du biogaz et le bon déroulement de la digestion anaérobie. Durant notre expérience, nous avons suivi l'évolution de la température à l'intérieur du digesteur et les résultats obtenus sont schématisés dans la figure 3.1.

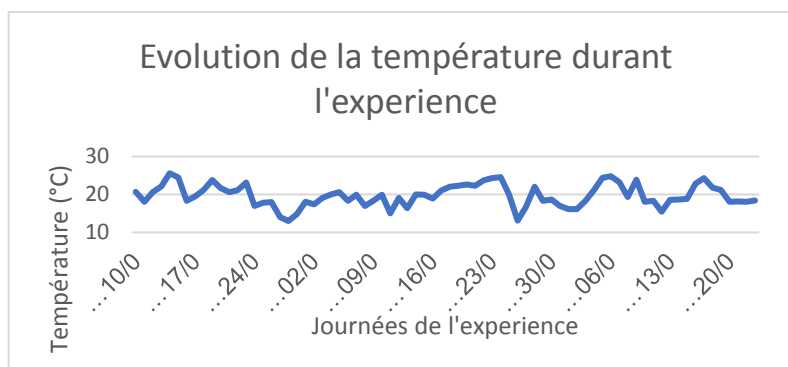


Figure 3.1 : Température à l'intérieur du digesteur durant l'expérience

La variation de la température durant l'expérience est expliquée par l'évolution des activités des bactéries au sein de la source de biomasse utilisée qui est de la bouse de vache et qui provoque la production maximale de biogaz.

I.2. Influence du PH pendant la production du biogaz :

Le PH est un paramètre très important sur la méthanisation influençant ainsi la quantité et la qualité du biogaz produit à l'intérieur du digesteur. La variation du PH pendant la fermentation durant notre expérience est représentée dans la figure 3.2.

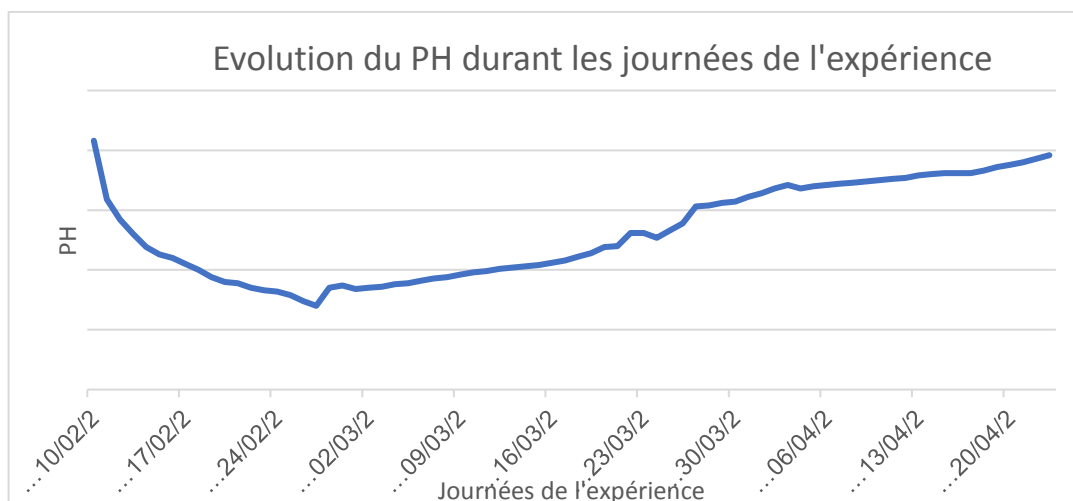


Figure 3.2 : Variation du PH durant l'expérience

Suivant l'évolution de la figure 3.2, on peut distinguer trois zones de variation du PH durant les journées de l'expérience qui sont :

- **Zone 1 :** Dans cette zone, on constate une chute de la valeur du PH pendant les 18 premiers jours de 7,08 à 5,7. Cette chute est expliquée par l'acidification du milieu et correspond à la décomposition de la matière organique et la production des acides gras volatils (AGV) avec une accumulation dans le milieu (phase d'hydrolyse et acidogènes).
- **Zone 2 :** Dans cette zone, on remarque une légère augmentation de la valeur du PH entre le 19^{ième} jour et le 37^{ième} jour correspondant à la variation du PH entre 5,85 et 6,08. Dans cette zone le climat est propice pour le développement des bactéries avec une meilleure activité.
- **Zone 3 :** Dans cette zone et à partir du 38^{ième} jour jusqu'à la fin de l'expérience, on remarque une accélération de l'augmentation puis une stabilisation de la valeur du PH. Ceci est due à un processus généralisé interagissant simultanément une production des AVG d'une part et leurs consommations d'autre part.

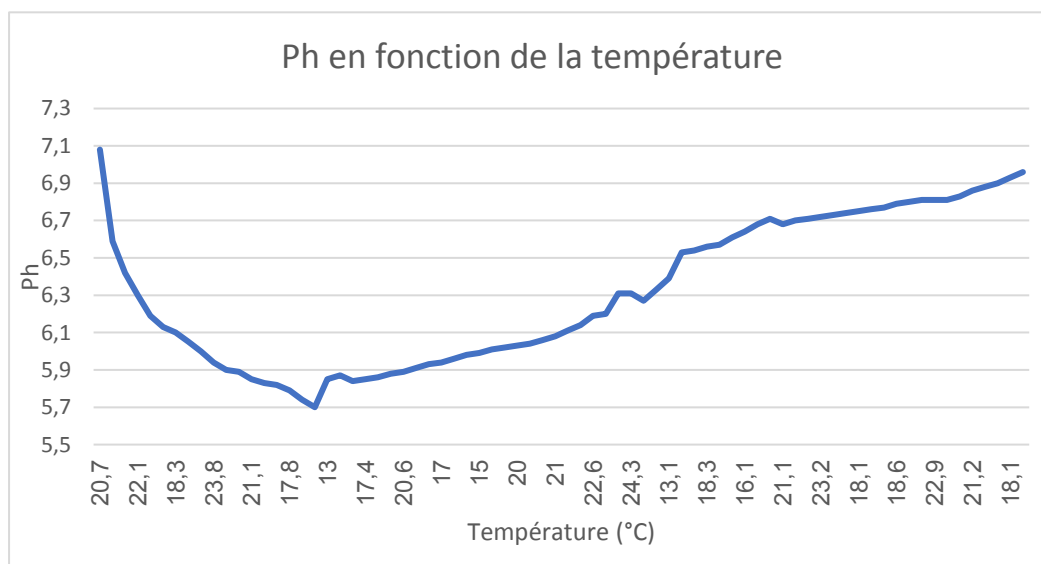


Figure 3.3 : Variation du PH en fonction de la température

La figure 3.3 montre l'influence de la température sur le PH. Comme la production du biogaz dépend directement de la température, on constate une phase mésophile maintenue entre 13 °C et 21 °C caractéristique d'une activité optimale des bactéries méthanogènes transformant les acétates en méthane. Des températures plus élevées atteignant 24 °C augmentent les vitesses des réactions et favorisent la production de CO₂ et de l'H₂O au lieu du méthane. Les variations observées ne suivent pas une allure standard et sont aléatoires en fonction du degré d'avancement des réactions chimiques entraînant la formation de plusieurs composés propres à la méthanogenèse. De plus, les variations de température indiquées sur la figure 3.3 influent indirectement le PH du substrat utilisé dans le processus de fermentation puisqu'une augmentation de la température va accélérer la décomposition des matières organiques, ce qui entraîne une augmentation de l'acidité du substrat. Cela influence à son tour sur le PH du milieu dans lequel les bactéries méthanogènes évoluent, bien que la corrélation directe entre la température et le pH du biogaz lui-même soit moins directe.

I.3. Influence de la salinité pendant la production du biogaz :

La salinité a un impact significatif sur la production de biogaz dans les installations de digestion anaérobie. Suivant l'allure des figures 3.4, 3.5 et 3.6, voici quelques-uns des effets de la salinité sur le processus de production de biogaz :

1. Inhibition des microorganismes : Les niveaux élevés de salinité inhibent l'activité des microorganismes responsables de la digestion anaérobie, ce qui réduit la dégradation des matières organiques et, par conséquent, la production de biogaz.
2. Déséquilibre de la flore microbienne : Les niveaux élevés de sel perturbent l'équilibre de la flore microbienne dans le digesteur anaérobie. Certains microorganismes peuvent être plus sensibles à la salinité que d'autres, ce qui entraîne une diminution de la diversité microbienne et une baisse de l'efficacité de la digestion anaérobie.
3. Accumulation de substances inhibitrices : Certains composés chimiques présents dans les eaux salines, tels que les chlorures et les sulfates s'accumulent dans le digesteur anaérobie donnant un effet inhibiteur sur les microorganismes.
4. Réduction de la production de méthane : La salinité entraîne une diminution de la production de méthane, le principal composant du biogaz, car les conditions de digestion anaérobie optimales sont perturbées.

Pour atténuer les effets négatifs de la salinité sur la production de biogaz, différentes stratégies peuvent être mises en œuvre, telles que la dilution des effluents salins, l'ajustement du pH, l'optimisation de la température et l'ajout de co-substrats adaptés.

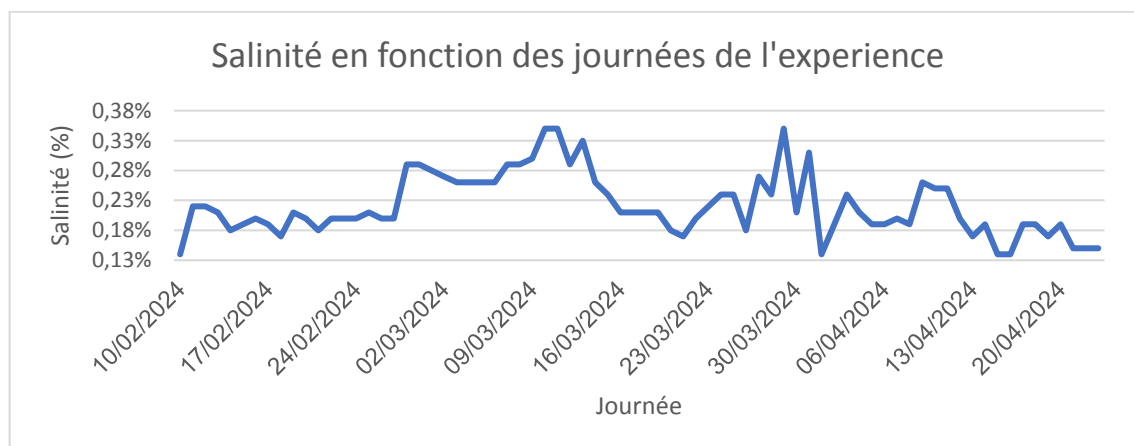


Figure 3.4 : Variation de la salinité du produit final durant l'expérience

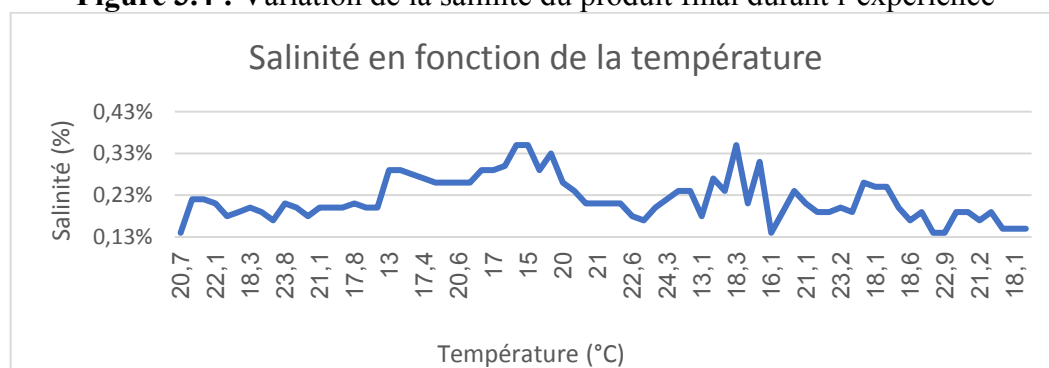


Figure 3.5 : Variation de la salinité du produit final en fonction de la température

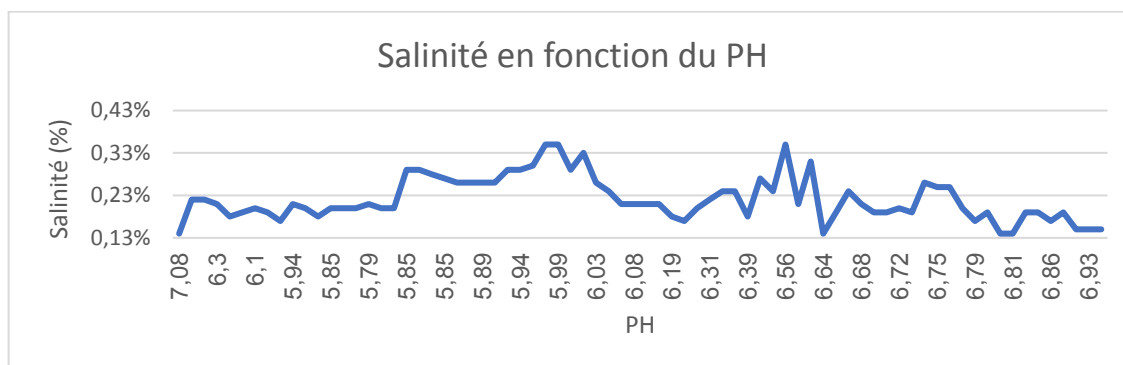


Figure 3.6 : Variation de la salinité du produit final en fonction du PH

On constate une augmentation de la salinité dans les premiers jours de 0,14% à 0,22% dans le premier digesteur et de 0,31% à 0,41% pour l'autre digesteur en raison de la décomposition de la matière organique riche en sels minéraux présents dans les bouses de vache. La dégradation des composés organiques libère des ions et des sels minéraux, ce qui peut entraîner une augmentation de la salinité. Cependant, avec la progression de la méthanisation, une grande partie de ces sels minéraux est utilisée par les bactéries méthanogènes pour produire du méthane. Par conséquent, la salinité diminue au fil du temps à mesure que les sels minéraux sont consommés, et après le 73^{ième} jour une stabilité de la salinité est observée parce que les microorganismes impliqués dans la méthanisation ont utilisé la plupart des nutriments disponibles dans les substrats et se sont multipliés de manière optimale pour s'adapter à l'environnement.

De plus, on constate que les courbes de la salinité en fonction des jours, du PH et de la température sont similaires, cela indique une relation directe entre ces paramètres. Les variations du PH et de la température peuvent influencer sur la vitesse et l'efficacité des étapes de méthanisation, ce qui se traduit par des profils de salinité similaires au fil du temps.

I.4. Influence de la conductivité pendant la production du biogaz :

La conductivité électrique joue un rôle important dans la production et la gestion du biogaz, qui est principalement composé de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2), avec de petites quantités d'autres gaz tels que l'hydrogène sulfureux (H_2S) et l'ammoniac (NH_3). Sur les figures 3.7, 3.8 et 3.9, on remarque quelques façons dont la conductivité influence le biogaz :

1. Processus de fermentation anaérobie : La conductivité électrique affecte la vitesse et l'efficacité de la fermentation anaérobie, qui est le processus par lequel les micro-organismes décomposent la matière organique en biogaz. Ceci est significatif dans la figure 3.7 où une conductivité électrique optimale de l'ordre de $6900 \mu\text{S}/\text{cm}$ peut favoriser la croissance et l'activité des bactéries productrices de méthane, ce qui accélère la production de biogaz.

2. Qualité du biogaz : La conductivité électrique optimale contribue à maintenir une qualité de biogaz optimale en limitant la croissance de micro-organismes indésirables dans le digesteur anaérobie. Des niveaux élevés de certains ions dans le substrat inhibent la croissance des bactéries méthanogènes et affecter la composition du biogaz produit.

3. Contrôle du pH : La conductivité électrique est souvent liée à la concentration d'ions dans la solution, y compris les ions responsables du maintien du pH dans le digesteur anaérobie. Un pH optimal est essentiel pour la croissance des bactéries méthanogènes. Dans la figure 3.9, on constate que la conductivité est influencée par la capacité à contrôler et maintenir le pH dans la plage idéale pour la fermentation anaérobie.

4. Gestion des sous-produits : Certains sous-produits de la fermentation anaérobie, tels que les sulfures et les ammoniacs, ont un impact sur la conductivité électrique du biogaz. Des niveaux élevés de ces composés peuvent influencer la conductivité électrique globale du biogaz produit. Ceci est perçu dans les trois figures par des variations aléatoires de la température suite à des mesures faites dans des journées où le climat diffère avec inhomogénéité.

Pour remédier à ces influences de la conductivité électrique sur la production, la qualité et la gestion du biogaz en affectant directement les processus de fermentation anaérobie, on est amené à contrôler le pH et la gestion des sous-produits. Et par conséquent, une surveillance et une gestion appropriées de la conductivité électrique peuvent contribuer à optimiser le rendement et la qualité du biogaz produit dans les installations de digestion anaérobie.

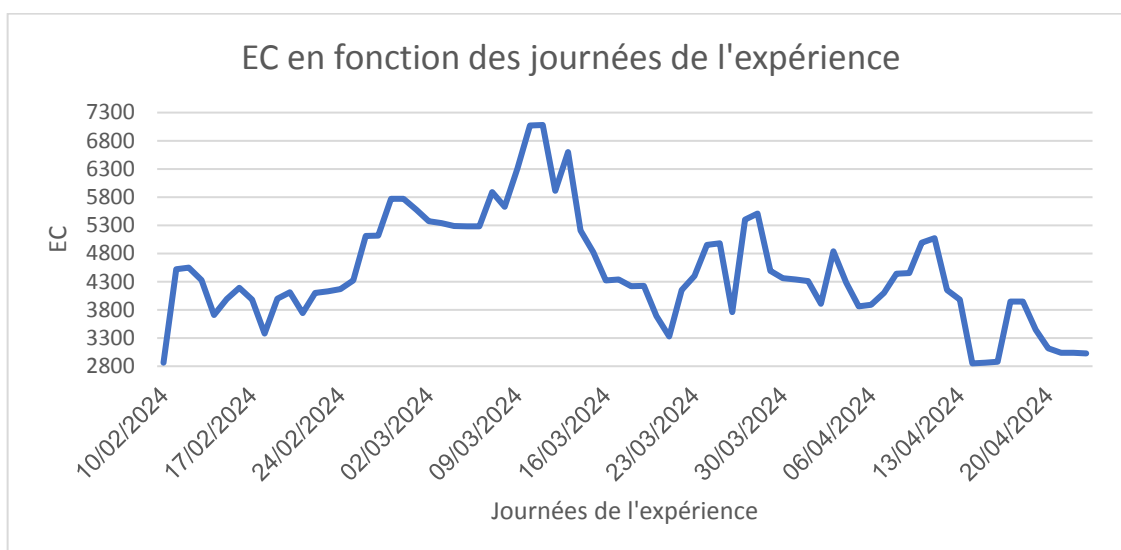


Figure 3.7 : Variation de la conductivité électrique du produit final durant l'expérience

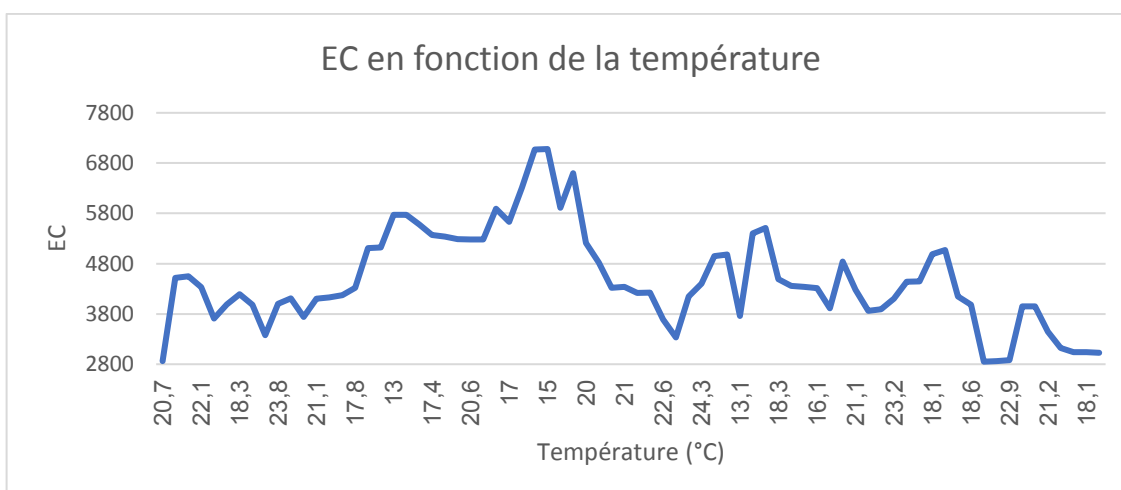


Figure 3.8 : Variation de la conductivité électrique du produit final en fonction de la température

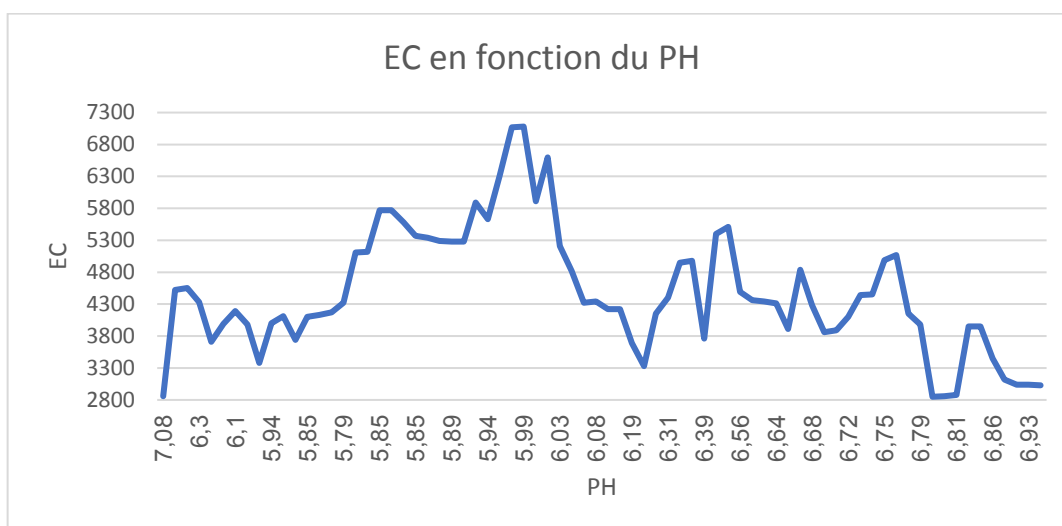


Figure 3.9 : Variation de la conductivité électrique du produit final en fonction du PH

On remarque que les courbes de conductivité électrique en fonction des jours, PH et température sont similaires. L'analyse des courbes de conductivité électrique en fonction des variations de PH et de la température dans notre étude sur la fermentation méthanique des bouses de vache révèle des aspects cruciaux du processus fermentatif et de son environnement. Initialement, nous observons une augmentation significative de la conductivité électrique de 2860 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 7080 $\mu\text{S}/\text{m}$ avec un PH bas, indiquant une intensification de l'activité microbienne lors des premiers stades de la fermentation. Cette augmentation suggère la libération de métabolites et d'ions dans le milieu, renforçant ainsi sa conductivité électrique. Cependant, cette tendance est suivie d'une diminution progressive de la conductivité électrique avec un PH élevé, probablement due à la consommation des substrats fermentescibles par les microorganismes. Parallèlement, l'observation d'une corrélation entre la conductivité électrique et le PH met en lumière l'impact direct de ce dernier sur la conductivité électrique. Les variations de PH influencent la concentration d'ions dans le milieu, ce qui affecte la conductivité électrique. De même, la corrélation entre la conductivité électrique et la température souligne l'importance de cette dernière dans la régulation de l'activité métabolique des microorganismes. Une augmentation de la température peut stimuler les réactions biochimiques, entraînant ainsi une augmentation de la production de métabolites conducteurs et, par conséquent, de la conductivité électrique. En synthèse, ces courbes révèlent les interactions complexes entre l'activité microbienne, les conditions environnementales et les propriétés électrochimiques du milieu de fermentation.

I.5. Inflammabilité du gaz :

La méthanisation vise principalement la production de biogaz, mais la qualité de ce dernier revêt également une grande importance pour son utilisation optimale. Dans notre recherche, nous évaluons la qualité du biogaz produit de manière traditionnelle, en effectuant des tests d'inflammabilité. Selon les références consultées, la capacité d'un biogaz à s'enflammer indique que sa teneur en méthane (CH_4) dépasse les 64 %.

Lors du test qu'on a effectué, on a observé une flamme bleue (voir les figures 3.10 et 3.11), lorsque j'ai répété le test, j'ai observé une flamme bleue et orange :

- La flamme bleue indique que le biogaz contient du méthane, qui est un gaz hautement inflammable.
- La présence de la couleur orange dans la flamme peut indiquer la présence d'autres composés tels que le dioxyde de carbone, l'hydrogène sulfureux (H_2S) et d'autres hydrocarbures légers qui peuvent influencer sur la couleur de la flamme.



Figure 3.10 : Test d'inflammabilité dans le premier digesteur



Figure 3.11 : Test d'inflammabilité dans le deuxième digesteur

II. Analyse DRX : La bouse de vache est le résultat de la non digestion de certains composés fourragés. La vache en tant qu'herbivore ingère une certaine quantité de végétaux qui subissent, au niveau de sa panse une action microbienne intense et au niveau de sa caillette une action chimique importante. Certaines substances, résistent à ces attaques microbiennes, enzymatiques et chimiques tout au long de leur passage dans le tube digestif et sont libérées dans le milieu extérieur au moment de la défécation sous une forme hydratée nommée communément chez les ruminants bovidés « bouse de vache ». Donc, cette dernière représente la restitution au pâturage d'une partie du fourrage ingéré. Et par la composition physico-chimique de ces restitutions, la bouse de vache représente une non négligeable ressource organique et minérale pour le sol.

Suite à l'analyse par diffraction des rayons X, on a effectué deux mesures : La première sur un échantillon de bouse frais et une deuxième sur un échantillon de bouse sèche durant 15 jours. On a obtenu deux courbes tracées avec le langage python grâce aux données obtenues par la DRX. On obtient les illustrations suivantes :

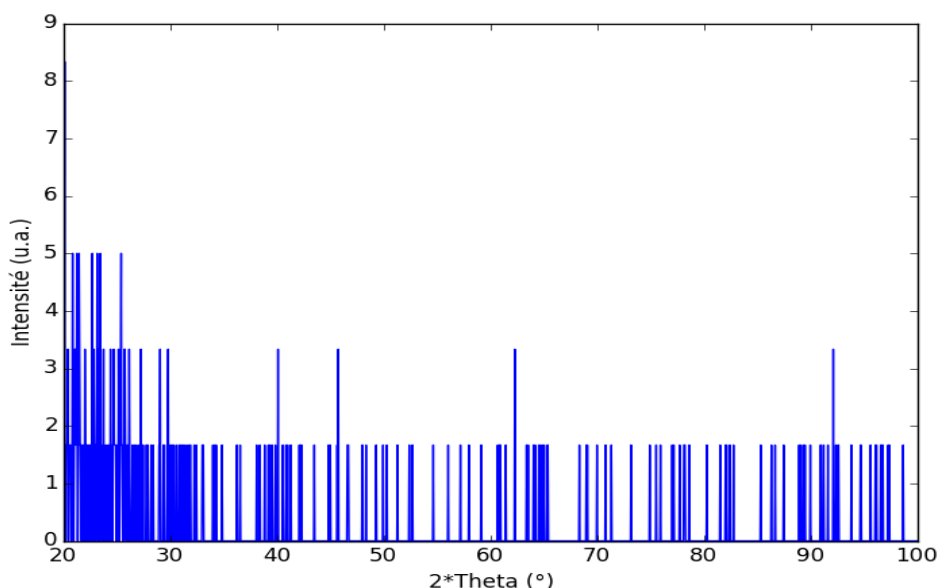


Figure 3.12 : Spectre d'un échantillon neuf de la bouse de vache issu de la DRX

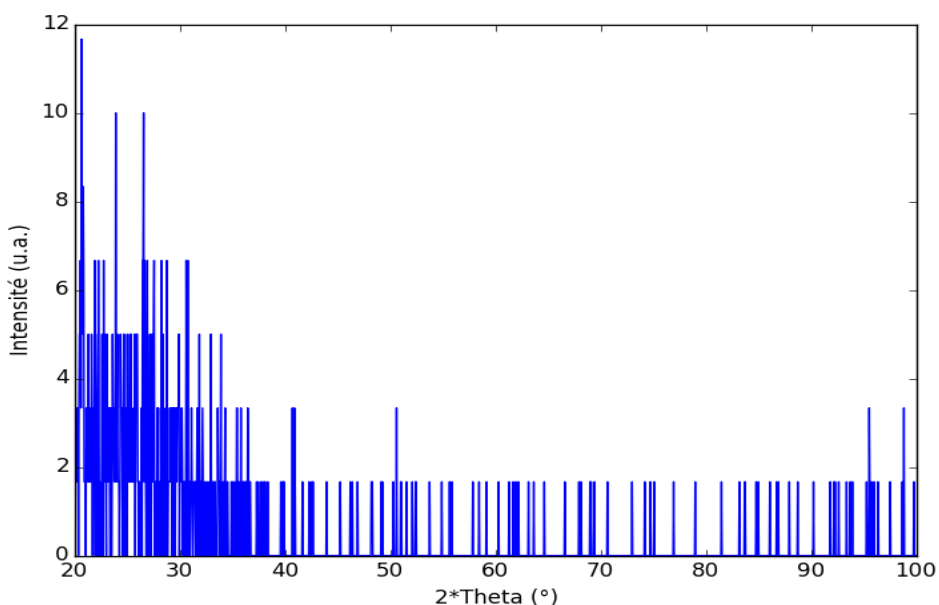


Figure 3.13 : Spectre d'un échantillon ancien de 15 jours de la bouse de vache issu de la DRX

A partir de ses figures et en se focalisant sur les figures 2.6 et 2.7 du chapitre 2, on peut déduire que la bouse de vache est constituée :

- De la fraction non digérée de la ration : essentiellement composée de fragments de tissus lignifiés, de sclérenchymes et de tissus vasculaires avec en outre des éléments minéraux ayant échappé à la dégradation microbienne dans le réticulo-rumen, à la dégradation dans la caillette et l'intestin grêle et, à la fermentation microbienne dans le gros intestin. Ceci est illustré par les pics situés entre les angles 20° et 30° dans les figures ci-dessus.
- De produits endogènes (sucs digestifs, débris cellulaires...) ou microbiens non digérés se situant entre les angles 35° et 55° et relatés par des pic moins importants que précédemment.

On a constaté que le premier digesteur qui contient des bouses fraîches a commencé à accumuler une quantité notable de biogaz en seulement cinq jours, tandis que le second digesteur qui contient des bouses un peu anciennes a pris le double de ce temps, soit dix jours, pour atteindre un volume similaire de gaz. Cette différence notable dans la vitesse de production du biogaz pourrait être attribuée à la quantité d'azote présente dans l'échantillon de bouse utilisée. L'azote est un élément essentiel à la croissance des micro-organismes méthanogènes responsables de la production de biogaz par fermentation. Une quantité suffisante d'azote favorise leur activité métabolique, ce qui conduit à une production accrue de biogaz.



Figure 3.14 : Photo de sachet de biogaz

Les différents éléments excrétés à travers les fèces sont principalement les phosphates, le calcium et le magnésium sans oublier l'azote alors que les excréta liquides en revanche drainent, potasse, sodium ainsi qu'une forte proportion de l'azote restitué (voir les tableaux 3.1 et 3.2).

Tableau 3.1 : Répartition des éléments restitués à partir de l'échantillon neuf de la bouse de vache

Eléments	N	P	K	Ca	Mg	Na
%	35	51	17	35	35	10

Tableau 3.2 : Répartition des éléments restitués à partir de l'échantillon séché de la bouse de vache

Eléments	N	P	K	Ca	Mg	Na
%	24	78	12	94,5	80	52

D'après les résultats de l'analyse chimique, les deux échantillons de bouse présentent des différences significatives dans les teneurs en éléments nutritifs, notamment en azote (N), phosphore (P), potassium (K), calcium (Ca), magnésium (Mg) et sodium (Na).

- Azote (N) : Le premier digesteur présente une teneur en azote (35 %) nettement plus élevée que le second digesteur (24 %). L'azote est un élément crucial pour la croissance et l'activité des bactéries méthanogènes, responsables de la production de biogaz. Une teneur en azote plus élevée dans le premier digesteur pourrait expliquer sa production de biogaz plus rapide observée précédemment.
- Phosphore (P) : Le second digesteur présente une teneur en phosphore (78 %) considérablement plus élevée que le premier digesteur (51 %). Le phosphore est également un élément important pour les bactéries méthanogènes, mais un excès de phosphore peut avoir un effet inhibiteur sur leur

activité. La teneur élevée en phosphore dans le second digesteur pourrait contribuer à sa production de biogaz plus lente.

- Potassium (K) : Le premier digesteur présente une teneur en potassium (17 %) légèrement plus élevée que le second digesteur (12 %). Le potassium joue un rôle important dans la régulation de l'activité enzymatique et la balance osmotique des bactéries méthanogènes. Cependant, les différences observées dans les teneurs en potassium entre les deux échantillons ne sont probablement pas suffisantes pour expliquer à elles seules la différence de production de biogaz.
- Calcium (Ca) : Le second digesteur présente une teneur en calcium (94,5 %) beaucoup plus élevée que le premier digesteur (35 %). Des concentrations élevées de calcium peuvent précipiter le phosphore et le rendre indisponible pour les bactéries méthanogènes. La teneur élevée en calcium dans le second digesteur pourrait contribuer à son effet inhibiteur potentiel sur la production de biogaz.
- Magnésium (Mg) : Le second digesteur présente une teneur en magnésium (80 %) plus élevée que le premier digesteur (35 %). Le magnésium est un cofacteur important pour de nombreuses enzymes impliquées dans la méthanogenèse. Cependant, les différences observées dans les teneurs en magnésium entre les deux échantillons ne sont probablement pas suffisantes pour expliquer à elles seules la différence de production de biogaz.
- Sodium (Na) : Le second digesteur présente une teneur en sodium (52 %) nettement plus élevée que le premier digesteur (10 %). Des concentrations élevées de sodium peuvent avoir un effet toxique sur les bactéries méthanogènes. La teneur élevée en sodium dans le second digesteur pourrait contribuer à son effet inhibiteur potentiel sur la production de biogaz.

Ces résultats soulignent l'importance de la composition des nutriments dans la bouse de vache pour la production de biogaz par fermentation méthanique. Ils mettent en évidence comment des variations dans la composition chimique peuvent influencer la performance des digesteurs et la production de biogaz.

III. Caractérisation de digestat :

Le résultat de la fermentation méthanique ne se limite pas qu'au biogaz. En effet, lors du processus de fermentation méthanique, outre la production de biogaz, on obtient également un sous-produit appelé digestat. Il est riche en nutriments et peut être utilisé comme engrais ou amendement pour les sols agricoles.

Au cours de la digestion anaérobie, nous avons pu observer que le substrat contenu dans le digesteur subissait un changement de couleur en noir et présence d'un moule blanc (champignon blanc), comme le montre clairement la figure 3.15. La présence de ce moule blanc est un signe positif qui indique que la fermentation de la bouse de vache s'est déroulée correctement. En effet, ce type de moule est généralement associé aux bactéries méthanogènes, qui sont responsables de la production de méthane, le principal composant du biogaz. En parallèle, une odeur désagréable a été

perçue, cette dernière peut être expliquée par la formation de sulfure d'hydrogène H_2S lors de la fermentation anaérobie.



Figure3.15 : Echantillon après la fermentation.

Caractéristique physico-chimique du digestat après 84 jours :

Ph	Température	TDS	salinité	CE
7.09	22.3	2020	0.20 %	4020

Conclusion :

La fermentation méthanique des bouses de vache est un processus complexe qui est influencé à la fois par des paramètres directs tels que le PH et la température, ainsi que par des paramètres indirects tels que la conductivité électrique (CE) et la salinité. Dans ce chapitre, nous avons analysé l'impact de ces différents paramètres sur la production de biogaz et de digestat.

Nos résultats ont démontré que le PH joue un rôle essentiel dans le processus de fermentation méthanique. Un PH optimal permet d'obtenir des performances optimales en termes de production de biogaz. De même, la température est un facteur clé qui influence sur la vitesse et l'efficacité de la digestion anaérobie. Des températures appropriées favorisent une activité microbienne optimale et une production de biogaz accrue. De plus, nous avons identifié que des paramètres indirects comme la CE et la salinité peuvent également avoir un impact significatif sur la fermentation méthanique. Des niveaux élevés de CE et de salinité peuvent inhiber l'activité microbienne et réduire les performances du processus.

En conclusion, il est crucial de contrôler et d'optimiser les paramètres tels que le PH, la température, la CE et la salinité pour maximiser la production de biogaz et de digestat à partir des bouses de vache. Ces facteurs influencent directement l'activité microbienne et la stabilité du processus de fermentation méthanique. En comprenant leur influence, nous pouvons améliorer l'efficacité et la rentabilité de la production de biogaz en utilisant les déchets organiques de manière durable et écologique.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La production de biogaz à partir des déchets agricoles est devenue une solution prometteuse et durable pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre et faire face à la problématique de la pollution. Dans cette perspective, cette étude s'est concentrée sur la fermentation méthanique des bouses de vache provenant des fermes de la wilaya de Tlemcen. Au cours de ce processus, une surveillance attentive des paramètres environnementaux tels que le PH, la température, la conductivité électrique (CE) et la salinité a été entreprise pour comprendre leur influence sur la digestion anaérobie.

Il a été clairement démontré que le maintien d'un PH optimal est essentiel pour favoriser l'activité des microorganismes méthanogènes et ainsi maximiser la production de biogaz. De plus, la régulation de la température joue un rôle déterminant dans la vitesse de digestion anaérobie et la dégradation des matières organiques, outre le PH et la température, nous avons également étudié l'impact de la CE et de la salinité sur la fermentation méthanique et aussi l'importance de privilégier l'utilisation d'échantillons de bouses de vache fraîches en raison de leur teneur élevée en azote et qui les rend particulièrement propices à une digestion anaérobie efficace. L'azote contenu dans ces échantillons est un élément crucial pour favoriser la croissance des microorganismes responsables de la production de biogaz. En choisissant des échantillons neufs, il est possible de maximiser les rendements en biogaz et d'optimiser l'efficacité du processus de conversion des déchets agricoles en énergie renouvelable.

Par conséquent, cette approche permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre tout en valorisant efficacement les ressources organiques disponibles dans les exploitations agricoles. Elle représente une opportunité prometteuse en Algérie, et plus précisément dans la Wilaya de Tlemcen, pour diversifier le mix énergétique, offrir une solution locale et décentralisée pour répondre aux besoins énergétiques, et stimuler le développement économique régional. De plus, elle contribue à la préservation de l'environnement ainsi qu'à la création d'emplois locaux.

En plus de ces avantages, il convient également de souligner les perspectives prometteuses offertes par la gestion des eaux usées dans le contexte de la production de biogaz dans le site de Tlemcen.

Il pourrait être intéressant d'installer des digesteurs de plus grande dimension, d'entreprendre des mesures poussées de caractérisation et d'utiliser un gazomètre pour le stockage du biogaz produit. Aussi la détermination du taux d'azote pour les déchets ménagers afin de connaître le rapport du carbone et de l'azote.

Pour augmenter l'isolation thermique, on pourra proposer un système de digesteur enfouis dans le sol à une distance de 4 à 5 m puisqu'à cette distance la température est optimale de l'ordre de 20 °C dans le sol d'après les données géothermiques du site de Tlemcen permettant de diminuer le gradient de température entre le milieu extérieur et la température de digesteur.

L'apport thermique pourra être fourni par l'énergie géothermique comme les puits géothermiques.

En envisageant ces perspectives, il devient clair que la production de biogaz à partir des déchets agricoles et des eaux usées peut non seulement contribuer à la transition énergétique, mais aussi à une gestion plus efficace et durable des ressources en Algérie, en particulier dans la Wilaya de Tlemcen. Il est donc essentiel d'explorer davantage ces domaines de recherche et de développement et de promouvoir des politiques et des investissements appropriés pour réaliser pleinement leur potentiel.

Annexe A : Tableau des mesures :

Jour	PH	T	Salinité	TDS(Pmm)	EC
10/02/2024	7,08	20,7	0,14%	1430	2860
11/02/2024	6,59	18,1	0,22%	2260	4520
12/02/2024	6,42	20,6	0,22%	2280	4550
13/02/2024	6,3	22,1	0,21%	2160	4330
14/02/2024	6,19	25,6	0,18%	1860	3710
15/02/2024	6,13	24,5	0,19%	2000	3990
16/02/2024	6,1	18,3	0,20%	2100	4190
17/02/2024	6,05	19,5	0,19%	1900	3980
18/02/2024	6	21,2	0,17%	1690	3380
19/02/2024	5,94	23,8	0,21%	2010	4000
20/02/2024	5,9	21,7	0,20%	2060	4110
21/02/2024	5,89	20,6	0,18%	1870	3740
22/02/2024	5,85	21,1	0,20%	2050	4100
23/02/2024	5,83	23,1	0,20%	2070	4130
24/02/2024	5,82	17	0,20%	2120	4170
25/02/2024	5,79	17,8	0,21%	2160	4320
26/02/2024	5,74	18	0,20%	2170	5110
27/02/2024	5,7	14	0,20%	2190	5120
28/02/2024	5,85	13	0,29%	2490	5770
29/02/2024	5,87	14,9	0,29%	2890	5770
01/03/2024	5,84	18,1	0,28%	2790	5580
02/03/2024	5,85	17,4	0,27%	2690	5370
03/03/2024	5,86	19,1	0,26%	2680	5340
04/03/2024	5,88	20	0,26%	2680	5290
05/03/2024	5,89	20,6	0,26%	2650	5280
06/03/2024	5,91	18,3	0,26%	2640	5280
07/03/2024	5,93	19,9	0,29%	2950	5890
08/03/2024	5,94	17	0,29%	2990	5630
09/03/2024	5,96	18,3	0,30%	3100	6310
10/03/2024	5,98	19,9	0,35%	3220	7070
11/03/2024	5,99	15	0,35%	3490	7080
12/03/2024	6,01	19,1	0,29%	2980	5910

13/03/2024	6,02	16,4	0,33%	3320	6600
14/03/2024	6,03	20	0,26%	2600	5210
15/03/2024	6,04	19,9	0,24%	2420	4820
16/03/2024	6,06	18,9	0,21%	2170	4320
17/03/2024	6,08	21	0,21%	2210	4340
18/03/2024	6,11	22	0,21%	2110	4220
19/03/2024	6,14	22,3	0,21%	2120	4223
20/03/2024	6,19	22,6	0,18%	1850	3690
21/03/2024	6,2	22,3	0,17%	1670	3330
22/03/2024	6,31	23,7	0,20%	2080	4150
23/03/2024	6,31	24,3	0,22%	2210	4400
24/03/2024	6,27	24,6	0,24%	2480	4950
25/03/2024	6,33	20	0,24%	2480	4980
26/03/2024	6,39	13,1	0,18%	1880	3760
27/03/2024	6,53	16,7	0,27%	2700	5400
28/03/2024	6,54	22	0,24%	2420	5510
29/03/2024	6,56	18,3	0,35%	2100	4490
30/03/2024	6,57	18,7	0,21%	2180	4360
31/03/2024	6,61	17	0,31%	1920	4340
01/04/2024	6,64	16,1	0,14%	1940	4310
02/04/2024	6,68	16,1	0,19%	1950	3910
03/04/2024	6,71	18,3	0,24%	2420	4840
04/04/2024	6,68	21,1	0,21%	2140	4280
05/04/2024	6,7	24,4	0,19%	1930	3860
06/04/2024	6,71	24,8	0,19%	1940	3890
07/04/2024	6,72	23,2	0,20%	2560	4100
08/04/2024	6,73	19,3	0,19%	2570	4440
09/04/2024	6,74	23,9	0,26%	2570	4450
10/04/2024	6,75	18,1	0,25%	2560	4990
11/04/2024	6,76	18,3	0,25%	2530	5070
12/04/2024	6,77	15,5	0,20%	2070	4150
13/04/2024	6,79	18,6	0,17%	1480	3980
14/04/2024	6,8	18,7	0,19%	2010	2850
15/04/2024	6,81	18,8	0,14%	1430	2860

16/04/2024	6,81	22,9	0,14%	1440	2880
17/04/2024	6,81	24,3	0,19%	1980	3950
18/04/2024	6,83	21,8	0,19%	1980	3950
19/04/2024	6,86	21,2	0,17%	1720	3450
20/04/2024	6,88	18,1	0,19%	1640	3120
21/04/2024	6,9	18,2	0,15%	1520	3040
22/04/2024	6,93	18,1	0,15%	1520	3040
23/04/2024	6,96	18,4	0,15%	1520	3030

Résumé :

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'élargissement du portefeuille des énergies renouvelables en mettant en avant l'utilisation optimale des déchets agricoles. L'objectif principal était de valoriser spécifiquement les bouses de vache provenant de fermes situées dans la wilaya de Tlemcen afin de les transformer en une biomasse prometteuse pour la production de biogaz. Pour ce faire, nous avons effectué une fermentation méthanique en utilisant des digesteurs d'une capacité de 5 litres pendant une durée de 74 jours. Les résultats obtenus ont permis d'évaluer l'impact des paramètres tels que le PH, la température, la conductivité électrique (CE) et la salinité sur la digestion anaérobie. Cette étude a contribué à enrichir les connaissances en mettant en avant l'influence de l'état neuf des échantillons sur la rapidité de méthanisation grâce à des analyses chimiques par la diffraction des rayons X où nous avons pu obtenir une source d'énergie traduite par une flamme en contact avec du feu. Nos résultats montrent clairement l'importance de contrôler des paramètres clés pour optimiser la production de biogaz. Cette recherche offre ainsi des informations précieuses pour exploiter les déchets agricoles locaux en tant que source d'énergie renouvelable dans la région de Tlemcen, tout en ouvrant la voie à de futures études sur ce sujet.

Abstract:

This thesis is part of the expansion of the renewable energy portfolio by highlighting the optimal use of agricultural waste. The main objective was to specifically valorize cow dung from farms located in the wilaya of Tlemcen in order to transform it into a promising biomass for the production of biogas. To do this, we carried out methane fermentation using digesters with a capacity of 5 liters for a period of 74 days. The results obtained made it possible to evaluate the impact of parameters such as PH, temperature, electrical conductivity (EC) and salinity on anaerobic digestion. This study contributed to enriching knowledge by highlighting the influence of the new state of the samples on the speed of methanization thanks to chemical analyzes by X-ray diffraction where we were able to obtain an energy source translated by a flame in contact with fire. Our results clearly show the importance of controlling key parameters to optimize biogas production. This research thus offers valuable information for exploiting local agricultural waste as a source of renewable energy in the Tlemcen region, while paving the way for future studies on this subject.

ملخص:

تأتي هذه الأطروحة ضمن توسيع محفظة الطاقة المتجددة من خلال تسليط الضوء على الاستخدام الأمثل للمخلفات الزراعية. وكان الهدف الرئيسي هو تثمين روث الأبقار على وجه التحديد من المزارع الواقعة في ولاية تلمسان من أجل تحويلها إلى كتلة حيوية واعدة لإنتاج الغاز الحيوي. وللقيام بذلك، قمنا بإجراء تخمير الميثان باستخدام أجهزة هاضمة بسعة 5 لترات لمدة 74 يومًا. أتاحَت النتائج التي تم الحصول عليها تقييم تأثير العوامل مثل الرقم الهيدروجيني ودرجة الحرارة والتوصيل الكهربائي (EC) والملوحة على الهضم اللاهوائي. وساهمت هذه الدراسة في إثراء المعرفة من خلال تسليط الضوء على تأثير الحالة الجديدة للعينات على سرعة الميثان بفضل التحاليل الكيميائية بحيود الأشعة السينية حيث تمكنا من الحصول على مصدر طاقة يترجمه لهب ملامس للنار. تظهر نتائجنا بوضوح أهمية التحكم في المعلومات الرئيسية لتحسين إنتاج الغاز الحيوي. وبذلك يقدم هذا البحث معلومات قيمة لاستغلال النفايات الزراعية المحلية كمصدر للطاقة المتجددة بمنطقة تلمسان، مع تمهيد الطريق لدراسات مستقبلية حول هذا الموضوع.