

وزارة البحث العلمي والتعليم العالي



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPEREUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES

N° d'ordre : L...../GP/2023



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : GENIE DES PROCEDES

Spécialité : GENIE CHIMIQUE

**Projet de réalisation d'une unité de méthanisation pour la
production de l'électricité dans une smart house**

Présenté par :

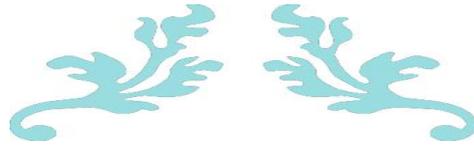
M^r. CHERGUI Amine Sofiane

M^{lle} BELAID Bouchra Fatima Zohra

Soutenu le 02/07/2023 devant le jury composé de :

Président :	B. BESTANI	Professeur	Université de Mostaganem
Examineur :	M. GHELAMALLAH	Professeur	Université de Mostaganem
Rapporteur :	M. R. GHEZZAR	Professeur	Université de Mostaganem
Co-rapporteur	B. BELMEKKI	Doctorant	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2022/2023



Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre sincère gratitude à Dieu pour nous avoir donné la force, la persévérance, ainsi à nos familles (spécialement nos mères) pour leurs encouragements constants nous ont permis de nous concentrer sur notre travail et de relever les défis avec confiance.

Nous tenons à exprimer notre plus sincère reconnaissance envers notre rapporteur, Pr. GHEZZAR Mouffok Redouane. Ses connaissances approfondies, ses conseils éclairés et sa disponibilité ont grandement contribué à la réussite de notre projet. Également, nous remercions Monsieur BELMEKKI Bilal, doctorant en génie chimique, pour son aide précieuse et ses idées novatrices qui ont été d'une grande importance pour nous aider à surmonter les obstacles et à avancer dans notre travail.

Nos remerciements vont aux toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet pour leur soutien indéfectible tout au long de notre parcours. Nous leur sommes reconnaissants pour les expériences vécues et les souvenirs précieux que nous garderons de cette expérience enrichissante.



Résumé

L'objet de cette étude est de réaliser un état de l'art sur les techniques de production d'électricité à partir de gaz de biomasse (biogaz et gaz de synthèse). Ce mémoire a pour but d'étudier la méthanisation et la cogénération en tant que sources d'énergie renouvelable, et d'analyser leurs avantages pour l'environnement et la production d'énergie, notamment en ce qui concerne la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la production d'énergie renouvelable. Nous examinons également les différents types de substrats qui peuvent être utilisés pour produire du biogaz, tels que les déchets agricoles, les déchets alimentaires et les déchets verts.

Mots clés : méthanisation, cogénération, énergie renouvelable, biogaz

Abstract

The purpose of this study is to provide a state-of-the-art review of the techniques for producing electricity from biomass gas (biogas and synthetic gas). This thesis aims to examine the process of anaerobic digestion and cogeneration as sources of renewable energy and to analyze their benefits for the environment and energy production, especially with regards to reducing greenhouse gas emissions and producing renewable energy. We also explore the different types of substrates that can be used to produce biogas, such as agricultural waste, food waste, and green waste.

Key words : anaerobic digestion, cogeneration, renewable energy, biogas

Sommaire

Introduction Générale

1. Généralités	1
Partie I : Concepts Théoriques	
I.1. Introduction	4
I.2. L'évolution du secteur de la méthanisation	4
I.3. Les préoccupations de la méthanisation	5
I.4. Les avantages de la méthanisation	5
I.5. Les Étapes de la méthanisation	7
I.5.1. L'hydrolyse :	7
I.5.2. L'acidogènese :	7
I.5.3. L'acétogènese :	7
I.5.4. La méthanogènese :	7
I.6. Les facteurs influençant la méthanisation	8
I.6.1. pH :	8
I.6.2. Température :	9
I.6.3. Rapport C/N :	10
I.6.4. Degré d'humidité :	10
I.7. Inibiteurs de la méthanisation	11
I.7.1. L'ammoniac (NH ₃)	11
I.7.2. Sulfure d'hydrogène (H ₂ S)	11
I.7.3. Substances toxiques	11
I.7.4. Nutriments	11
I.8. Les produits de la méthanisation	12
I.8.1. Digestat et éluat	12
I.8.2. Le biogaz	13
I.9. L'utilisation des résidus	14
I.10. Le principe de conversion de biogaz en énergie électrique	15
I.11. Conclusion	16

Partie II. Prototypage : calcul d'une station de production d'électricité à partir d'un
biogaz

II.1. Matériels et méthodes	18
II.1.1. Le digesteur	18
II.1.2. La chaudière	19
II.1.3. Turbine à vapeur	20
II.1.4. Le condenseur	21
II.1.5. La pompe	22
II.2. Expérience de la méthanisation et du biogaz	23
II.2.1. Production cumulée :	23
II.3. Production d'énergie :	25
II.3.1. Cycles thermodynamiques :	25
II.3.1.1. Cycle de Carnot :	25
II.3.1.2. Cycle de Rankine :	26
II.3.1.3. Cycle de Brayton :	28
II.4. Résultats et discussions	30
II.5. Taux de production d'électricité :	32
II.6. Conclusion	34

Conclusion Générale

Références	37
------------------	----

Annexe

Business model canvas	43
-----------------------------	----

Liste des figures

Figure I.1 : Équivalent énergétique d'un mètre cube de biogaz	6
Figure I.2 : Les quatre phases de la méthanisation	8
Figure 1.3 : Efficience de la digestion anaérobie selon la température.....	8
Figure II.1 : Schéma d'un digesteur	19
Figure II.2 : Schéma démontre le fonctionnement de la chaudière	20
Figure II.3 : Turbine à vapeur	21
Figure II.4 : Schéma d'une pompe centrifuge	22
Figure II.5 : Cinétique de la production cumulée du biogaz	23
Figure II.6 : Simulation du cycle de Rankine avec Aspen Hysys.....	29
Figure II.7 : Diagramme T-S du cycle de Rankine	27
Figure II.8 : Simulation du cycle de brayton avec Aspen Hysys	31
Figure II.9 : Diagramme T-S du cycle de Brayton.....	32

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Composition moyenne du biogaz [15].	13
Tableau I.2 : pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la proportion de méthane[16].	14
Tableau II.1. Résultats obtenus apres la simulation du cycle de Rankine et le cycle de Brayton	30
Tableau II.2: L'utilisation les résultats de l'expérience de la méthanisation dans la simulation du cycle de Rankine	33

Introduction générale

1. Généralités

La production d'énergie est l'un des enjeux majeurs de notre époque. Alors que la demande en énergie continue de croître, les sources d'énergie fossiles traditionnelles telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel deviennent de plus en plus rares et coûteuses. La recherche de sources d'énergie alternatives et durables est donc devenue un défi majeur pour les scientifiques, les ingénieurs et les décideurs politiques.

Dans ce contexte, la méthanisation est une technologie prometteuse pour la production d'énergie renouvelable à partir de déchets organiques. Elle permet de transformer les déchets en gaz méthane, qui peut être utilisé comme carburant pour produire de l'énergie [1]. Cependant, pour produire de l'énergie de manière efficace, il est souvent nécessaire de combiner la méthanisation avec d'autres technologies telles que la cogénération.

La cogénération est une technique qui permet de produire simultanément de l'électricité et de la chaleur à partir d'une source d'énergie. Elle est souvent utilisée dans les installations de méthanisation pour produire de l'électricité à partir du gaz méthane [2]. Cette technique permet de valoriser les déchets organiques tout en produisant de l'énergie propre et efficace.

A l'heure actuelle, les contraintes environnementales et les progrès technologiques réalisés donnent un nouvel attrait à ce mode de traitement des déchets organiques. Malgré ses atouts, cette technologie nécessite encore des progrès pour être tout à fait efficiente. Le premier point à améliorer est de favoriser l'intégration des installations de méthanisation dans notre environnement. En effet, il faut trouver des débouchés à proximité de ces unités pour écouler la matière organique et l'énergie produites à moindre coût. Ensuite, il faut chercher à affiner la qualité du digestat et du biogaz issu du mécanisme de méthanisation.

Une des solutions est de se concentrer sur le tri des matières organiques que l'on peut méthaniser. La qualité du digestat obtenu est tributaire de la nature des déchets organiques traités, mais aussi de la qualité du tri des déchets effectués au départ. La méthanisation est dans l'incapacité de remplacer l'incinération car elle ne

peut pas traiter l'ensemble des déchets actuellement incinérés. En effet, certains matériaux inertes ne sont pas détruits par la méthanisation et peuvent engendrer un dysfonctionnement du procédé.

Dans ce mémoire, nous allons explorer la combinaison entre la méthanisation et la cogénération pour produire de l'énergie renouvelable à partir de déchets organiques. Nous allons étudier les avantages et les limitations de cette technique, ainsi que ses implications pour la production d'énergie renouvelable. Enfin, nous allons discuter des perspectives d'avenir de cette technologie et des recommandations pour des recherches futures.

Partie I. Concepts théoriques

I.1. Introduction

La méthanisation, ou digestion aérobie, est un processus biologique naturel par lequel la fermentation et la dégradation des déchets organiques conduisent à la production combinée d'un biogaz et d'un digestat.

Les déchets organiques doivent être frais. Ils peuvent être composés de résidus agricoles (boue, fumier, résidus de culture, etc.), les sous-produits du secteur des aliments et boissons, les boutures d'herbe, les déchets biologiques domestiques (restes alimentaires, pelures de fruits et légumes), les déchets des secteurs de la restauration ou de la vente au détail, ou même les boues d'épuration.

Pour réaliser la méthanisation, ces déchets sont stockés dans un digesteur, un équipement hermétique dans lequel ils sont privés d'oxygène. Ensuite, des bactéries, naturellement présentes ou ajoutées dans ces déchets, se développeront et produiront du biogaz, un mélange de gaz contenant une proportion importante de méthane.

I.2. L'évolution du secteur de la méthanisation

Au fil des années, la méthanisation a connu une évolution significative, grâce aux avancées technologiques et à la prise de conscience de la nécessité de produire de l'énergie renouvelable. Les premières unités de méthanisation étaient destinées principalement à traiter les déchets agricoles pour produire du biogaz. Cependant, avec la prise de conscience croissante de la nécessité de protéger l'environnement, la méthanisation est devenue une alternative de choix pour la production d'énergie renouvelable à partir de déchets organiques de toutes sortes.

Aujourd'hui, les unités de méthanisation modernes sont capables de traiter des déchets alimentaires, des déchets verts, des boues d'épuration et bien d'autres types de déchets. En outre, la combinaison de la méthanisation avec la cogénération permet de produire de l'électricité et de la chaleur simultanément, ce qui en fait une source d'énergie renouvelable particulièrement attractive pour les industries et les collectivités.

En parallèle, l'utilisation de substrats de méthanisation pour la production de biométhane se développe également. Le biométhane, qui est du biogaz purifié et comprimé, peut être injecté dans le réseau de gaz naturel ou utilisé comme carburant pour les véhicules fonctionnant au gaz naturel.

En somme, la méthanisation a évolué d'une technique destinée principalement à traiter les déchets agricoles à une alternative de choix pour la production d'énergie renouvelable à partir de divers types de déchets organiques. Cette évolution, conjuguée à la combinaison avec la cogénération et la production de biométhane, confère à la méthanisation un potentiel considérable pour répondre aux enjeux environnementaux actuels et futurs.

I.3. Les préoccupations de la méthanisation

Ce processus est parfois critiqué, comme tout nouveau secteur en croissance, les préoccupations proviennent des habitants et des collectivités.

Le digesteur anaérobie est hermétiquement fermé, de sorte que les odeurs générées pendant la fermentation ne devraient pas déranger les résidents. Cependant, il peut y avoir des fuites de biogaz et ce mélange a une forte odeur en raison de la présence d'ammoniac et de sulfure d'hydrogène.

La principale préoccupation concerne le digestat et la pollution que son épandage sur le sol pourrait causer (pollution de l'eau potable par infiltration, impact sur la biodiversité...). Le digestat est fabriqué à partir de déchets organiques qui peuvent contenir des nitrates, des bactéries, des pesticides ou même des résidus de médicaments.

I.4. Les avantages de la méthanisation

La méthanisation présente plusieurs avantages.

Premièrement, ce processus naturel permet aux citoyens de traiter les déchets produits dans leurs exploitations. Ces déchets organiques, lorsqu'ils se décomposent, produisent naturellement du méthane, un gaz à effet de serre beaucoup plus puissant que le dioxyde de carbone. Grâce au procédé de méthanisation, ce gaz est valorisé et

ne monte plus dans l'atmosphère. C'est donc un réel avantage dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Le méthane, représentant 55 à 85% du volume de biogaz produit, est utilisable comme source d'énergie, ainsi 1m³ de méthane (soit 8 570 kcal) est l'équivalent d'un litre de mazout.

En outre, la chaleur générée dans le même temps n'est pas perdue. Il peut être utilisé comme source de chaleur de remplacement pour les bâtiments environnants, réduisant les coûts énergétiques du gaz naturel provenant de sources fossiles ou du chauffage électrique.

Enfin, en plus de la création d'énergie verte (biométhane), ce processus produit le digestat, le digestat remplace les engrais synthétiques et dégage moins d'odeurs que les engrais non traités.

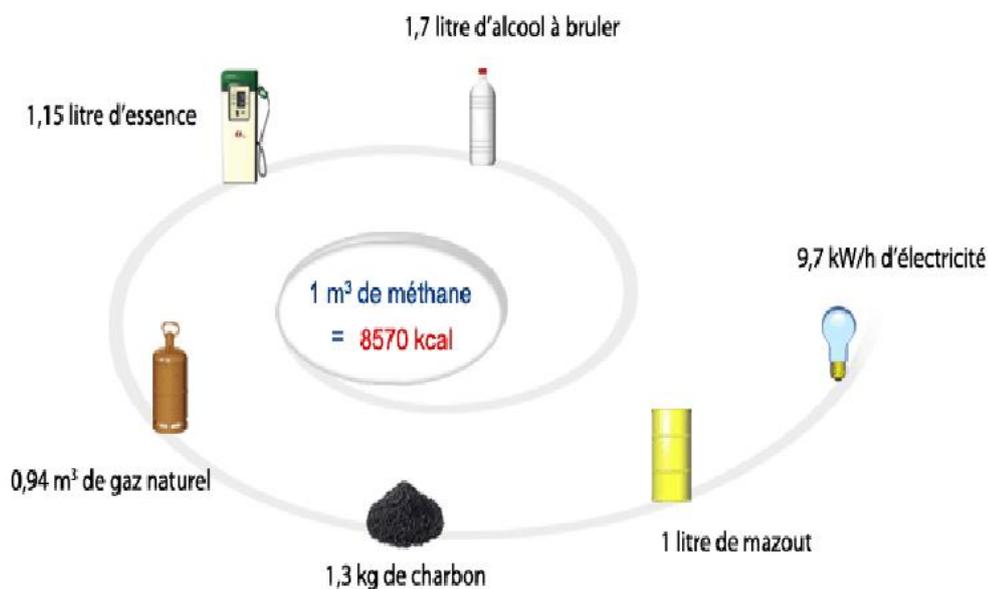


Figure I.1 : Équivalent énergétique d'un mètre cube de biogaz [3]

I.5. Les Étapes de la méthanisation

La méthanisation est un processus anaérobie qui permet la stabilisation des matières organiques en les transformant en méthane et en dioxyde de carbone. Ce processus est le résultat d'une activité microbienne complexe qui se déroule en quatre étapes principales, à savoir :[4]

I.5.1. L'hydrolyse :

Pendant l'hydrolyse, les grosses molécules organiques sont décomposées en composés plus simples. Cela entraîne la liquéfaction des déchets solides et leur conversion en petites molécules solubles. Cette étape est également appelée "solubilisation" des matières organiques. Par exemple, la cellulose est convertie en sucres solubles tels que le glucose ou le cellobiose. Le jus de fermentation ainsi produit est issu de cette solubilisation [5].

I.5.2. L'acidogénèse :

Les molécules simples sont transformées en acides de faible poids moléculaire tels que l'acide lactique ou des acides gras volatils contenant de 2 à 5 atomes de carbone, tels que l'acétate, le propionate et le butyrate, grâce à l'action des bactéries. Simultanément, des alcools de faible poids moléculaire tels que l'éthanol, du bicarbonate (HCO_3) et de l'hydrogène moléculaire (H_2) sont produits.

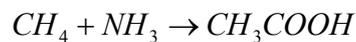
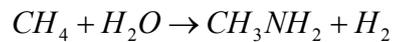
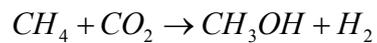
I.5.3. L'acétogénèse :

Les produits générés lors de l'étape de liquéfaction/fermentation, à l'exception de l'acétate (CH_3COO), du bicarbonate (HCO_3) et de l'hydrogène moléculaire (H_2), nécessitent d'être transformés avant de pouvoir être convertis en méthane. C'est là que les bactéries réductrices acétogènes et sulfato-réductrices entrent en jeu, produisant de l'hydrogène et de l'hydrogène sulfuré (H_2S) [4].

I.5.4. La méthanogénèse :

Pendant cette phase, deux types de bactéries méthanogènes interviennent. Les bactéries acétogènes réduisent l'acétate (CH_3COO) en méthane (CH_4) et en bicarbonate (HCO_3), tandis que les bactéries hydrogénotrophiques réduisent le bicarbonate (HCO_3) en méthane (CH_4).

Les acétogènes :



Les hydrogéntrophiques :

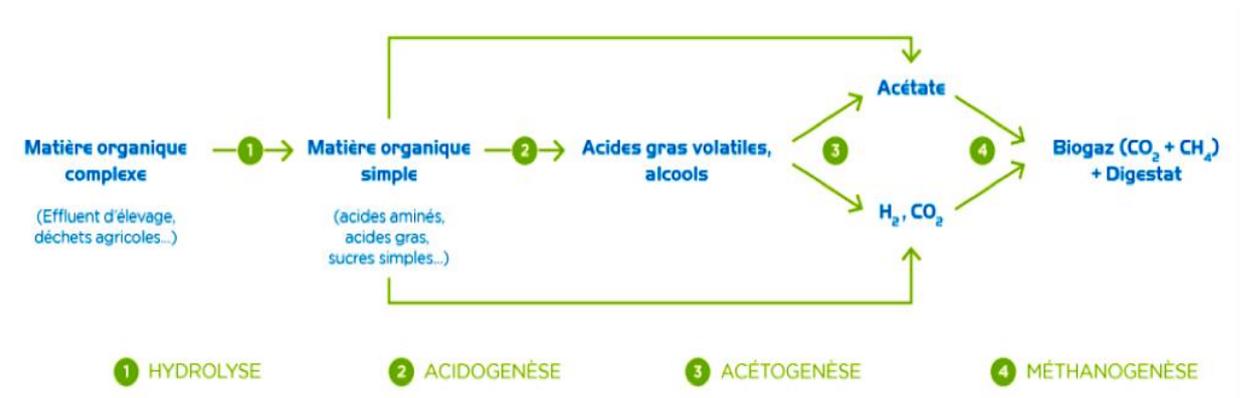
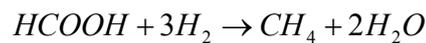
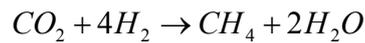


Figure I.2: Les quatre phases de la méthanisation

I.6. Les facteurs influençant la méthanisation

Les différentes variables qui ont une influence sur la vitesse et l'efficacité de la digestion anaérobie sont nombreuses et interagissent entre elles. Les principaux facteurs sont exposés ci-dessous.

I.6.1. pH :

Le maintien d'un pH stable est essentiel pour assurer un fonctionnement optimal des réacteurs de méthanisation, car le pH est l'un des paramètres les plus importants pour la méthanisation. En effet, une variation importante du pH peut perturber l'équilibre biologique du système et affecter la production de biogaz. Ainsi, un pH stable est un indicateur de la performance du processus de méthanisation. Le pH joue un rôle crucial dans la méthanisation et son maintien à un niveau stable est essentiel pour le bon fonctionnement des réacteurs. En effet, une variation du pH, notamment sa diminution, peut être signe de problèmes. Les bactéries méthanogènes sont

particulièrement sensibles aux variations de pH et même de légères altérations peuvent menacer la production du gaz [6]. La plage de fonctionnement acceptable d'un réacteur se situe entre 5,5 et 8,5, mais les valeurs idéales pour les microorganismes méthanogènes se situent entre 7,0 et 7,2. Si le pH tombe en dessous de 5,0, cela est mortel pour ces organismes [7], et même des valeurs proches de 6,0 peuvent souvent causer un arrêt du procédé [8].

Les différentes réactions qui ont lieu dans la digestion anaérobie peuvent produire des sous-produits qui ont des effets négatifs les uns sur les autres. Une surproduction d'acides volatils par les organismes acidogènes peut entraîner une baisse du pH et une inhibition de la méthanogenèse. Cette situation peut être causée par l'apport excessif de matières fraîches dans le digesteur. À l'inverse, une surconsommation d'acides pour la formation de méthane peut entraîner une augmentation du pH et un ralentissement de l'acidogenèse [7].

I.6.2. Température :

Comme pour d'autres processus biochimiques, l'efficacité de la méthanisation augmente avec l'augmentation de la température. Cependant, cette relation n'est pas linéaire et présente plutôt des plages de température optimales [6]. Pour maintenir une efficacité optimale, il est essentiel de maintenir la température dans l'une de ces plages [7]. La figure 1.3 présente une analyse des performances de la digestion anaérobie en fonction de la température. Cette évaluation est basée sur des critères tels que la production de biogaz, la vitesse de croissance des microorganismes et l'efficacité de dégradation du substrat.

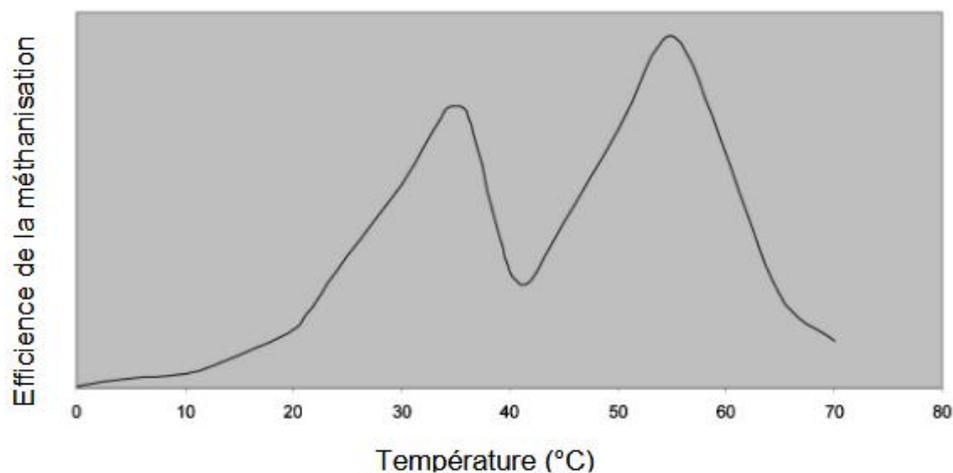


Figure 1.3 : Efficacité de la digestion anaérobie selon la température [7]

I.6.3. Rapport C/N :

La proportion carbone/azote de la matière organique est également importante pour le bon déroulement de la digestion anaérobie, tout comme pour la digestion aérobie. Les recherches montrent que le rapport carbone/azote idéal se situe entre 20 et 30, avec une valeur optimale de 25 [7]. Une augmentation de l'apport en azote peut entraîner une production accrue d'ammoniac, qui peut être toxique pour les microorganismes méthanogènes et inhiber le processus de méthanisation [9].

I.6.4. Degré d'humidité :

L'humidité est un facteur clé pour l'activité bactérienne, en particulier lorsqu'elle est en deçà d'un certain seuil. Des études ont montré que des taux d'humidité supérieurs à 60 % peuvent augmenter la production de biogaz, atteignant un maximum d'environ 80 %. Au-delà de ce seuil, la production se stabilise sur un plateau élevé [10]. Cette propriété est utilisée dans certains sites d'enfouissement où la recirculation du lixiviat est utilisée pour accélérer la dégradation des matières putrescibles et augmenter la production de biogaz [10,11].

I.7. Inhibiteurs de la méthanisation

En plus des paramètres physico-chimiques tels que le pH et la température, certains composés peuvent avoir des effets néfastes sur la digestion anaérobie. Cependant, la flore microbienne anaérobie peut s'adapter et devenir résistante à ces substances toxiques, voire les dégrader [6].

I.7.1. L'ammoniac (NH_3) : il est connu pour inhiber la phase méthanogène de la digestion anaérobie lorsque sa concentration dépasse quelques grammes par litre. Cette situation peut se produire lorsque des matières riches en protéines telles que les restes d'élevage et les déchets agroalimentaires sont ajoutées au réacteur [6]. Cependant, il est possible pour les micro-organismes de s'adapter à des doses plus élevées d'ammoniac, pouvant atteindre jusqu'à 5 g/l, de manière naturelle [12].

I.7.2. Sulfure d'hydrogène (H_2S) : si les substrats utilisés pour la digestion anaérobie sont riches en protéines soufrées et en sulfates, cela peut entraîner une augmentation de la production de H_2S . Ce gaz est toxique pour les micro-organismes méthanogènes, ainsi que corrosif pour les matériaux. De plus, la précipitation de certains cations avec les sulfures dissous peut entraîner une carence en éléments essentiels tels que le nickel et le cobalt [6].

I.7.3. Substances toxiques : en ce qui concerne les substances organiques, les hydrocarbures aliphatiques chlorés et les acides gras à longue chaîne sont les plus nuisibles pour la digestion anaérobie. En ce qui concerne les éléments inorganiques, les cations comme le sodium (Na^+), le potassium (K^+), ainsi que les métaux lourds tels que le cuivre, le nickel, le zinc et le plomb sont les plus toxiques, en plus de l'ammoniac (NH_3) et de l'hydrogène sulfuré (H_2S) [6].

I.7.4. Nutriments : pour que les biodigesteurs fonctionnent correctement, en plus des matières organiques riches en carbone et en énergie, il est essentiel de disposer d'une concentration appropriée de macroéléments et de microéléments. Les principaux macroéléments sont l'azote et le phosphore, tandis que le fer, le cobalt, le nickel et le zinc sont des éléments traces nécessaires [6].

I.8. Les produits de méthanisation

I.8.1. Digestat et éluat

Le digestat est un résidu riche en composants organiques et partiellement stabilisé, qui présente une similarité avec l'humus. Dans le contexte de la biométhanisation des intrants solides, il prend généralement la forme d'une pâte à la sortie du digesteur et peut émettre des odeurs désagréables.

Le surplus de liquide produit pendant la biométhanisation peut être récupéré pour être réutilisé dans le système afin de fournir de l'eau et des microorganismes spécialisés, ou pour réduire le volume des matières à transporter. Dans de nombreux cas, la partie solide du digestat est compostée pour produire un amendement pour les sols. La partie liquide, appelée éluat, est riche en éléments nutritifs et peut être utilisée directement comme fertilisant liquide [7].

Le digestat peut être utilisé comme source d'énergie en étant brûlé dans des fours de cimenteries ou des centrales thermiques. Des études ont rapporté que le digestat séché avec une siccité de 90% possède un pouvoir calorifique de 3 500 kcal/kg [13]. De plus, ces matières peuvent être considérées comme une source d'énergie renouvelable et carboneutre.

On considère que la digestion thermophile permet une élimination efficace des pathogènes présents dans le digestat grâce aux hautes températures atteintes lors du processus de digestion. Pour les systèmes à températures moyennes, une longue durée de séjour peut être nécessaire pour inactiver les pathogènes [7].

En complément, il est possible de mettre en place des traitements supplémentaires avant ou après la digestion anaérobie pour garantir l'élimination totale de tout pathogène présent dans le digestat. Ces traitements peuvent inclure des méthodes physiques telles que la pasteurisation ou la stérilisation, ou des traitements chimiques tels que l'utilisation de chaux ou d'autres agents désinfectants [14].

I.8.2. Le biogaz

La génération d'un gaz combustible à partir de la digestion anaérobie de la biomasse, est une technologie bien connue. Il existe déjà des millions d'usines de biogaz dans le monde. Alors que l'utilisation du gaz pour la combustion directe dans les foyers ou les lampes à gaz est courante, la production d'électricité à partir de biogaz est encore relativement rare dans la plupart des pays en développement. Dans certains pays industrialisés, la production d'électricité est le principal objectif des installations de biogaz ; la conversion du biogaz en électricité est devenue une technologie standard.

Le biogaz peut être utilisé de la même manière que le gaz naturel dans les poêles à gaz, les lampes ou comme carburant pour les moteurs. Il se compose de 50-75% de méthane, 25-45% de dioxyde de carbone, 2-8% de vapeur d'eau et des traces de O₂, N₂, NH₃, H₂, H₂S. Comparez cela avec le gaz naturel, qui contient 80 à 90% de méthane. La teneur en énergie du gaz dépend principalement de sa teneur en méthane. Une teneur élevée en méthane est donc souhaitable. Une certaine teneur en dioxyde de carbone et en vapeur d'eau est inévitable, mais la teneur en soufre doit être réduite au minimum - en particulier pour les moteurs -.

Tableau I.1 : Composition moyenne du biogaz [15].

Gaz	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	NH ₃	H ₂ O
Concentration	55-80 %	20-45 %	0-1.5%	0-0.5 %	Saturé

Théoriquement, le biogaz peut être converti directement en électricité en utilisant une pile à combustible. Cependant, ce processus nécessite du gaz très propre et des piles à combustible coûteuses. Par conséquent, cette option est encore une question de recherche et n'est pas actuellement une option pratique. La conversion du biogaz en énergie électrique par un groupe électrogène est beaucoup plus pratique. Contrairement au gaz naturel, le biogaz se caractérise par une résistance élevée au choc et peut donc être utilisé dans les moteurs à combustion à taux de compression élevés.

Le biogaz est principalement composé de méthane et de gaz carbonique, avec la possibilité d'avoir d'autres gaz présents en quantités plus faibles, tels que l'hydrogène et le sulfure d'hydrogène (H₂S). La quantité de ces gaz dépend des types de déchets traités et de l'avancement du processus de méthanisation. Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur qui est produite par la combustion complète d'une unité de quantité de combustible. Pour le méthane, le pouvoir calorifique inférieur (PCI) est de 9,94 kWh/m³ à une température de 0°C et à une pression atmosphérique.

Le PCI du biogaz dépend de la teneur en méthane, qui peut varier selon les conditions de production. Par exemple, si le biogaz contient 70% de méthane, son PCI sera d'environ 6,96 kWh/m³ (9,94 x 0,7) [16].

Tableau I.2 : pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la proportion de méthane [16].

Proportion en CH ₄ (%)	PCS (kW/m ³)	PCI (kW/m ³)
50	5,47	4,97
60	6,56	5,96
70	7,66	6,96
80	8,65	7,95
90	9,75	8,95
100	10,84	9,94

I.9. L'utilisation des résidus

Le premier résidu est le biogaz, il peut alors être utilisé de trois façons :

Les résidus de la méthanisation peuvent être utilisés de différentes manières en fonction de leur composition. Le biogaz, par exemple, peut être utilisé de plusieurs façons. S'il contient suffisamment de méthane, il peut être injecté dans le réseau gazier ou purifié pour obtenir du biométhane. Ce dernier peut être utilisé pour alimenter des stations de véhicules électriques fonctionnant au gaz naturel. Par ailleurs, le biogaz peut être brûlé dans une installation de cogénération pour produire

de l'énergie renouvelable et de la chaleur qui sera utilisée dans les bâtiments ou les installations à proximité. Ces différentes utilisations des résidus de la méthanisation permettent de valoriser les déchets organiques en produisant de l'énergie renouvelable et en réduisant l'impact environnemental de leur traitement.

Un autre résidu provient de ce procédé : le digestat. Il représente entre 70 et 90% du poids total introduit dans le digesteur et pourrait être utilisé comme engrais naturel par les agriculteurs dans leurs champs.

I.10. Le principe de conversion de biogaz en énergie électrique

La conversion du biogaz en électricité est une méthode courante pour produire de l'énergie à partir de sources renouvelables. Cette méthode repose sur le principe de la production de vapeur d'eau à partir de la chaleur générée par la combustion du gaz. Cette vapeur est ensuite utilisée pour alimenter une turbine qui produit de l'électricité.

Le processus de conversion du biogaz en électricité est appelé cycle thermodynamique, qui est une méthode éprouvée et couramment utilisée pour convertir divers types de combustibles en énergie électrique. En utilisant cette méthode, l'énergie thermique est convertie en énergie électrique à l'aide d'une série de processus. Dans le cas de la conversion du biogaz, le cycle thermodynamique est utilisé pour transformer la chaleur générée par la combustion du gaz en électricité.

Le processus commence par la combustion du biogaz dans une chaudière pour produire de la chaleur. Cette chaleur est ensuite utilisée pour produire de la vapeur d'eau en faisant bouillir de l'eau. Cette vapeur d'eau est alors dirigée vers une turbine, qui est connectée à un générateur d'électricité. La vapeur pousse les pales de la turbine, ce qui fait tourner un arbre qui est relié au générateur, produisant ainsi de l'électricité.

Ce processus de conversion est extrêmement efficace, car il utilise la chaleur produite par la combustion du biogaz pour produire de l'électricité. De plus, la production d'électricité à partir de biogaz est une source d'énergie renouvelable qui ne produit pas de gaz à effet de serre, ce qui en fait une option intéressante pour lutter contre le changement climatique.

I.11. Conclusion

En conclusion, cette exploration de la méthanisation et de la cogénération à partir de biogaz nous a permis d'acquérir des connaissances essentielles sur les processus de production d'énergie à partir de déchets organiques. Nous avons examiné les différents processus de méthanisation, les facteurs qui influencent la production de biogaz et les avantages de cette technologie en termes de durabilité environnementale et économique.

Partie II. Prototypage :
Calcul d'une station de production
d'électricité à partir d'un biogaz

Introduction

Dans cette partie, il sera question de calculer une station électrique alimenté par du biogaz. Ce dernier est censé être produit à partir des déchets solides d'une agglomération domestique.

II.1. Matériel et méthodes

II.1.1. Le digesteur [17]

Le digesteur est une unité clé de la méthanisation qui permet la conversion de la matière organique en biogaz sous l'action des microorganismes et il se compose de :

Une cuve métallique : Cette cuve a une capacité de 800 litres et est utilisée pour la digestion anaérobie du substrat organique. Elle a une forme cylindrique avec une hauteur de 1,65 m et un diamètre de 1,25 m. Les extrémités arrondies de la cuve sont utilisées comme pied de cuve (partie inférieure) et dôme de récupération du biogaz (partie supérieure).

Un gazomètre à cloche : Ce dispositif est utilisé pour le stockage du biogaz produit. Il se compose d'un bâti extérieur qui abrite une cuve à fond plat d'une hauteur de 1,25 m. À l'intérieur de cette cuve, une autre cuve à dôme coulisse grâce à un joint hydraulique. La cuve à dôme est ouverte sur sa base pour permettre le piégeage et le stockage du biogaz.

La conception et l'assemblage de ces équipements ont été spécifiquement réalisés pour l'expérimentation et la collecte de biogaz généré par la méthanisation du substrat organique.

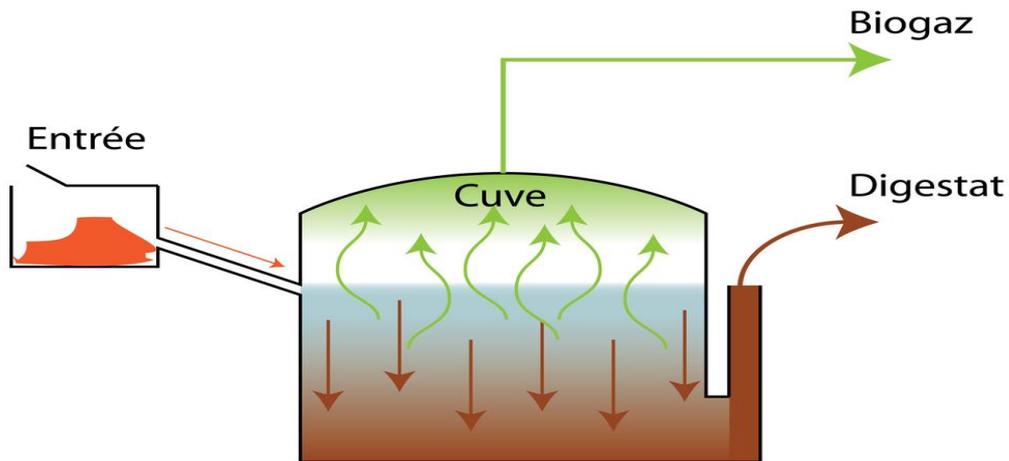


Figure II.1 : Schéma d'un digesteur[18]

II.1.2. La chaudière

La chaudière est un élément clé de la cogénération et joue un rôle important dans la production de vapeur nécessaire à la production d'électricité et de chaleur. Elle utilise le biogaz produit dans le digesteur pour chauffer l'eau et produire de la vapeur à haute pression. La chaudière doit être conçue pour être en mesure de fonctionner avec des gaz corrosifs et contenant des impuretés telles que le sulfure d'hydrogène et les particules solides. Il est important de maintenir une température de fonctionnement optimale pour assurer une efficacité maximale et une durée de vie prolongée de la chaudière. Des techniques telles que le nettoyage régulier des tubes, le traitement des gaz d'échappement et la régulation de la température peuvent être utilisées pour maintenir la chaudière en bon état de fonctionnement.

Plusieurs études ont été menées sur l'efficacité et la performance des chaudières utilisées dans les installations de cogénération de biogaz. Une étude a montré que l'utilisation de chaudières à haute efficacité énergétique peut augmenter considérablement la production d'électricité et de chaleur dans les installations de cogénération de biogaz [19]. Une autre étude a montré que l'utilisation de chaudières à biomasse peut réduire les émissions de gaz à effet de serre et améliorer la durabilité des installations de cogénération de biogaz [20].

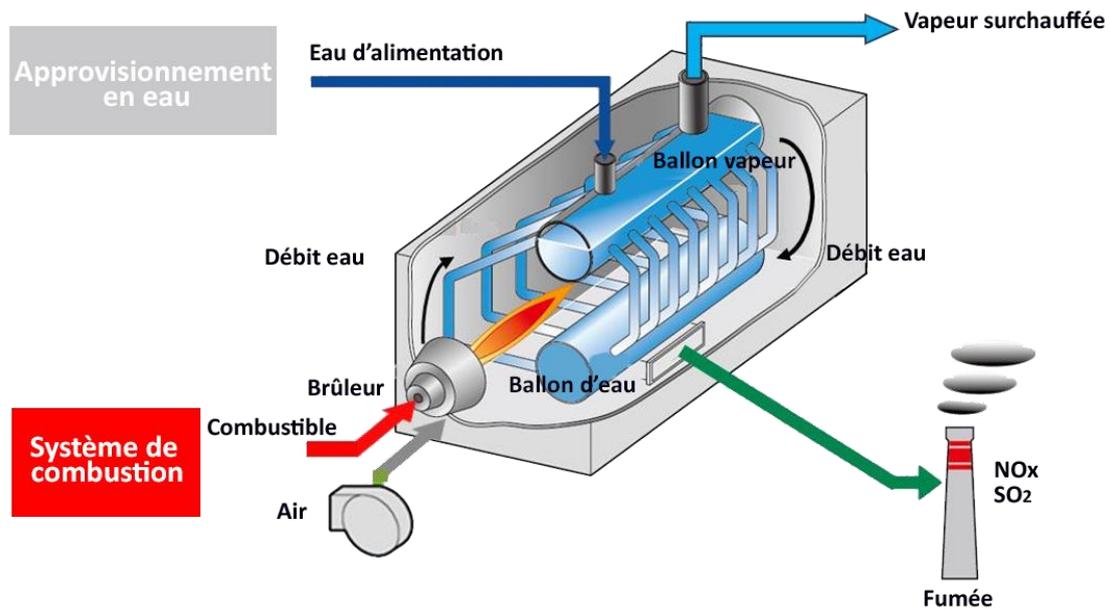


Figure II.2 : Schéma démontre le fonctionnement de la chaudière[21]

II.1.3. Turbine à vapeur

La turbine à vapeur est un élément essentiel de la cogénération et permet de convertir l'énergie thermique de la vapeur produite dans la chaudière en énergie électrique. La turbine est composée d'aubes qui sont entraînées par la vapeur haute pression, produisant ainsi un mouvement rotatif qui est converti en électricité par le générateur. Les turbines à vapeur utilisées dans les installations de cogénération doivent être conçues pour fonctionner avec des températures et des pressions variables, ainsi que pour résister à l'usure et à la corrosion.

Plusieurs études ont été menées pour évaluer les performances des turbines à vapeur dans les installations de cogénération de biogaz. Une étude a montré que la régulation de la température de la vapeur d'entrée de la turbine peut améliorer l'efficacité de la cogénération [22]. Une autre étude a montré que l'utilisation de turbines à vapeur à haute efficacité énergétique peut améliorer la production d'électricité et de chaleur dans les installations de cogénération de biogaz [23].

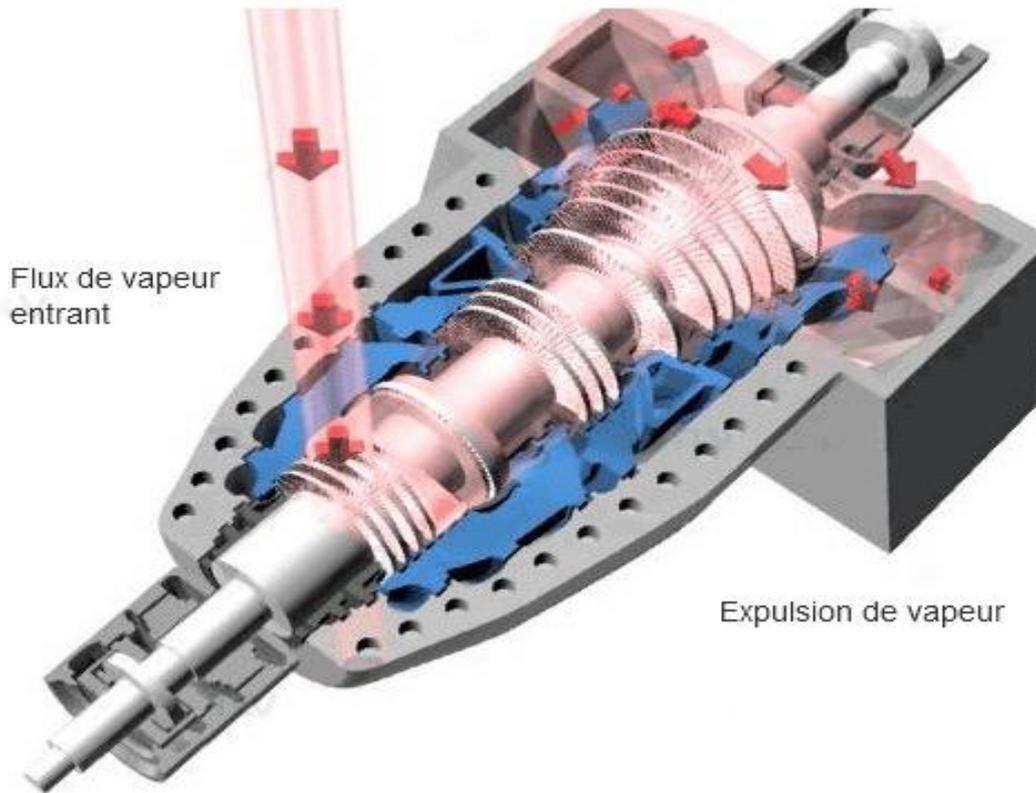


Figure II.3 : Turbine à vapeur[24]

II.1.4. Le condenseur

Le condenseur est un composant clé de la cogénération de biogaz, car il permet de récupérer la vapeur d'eau de la turbine à vapeur et de la convertir en eau liquide. Le condenseur doit être conçu pour fonctionner efficacement avec la vapeur haute pression produite par la turbine, en utilisant des échangeurs de chaleur pour transférer la chaleur de la vapeur à l'eau de refroidissement.

Plusieurs études ont été menées pour évaluer les performances des condenseurs dans les installations de cogénération de biogaz. Une étude a montré que l'efficacité de la cogénération peut être améliorée en augmentant la surface de transfert de chaleur du condenseur [25]. Une autre étude a montré que l'utilisation de condenseurs à haute efficacité énergétique peut augmenter la production d'électricité et de chaleur dans les installations de cogénération de biogaz [26].

II.1.5. La pompe

La pompe est un composant essentiel de l'installation de cogénération de biogaz, car elle assure la circulation de l'eau de refroidissement à travers les échangeurs de chaleur de la chaudière et du condenseur. La pompe doit être conçue pour fonctionner efficacement avec les autres composants de l'installation et assurer un débit d'eau suffisant pour maintenir des températures de fonctionnement appropriées.

Plusieurs études ont été menées pour évaluer les performances des pompes dans les installations de cogénération de biogaz. Une étude a montré que l'utilisation de pompes à haute efficacité énergétique peut réduire la consommation d'énergie de l'installation et améliorer son rendement global [27]. Une autre étude a montré que l'optimisation du débit d'eau de la pompe peut réduire les pertes de chaleur et améliorer l'efficacité de l'installation de cogénération [28].

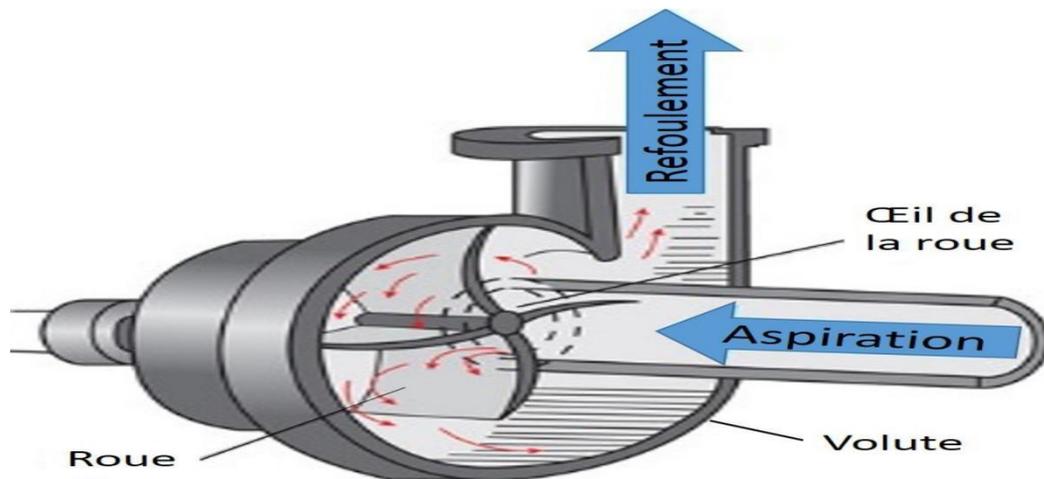


Figure II.4 : Schéma d'une pompe centrifuge[29]

La maintenance régulière de ces matériaux est également importante pour assurer son bon fonctionnement et prolonger leurs durées de vies. Des techniques telles que le nettoyage régulier et le remplacement des pièces usées peuvent être utilisées pour leurs maintenir en bon état de fonctionnement.

II.2. Expérience de la méthanisation et du biogaz

Igoud et al, 2002 dans Revue Des Énergies Renouvelables [30] et après la récolte des déchets organiques, leur pesée (440 kg), le substrat de digestion obtenu a permis d'alimenter le digesteur. Celui-ci a été fermé hermétiquement pour favoriser la digestion anaérobie du substrat.

Pour optimiser ce processus, le substrat a été chauffé à une température moyenne de 35°C et homogénéisé par un mélangeur manuel. Le biogaz produit dans le dôme du digesteur a été quantifié par un compteur à gaz puis transféré vers le gazomètre à cloche pour le prélèvement des échantillons à analyser.

II.2.1. Production cumulée :

Dans une période de 77 jours, les auteurs [31] attestent que la production cumulée de biogaz s'est élevée à 26.898 m³. La figure II montre l'évolution de la production de biogaz au fil du temps.

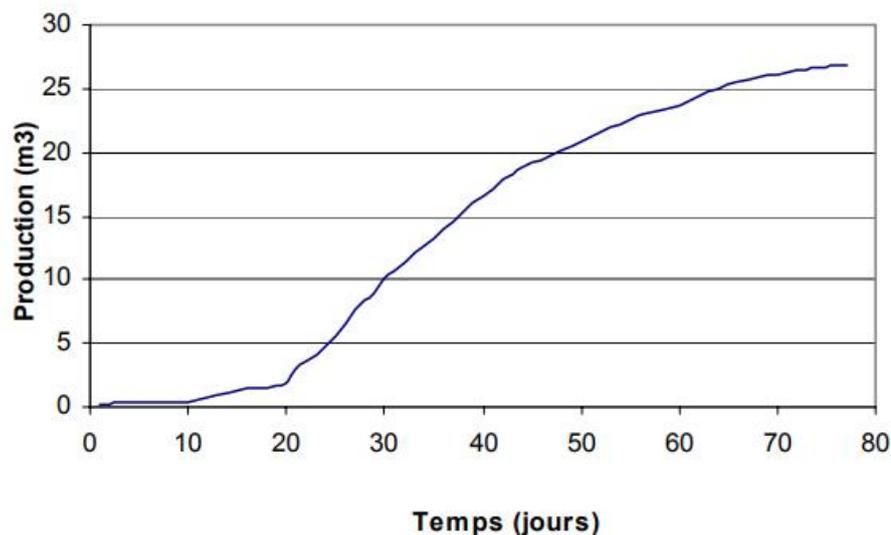


Figure II.5 : Cinétique de la production cumulée du biogaz

Il existe trois phases distinctes :

- Phase de latence : Après la fermeture du digesteur, une période de latence de 10 jours a été observée, pendant laquelle une production très faible de biogaz a été enregistrée, estimée à 0,045 m³. Cette phase correspond à la liquéfaction du substrat, au cours de laquelle se déroulent les processus d'hydrolyse,

d'acidogénèse et d'acétogénèse. Cette étape prépare le terrain pour la phase de gazéification, ou méthanogénèse, qui est responsable de la production du biogaz [31, 32].

- Phase exponentielle : À partir du 10^{ème} jour, les conditions de production optimales sont atteintes, ce qui se traduit par des quantités de biogaz plus importantes. Deux étapes distinctes de production sont observées :

La première se déroule pendant les 10 premiers jours, au cours desquels la production journalière de biogaz reste faible, variant entre 0,006 et 0,056 m³.

La seconde phase s'étend du 11^{ème} au 65^{ème} jour, avec des productions journalières élevées allant de 0,2 à 0,9 m³ de biogaz.

- Phase de palier : À partir du 66^{ème} jour, une phase de palier est observée, caractérisée par une production plus lente de biogaz. Cette diminution de la production peut être attribuée à l'épuisement du substrat de digestion, qui constitue la source nutritive et énergétique de la flore microbienne, en particulier de la flore méthanogène responsable de la production de biogaz.

Grâce au dispositif de digestion mis en place, la fermentation des déchets organiques a permis de produire 23.898 m³ de biogaz sur une période de 77 jours. L'évaluation de la qualité du biogaz a révélé une teneur moyenne en biométhane de 61%, ce qui confirme sa richesse en gaz combustible. Les autres composants gazeux présents dans le biogaz sont en moyenne de 35,65% de dioxyde de carbone (CO₂) et de 2,90% d'azote (N₂).

La période de production optimale se situe entre le 11^{ème} et le 65^{ème} jour. Pendant cette période, non seulement la production de biogaz est à son maximum, mais la teneur en biométhane atteint également son optimum. Cela suggère qu'il existe une corrélation entre la production de biogaz et la concentration de biométhane dans celui-ci.

II.3. Production d'énergie :

La production d'énergie à partir du biogaz joue un rôle essentiel dans le processus global de méthanisation et trouve une place centrale entre les étapes de production de biogaz et son utilisation dans les cycles thermodynamiques. Une fois que le biogaz est produit par la méthanisation des déchets organiques, il peut être utilisé comme une source d'énergie renouvelable pour générer de l'électricité. Cette conversion de l'énergie contenue dans le biogaz en électricité peut être réalisée à l'aide de différentes technologies, telles que le cycle de Brayton et le cycle de Rankine.

Dans ces processus de conversion d'énergie, le biogaz est brûlé pour produire de la chaleur, qui est ensuite utilisée pour générer de la vapeur ou pour entraîner des turbines. Ces turbines, à leur tour, font tourner des générateurs qui produisent de l'électricité. Ainsi, l'énergie thermique contenue dans le biogaz est transformée en énergie électrique, qui peut être utilisée localement ou injectée dans le réseau électrique.

II.3.1. Cycles thermodynamiques :

II.3.1.1. Cycle de Carnot :

Le cycle de Carnot est un modèle théorique idéalisé d'un moteur thermique réversible, souvent utilisé comme référence pour évaluer les performances des systèmes de conversion d'énergie thermique en travail. Ce cycle se compose de quatre processus réversibles : la compression isotherme, l'expansion adiabatique, la détente isotherme et la compression adiabatique [33].

Le cycle de Carnot est basé sur deux réservoirs thermiques, un réservoir chaud à une température élevée et un réservoir froid à une température basse. Le gaz de travail dans le cycle subit des transformations pour absorber de la chaleur du réservoir chaud et rejeter de la chaleur vers le réservoir froid, tout en effectuant un travail mécanique [34].

L'efficacité du cycle de Carnot, définie comme le rapport du travail net fourni au flux de chaleur absorbé du réservoir chaud, est donnée par :

$$\eta_{th, Carnot} = 1 - \frac{T_f}{T_{ch}} \quad (II.1)$$

Où η représente l'efficacité du cycle, T_f et T_{ch} sont les températures du réservoir froid et du réservoir chaud respectivement.

Le cycle de Carnot est considéré comme le cycle le plus efficace possible pour une différence de température donnée. Il représente la limite théorique de l'efficacité pour tout moteur thermique fonctionnant entre deux réservoirs thermiques. Cependant, le cycle de Carnot est un modèle idéalisé qui ne peut être atteint en pratique en raison des irréversibilités et des pertes thermiques inhérentes aux systèmes réels [35].

II.3.1.2. Cycle de Rankine : [36]

Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique utilisé dans les centrales électriques pour convertir la chaleur en électricité. Il est particulièrement adapté à la production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables, comme la biomasse et le biogaz. Le cycle de Rankine est basé sur l'utilisation de l'eau pour produire de la vapeur, qui fait ensuite tourner une turbine pour produire de l'électricité. Ce processus est efficace car l'eau peut absorber de grandes quantités de chaleur et produire de la vapeur à haute pression, ce qui permet d'obtenir des rendements élevés.

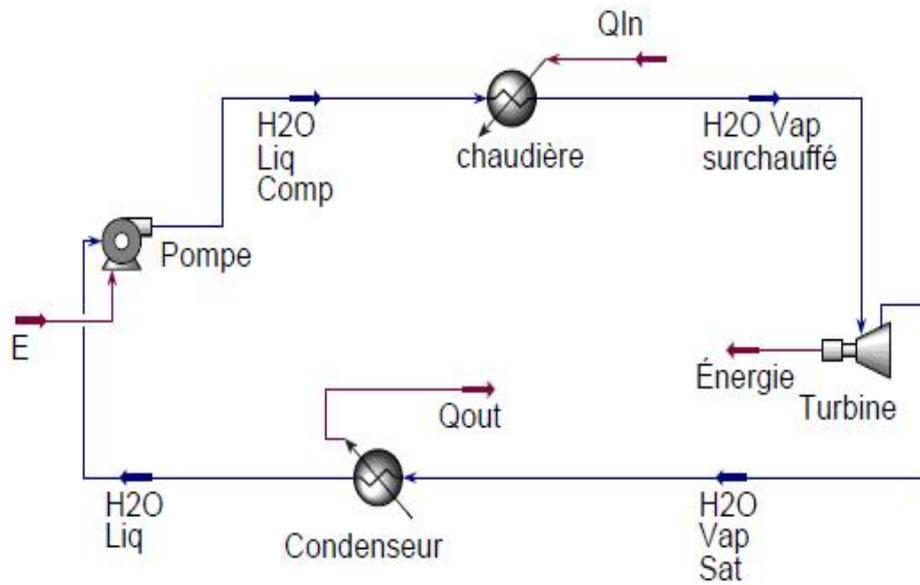


Figure II.6 : Simulation du cycle de Rankine par Aspen Hysys

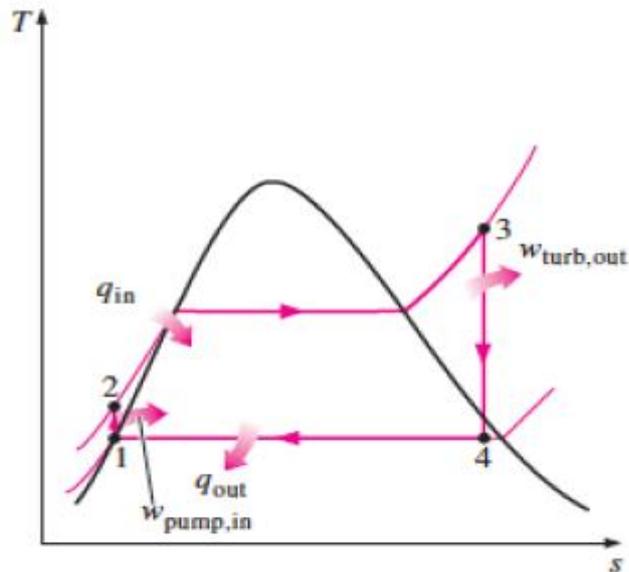


Figure II.7 : Diagramme T-S du cycle de Rankine[37]

Le cycle de Rankine élémentaire se compose des quatre évolutions suivantes :

- 1→2 : une compression isentropique dans la pompe,
- 2→3 : un apport de chaleur à pression constante dans la chaudière,
- 3→4 : une détente isentropique dans la turbine,
- 4→1 : une évacuation de chaleur à pression constante dans le condenseur.

Il convient de noter que plusieurs sources font état du fait que le point 3 (l'état 3 dans la figure II.8) du cycle de Rankine se situe sur la courbe de rosée. Si la température T_3 est supérieure à la température de saturation correspondant à la pression P_3 , le cycle est parfois appelé cycle de Rankine à surchauffe.

Supposons un cycle de Rankine, la turbine fonctionne à l'état stable avec des conditions d'entrée de 6 MPa, $t = 275,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $x = 1$ (point 3). La vapeur sort de cet étage de turbine à une pression de 0,008 MPa, $41,5 \text{ }^\circ\text{C}$ et $x = 0.694$ (point 4).

II.3.1.3. Cycle de Brayton : [38]

Le cycle de Brayton, également connu sous le nom de cycle à air ou de cycle de turbine à gaz, est un processus thermodynamique largement utilisé pour la production d'énergie mécanique ou électrique [39]. Ce cycle se compose de quatre étapes principales : la compression, la combustion, l'expansion et le rejet de chaleur. Dans la première étape, l'air est comprimé par un compresseur, augmentant ainsi sa pression et sa température [40]. Ensuite, le carburant est introduit et brûlé dans une chambre de combustion à pression constante, produisant une expansion des gaz chauds. Cette expansion se fait à travers une turbine, convertissant ainsi l'énergie thermique en énergie mécanique [41]. Enfin, les gaz d'échappement sont rejetés dans un dispositif de refroidissement ou un échangeur de chaleur, réduisant leur température avant d'être évacués.

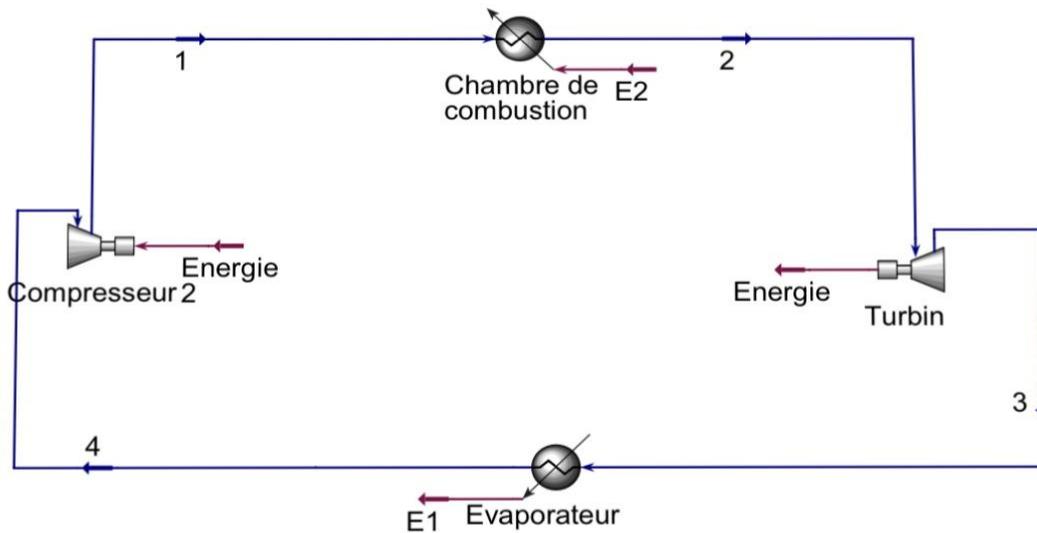


Figure II.8 : Simulation du cycle de Brayton par Aspen Hysys

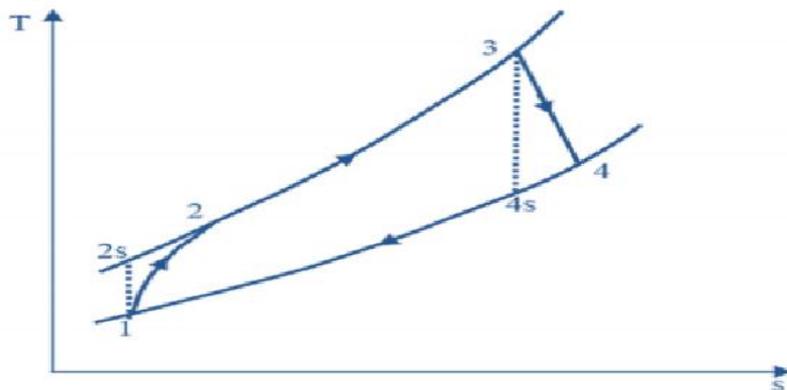


Figure II.9 : Cycle thermodynamique de brayton [42]

Les transformations thermodynamiques du cycle de Brayton sont :

- 1→2 : une compression isentropique dans le compresseur,
- 2→3 : combustion isobare dans la chambre de combustion,
- 3→4 : une détente isentropique dans la turbine,
- 4→1 : un échappement des gaz,

Supposons le cycle de Brayton fermé, qui est l'un des cycles thermodynamiques les plus courants que l'on puisse trouver dans les moteurs à turbine à gaz modernes. Dans ce cas, supposons une turbine à gaz à hélium avec un seul compresseur et une

seule turbine. L'un des paramètres clés de ces moteurs est la température maximale à l'entrée de la turbine et le taux de compression du compresseur ($P_R = P_2/P_1$), qui détermine l'efficacité thermique de ce moteur.

Dans cette turbine, l'étage haute pression reçoit le gaz (point 3) d'un échangeur de chaleur, où $P_3 = 6,7$ MPa, $T_3 = 1190$ K (917°C) et $P_4 = 2,78$ MPa. Le point 4 est obtenu par projection.

Ainsi, le rapport de pression du compresseur est égal à $P_R = 2,41$. De plus, nous savons que le compresseur reçoit du gaz (point 1) sur la figure : $P_1 = 2,78$ MPa et $T_1 = 299$ K (26°C).

II.4. Résultats et discussions

Tableau II.1. Résultats obtenus par simulation du cycle de Rankine et le cycle de Brayton

Désignation	Cycle de Rankine	Cycle de Brayton	Unités
T_1	314	299	K
P_1	0,008	2,78	MPa
T_2	314,9	424	K
P_2	6	6,7	MPa
T_3	550,1	1190	K
P_3	6	6,7	MPa
T_4	314,9	839	K
P_4	0,008	2,78	MPa
W pompe/comp	$1,033 \times 10^5$	$2,341 \times 10^8$	kJ/h
W turbine	$1,33 \times 10^6$	$4,958 \times 10^8$	kJ/h
W net	$1,23 \times 10^6$	$2,617 \times 10^8$	kJ/h
q_{ch}	$4,894 \times 10^6$	$1,434 \times 10^9$	kJ/h
η	27,1	18,2	%
$\eta_{th, Carnot}$	42,9	74,8	%

L'analyse des résultats obtenus révèle que le cycle de Rankine a affiché une efficacité de 27,1%, tandis que le cycle de Brayton a montré une efficacité de 18,2%. Ces valeurs d'efficacité indiquent le pourcentage de l'énergie thermique fournie qui a été converti en travail mécanique par chaque cycle.

La plus grande efficacité du cycle de Rankine par rapport au cycle de Brayton suggère que le cycle de Rankine est plus performant dans la conversion de l'énergie thermique en travail. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette différence de performances entre les deux cycles. En effet et tout d'abord, le cycle de Rankine utilise la vaporisation et la condensation de l'eau en tant que fluide de travail. Cette approche présente des avantages significatifs, tels qu'une capacité calorifique élevée et une large plage de température de vaporisation. Ces caractéristiques permettent une récupération plus efficace de l'énergie thermique fournie et une conversion plus complète en travail mécanique. De plus, la condensation de la vapeur d'eau dans le cycle de Rankine permet de récupérer davantage de chaleur, ce qui contribue à une meilleure efficacité du cycle. En revanche, le cycle de Brayton utilise un gaz compressible, ce qui peut entraîner des pertes d'énergie plus importantes lors de la compression et de la détente du gaz. Ces pertes peuvent réduire l'efficacité globale du cycle de Brayton par rapport au cycle de Rankine [43]. De plus, les propriétés thermodynamiques du gaz utilisé dans le cycle de Brayton peuvent influencer sa performance, notamment en termes de transfert de chaleur et de compression du gaz. Ces résultats sont spécifiques aux conditions de notre étude et aux paramètres choisis. Des variations dans les paramètres opérationnels tels que la pression, la température et le fluide de travail peuvent entraîner des variations dans les performances des cycles. Par conséquent, une optimisation des paramètres du cycle de Brayton peut permettre d'améliorer son efficacité et de réduire l'écart de rendement par rapport au cycle de Rankine.

Les résultats obtenus indiquent clairement que le cycle de Rankine présente un rendement supérieur au cycle de Brayton [44, 45]. L'utilisation du cycle de Rankine dans le contexte de la méthanisation s'avère être une approche prometteuse pour la production d'électricité à partir du biogaz.

L'efficacité plus élevée du cycle de Rankine s'explique par plusieurs facteurs. Tout d'abord, la vaporisation et la condensation de l'eau en tant que fluide de travail permettent une récupération plus efficace de l'énergie thermique fournie, ce qui se traduit par une meilleure conversion en travail mécanique [43]. De plus, la condensation de la vapeur d'eau permet de récupérer davantage de chaleur, contribuant ainsi à une meilleure efficacité globale du cycle.

En revanche, le cycle de Brayton, qui utilise un gaz compressible, présente des pertes d'énergie plus importantes en raison des processus de compression et de détente du gaz. La consommation d'énergie par le compresseur dans le cycle de Brayton réduit le rendement global du cycle, le plaçant ainsi en dessous du rendement idéal du cycle de Carnot [44, 45].

Ces résultats confirment l'avantage du cycle de Rankine dans le contexte de la méthanisation et de la production d'électricité à partir du biogaz. L'efficacité supérieure du cycle de Rankine permet une utilisation plus efficace de l'énergie thermique produite par la méthanisation, contribuant ainsi à une production d'électricité plus rentable et durable.

II.5. Taux de production d'électricité :

Pour calculer le taux de production d'électricité il faut connaître la masse volumique du biogaz et elle varie selon sa composition en méthane, dans notre cas pour une estimation approximative $\rho = 0.717 \text{ kg/m}^3$.

Le pouvoir calorifique du méthane est d'environ 55,5 MJ/kg, tandis que celui du CO_2 est négligeable. Ainsi, le potentiel énergétique du biogaz est principalement lié à la quantité de méthane qu'il contient. En termes de production d'électricité, il est courant d'estimer le potentiel énergétique du biogaz en équivalent kWh électrique par mètre cube de biogaz produit [46].

Le pouvoir calorifique du méthane par un mètre cube est calculé comme suite :

$$PCI=55.5*0.717=39.79MJ/m^3.$$

Tableau II.2: utilisation les résultats de l'expérience de la méthanisation dans la simulation du cycle de Rankine

P r o d u c t i o n	Résultats des deux expériences		
	Biogaz	Masse des déchets	440 Kg
		Volume produit	23,898 m ³
	Électrique	Volume du méthane	14,33 m ³
		PCI du méthane	39,79 MJ/m ³
		Énergie calorifique	570,54 MJ
		Rendement du cycle	27,1%
		Énergie Récupérée par le cycle	154,8 MJ
		Énergie électrique	43 kWh

Donc, pour 23,898 m³ de biogaz, nous pouvons récupérer environ 43 kWh d'énergie électrique cela veut dire que pour 1 m³ de biogaz nous pouvons récupérer environs de 1.8 kWh.

L'expérience réalisée [30] a démontré qu'en utilisant 440 kg de déchets dans un digesteur, il a été possible de produire 23.898 m³ de biogaz. Ce biogaz a ensuite été utilisé pour produire de l'électricité, permettant ainsi de récupérer une quantité d'énergie de 570.5371 MJ, ce qui équivaut à environ 43 kWh. Donc pour 1 kg on a produit 98Wh. Ces résultats soulignent l'efficacité du processus de méthanisation dans la conversion des déchets en une source d'énergie utile.

La récupération de 43 kWh d'énergie électrique à partir du biogaz produit démontre le potentiel de cette technologie en tant que source d'énergie renouvelable. Cette quantité d'énergie peut être utilisée pour alimenter divers appareils électriques dans une maison ou dans d'autres installations, contribuant ainsi à réduire la dépendance aux sources d'énergie non renouvelables.

II.6. Conclusion

L'expérimentation réalisée pour le processus de méthanisation des 440 kg de déchets a donné des résultats prometteurs. Nous avons obtenu un volume de biogaz de 23,898 m³, avec une concentration de méthane de 60%. En utilisant un cycle de Rankine avec un rendement de 27,1%, nous avons pu convertir cette énergie en 43 kWh d'électricité.

Ces résultats démontrent l'efficacité du processus de méthanisation pour valoriser les déchets organiques et produire du biogaz. La quantité significative de biogaz obtenue à partir d'une quantité relativement petite de déchets témoigne du potentiel de ce procédé.

De plus, l'utilisation du cycle de Rankine pour convertir le biogaz en électricité a été efficace, avec un rendement de 27,1%. Cela indique que le cycle a réussi à exploiter une partie importante de l'énergie disponible dans le biogaz pour générer de l'électricité. Cependant, ces résultats sont spécifiques aux conditions expérimentales et aux paramètres choisis. Des variations dans les caractéristiques des déchets, les conditions de méthanisation et les paramètres du cycle de Rankine peuvent influencer les performances et les rendements obtenus.

En conclusion, cette partie expérimentale souligne le potentiel de la méthanisation comme solution durable de gestion des déchets organiques, permettant de produire du biogaz riche en méthane. L'utilisation du cycle de Rankine pour la conversion du biogaz en électricité a montré des résultats encourageants, ouvrant la voie à des applications plus larges de cette technologie dans le domaine de l'énergie renouvelable et de la valorisation des déchets.

Conclusion générale

La méthanisation et la cogénération sont des technologies prometteuses qui offrent plusieurs avantages en termes de gestion des déchets organiques, de production d'énergie renouvelable et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. La méthanisation permet de transformer les déchets organiques en biogaz, une source d'énergie propre et renouvelable [47]. La cogénération, quant à elle, utilise ce biogaz pour produire simultanément de l'électricité et de la chaleur, maximisant ainsi l'efficacité énergétique du processus [48].

En combinant la méthanisation et la cogénération, nous pouvons obtenir une solution intégrée et durable pour la gestion des déchets organiques, la production d'énergie et la réduction de notre empreinte carbone. La méthanisation permet de valoriser les déchets organiques, réduisant ainsi leur impact environnemental potentiel, tandis que la cogénération permet d'utiliser efficacement le biogaz produit pour générer de l'électricité et de la chaleur, répondant ainsi aux besoins énergétiques locaux.

Cette approche présente de nombreux avantages économiques, environnementaux et sociaux. Elle contribue à la transition énergétique en favorisant l'utilisation de sources d'énergie renouvelable, réduit la dépendance aux combustibles fossiles et offre des solutions durables pour la gestion des déchets.

Cependant, il est important de noter que la mise en place de ces technologies nécessite une planification minutieuse, des investissements adéquats et une réglementation appropriée. Des études de faisabilité, des analyses technico-économiques et des évaluations environnementales sont essentielles pour évaluer la viabilité et l'impact de tels projets [49].

En conclusion, la méthanisation et la cogénération offrent une solution prometteuse pour la gestion des déchets organiques et la production d'énergie renouvelable [46]. Leur mise en œuvre efficace nécessite une approche intégrée, soutenue par des politiques et des incitations appropriées. En adoptant ces technologies, nous pouvons contribuer à un avenir plus durable sur les plans environnemental, énergétique et socio-économique.

Références

- [1] Li, J., X., Cai, H., & Zhao, X. (2021). Biogas production from organic waste: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110140.
- [2] Kumar, R., Singh, L., & Jain, S. K. (2020). Optimization of cogeneration in biogas plants: A review. *Energy Conversion and Management*, 209, 112651.
- [3] B.D La Farge, "Le Biogaz, Procédé de fermentation méthanique", Edition Masson, 1995, 237p.
- [4] Uwe Gorisch, "La Production de Biogaz", Edition Eugen Ulmer, 2008, p21.
- [5] C. Couturier, S. Berger, I Meiffren. « La digestion anaérobique des boues urbaines, état des lieux, état de l'art ». 2001 SOLAGRO. P6.
- [6] Bernet, N. et Buffière, P. (2008). Caractérisation de la mise en œuvre de la méthanisation. In Moletta, R., *La méthanisation* (chap. 4, p. 87-113). Paris, Éditions Tec & Doc.
- [7] Ostrem, K. (2004). *Greening Waste: Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes*. Mémoire de maîtrise, Columbia University, New York.
- [8] United-Tech (s.d.). Anaerobic Digestion. In United-Tech. BZT Waste Digester, [En ligne]. <http://www.united-tech.com/wd-anaerobicdigestion.html> (Page consultée le 28 février 2010).
- [9] Rapport, J., Zhang, R., Jenkins, B.M., and Williams, R.B. (2008). Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste. In California Natural Resources Agency. Department of Resources Recycling and Recovery. Biochemical Conversion Processes. Anaerobic Digestion, [En Ligne]. <http://www.calrecycle.ca.gov/Publications/Organics/2008011.pdf> (Page consultée le 2 mars 2010).
- [10] Rapport, J., Zhang, R., Jenkins, B.M., and Williams, R.B. (2008). Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste. In California Natural Resources Agency. Department of Resources Recycling and Recovery. Biochemical Conversion Processes. Anaerobic Digestion, [En Ligne].

<http://www.calrecycle.ca.gov/Publications/Organics/2008011.pdf> (Page consultée le 2 mars 2010)

[11] Yolo County (2008). Toward a Twenty-first Century Landfill Yolo County's Accelerated Anaerobic and Aerobic (Controlled Landfill Bioreactor) Composting Projects. In Site du Yolo County, Full-scale bioreactor, [En ligne]. <http://www.yolocounty.org/Index.aspx?page=438> (Page consultée le 2 février 2010).

[12] De La Farge, B. (1995). Le biogaz : procédés de fermentation méthanique. Paris, Masson, 237 p. (Collection Ingénierie de l'environnement).

[13] Camacho, P. et Prévot, C. (2008). Méthanisation des boues. In Moletta, R., La méthanisation (chap. 9, p. 205-233). Paris, Éditions Tec & Doc.

[14] Camacho, P. et Prévot, C. (2008). Méthanisation des boues. In Moletta, R., La méthanisation (chap. 9, p. 205-233). Paris, Éditions Tec & Doc.

[15] Truong, L.V-A. (2004). Purification du biogaz provenant de la digestion anaérobie du lisier de porc. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec.

[16] J.L Bobine, E. Huffer et H. Nifenecker, "L'énergie de demain : «technique environnement économie», édition EDP Sciences, 2005, pp304-305.

[17] S. Igoud, I. Tou, M. Slaim et A. Touzi, " la production de biogaz a partir des déjections animales", Rapport Technique Interne, CDER, 2001.

[18] Alexandre ROCHE, 'Étude théorique sur l'utilisation du biogaz en sortie de traitement d'eau', Roche Technologies, p99 (2021).

[19] Wang, X., Cao, L., Shi, W., & Zhang, Y. (2020). Research on energy-saving technology of biogas cogeneration boiler. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 534, 042046.

[20] Song, Y., Yao, H., & Sun, Y. (2021). Investigation on the Biomass Boiler for Biogas Cogeneration. E3S Web of Conferences, 290, 03013.

[21] Fuji Electric, 'Instrumentation et analyse de gaz pour l'énergie thermique', Innovating Energy Technologie, (2022).

[22] Kumar, A., Kumar, A., & Kumar, P. (2019). Performance analysis of biogas based steam turbine cogeneration system. Renewable Energy, 132, 892-900.

[23] Pandey, K., Kumar, A., & Goyal, M. K. (2020). Energy and exergy analysis of

- biogas-based steam turbine cogeneration system. *Energy Reports*, 6, 500-509.
- [24] Elias De Castro Relva, 'Les applications de la vapeur', TLV Euro Engineering GmbH, (2021).
- [25] Choi, J. Y., Lim, J. S., & Kim, Y. M. (2018). Performance improvement of a biogas-fired combined heat and power system with a compact condenser using air-cooled heat exchanger. *Energy Conversion and Management*, 167, 384-393.
- [26] Pandey, K., Kumar, A., & Goyal, M. K. (2020). Energy and exergy analysis of biogas-based steam turbine cogeneration system. *Energy Reports*, 6, 500-509.
- [27] Zhou, Y., Zhang, L., Yang, X., & Wu, D. (2018). Performance analysis of a biogas-fueled micro gas turbine cogeneration system considering the influence of the pump. *Energy Conversion and Management*, 163, 89-96.
- [28] Chen, Q., Wang, M., Chen, J., & Hu, X. (2021). Optimization of cooling water flow rate of condenser pump in a biogas-fired combined cooling, heating and power system. *Energy*, 223, 120142.
- [29] Bensaad Djihed. (2019). Diagnostic de fuites internes dans une pompe à pistons axiaux.
- [30] S. Igoud, I. Tou, S. Kehal, N. Mansouri et A. Touzi, "Première Approche de la Caractérisation du Biogaz Produit à Partir des Déjections Bovines", *Rev. Energ. Ren.* Vol. 5 (2002)123-128.
- [31] P.H. Suding, "La place du biogaz dans le développement des énergies nouvelles et renouvelables en Afrique", *Le développement du biogaz en Afrique. Séminaire, atelier de travail*, Bujumbura, 1991.
- [32] I. Tou, S. Igoud, et A. Touzi, "Production de biométhane à partir des déjections animales", *Revue des Energies Renouvelables*, N° spécial: Biomasse, production et valorisation, 2001, 103-108.
- [33] Carnot, S. (1824). *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Bachelier.
- [34] Callen, H. B. (1985). *Thermodynamics and an introduction to thermostatistics*. Wiley
- [35] Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2010).

- Fundamentals of engineering thermodynamics. Wiley.
- [36] Thermal Engineering contributors, 'What is Nusselt Number – Definition', Thermal Engineering, <<https://thermal-engineering.org/what-is-nusselt-number-definition/>> [accessed 10 August 2018].
- [37] Y. Cengel ,M. A. Bolés & M. Lacroix , « Thermodynamique , une approche pragmatique » , édition DE BOECK ;2008.
- [38] Thermal Engineering contributors, 'Qu'est-ce qu'un exemple de cycle de Brayton – Problème de solution – Definition', Thermal Engineering, <<https://www.thermal-engineering.org/fr/quest-ce-quun-exemple-de-cycle-de-brayton-probleme-de-solution-definition/>> [accessed 05 May 2023].
- [39] Saravanamuttoo, H. I. H., Rogers, G. F. C., & Cohen, H. (2017). Gas Turbine Theory. Pearson.
- [40] Dixon, S. L., & Hall, C. A. (2013). Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery. Academic Press.
- [41] Heywood, J. B. (1988). Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill.
- [42] Laissaoui M, Amélioration des performances d'une installation de turbine à gaz par refroidissement de l'air d'admission, PFE de Magister, Université m'hamed bougara Boumerdes, 2012.
- [43] Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2014). Thermodynamics: An Engineering Approach. McGraw-Hill Education.
- [44] Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2005). Introduction to chemical engineering thermodynamics. McGraw-Hill Education.
- [45] Bejan, A., Tsatsaronis, G., & Moran, M. (1996). Thermal design and optimization. Wiley-Interscience.
- [46] R. Le Boulch et al., "Biogas production and utilization: from fuel to biorefinery", Advances in Bioenergy, vol. 1, no. 1, pp. 1-30, 2018.
- [47] Buffière, P., & Bernet, N. (2008). Anaerobic digestion of organic solid wastes. In Encyclopedia of Ecology (pp. 178-187). Elsevier.

- [48] Khanal, S. K. (2010). *Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and applications*. John Wiley & Sons.
- [49] Müller, J. A., & Krümpel, A. (2017). Biogas production from agricultural biomass: a review on factors influencing anaerobic digestion and implications for sustainable biogas production. *Sustainability*, 9(11), 2103.

Annexe

<p>Partenaires Stratégiques</p> <p>Les fournisseurs de matériaux pour la construction du prototype</p> <p>Les fournisseurs de la technologie de méthanisation et de production d'énergie</p> <p>Les distributeurs pour la commercialisation du produit</p> <p>Les entreprises spécialisées dans la gestion de déchets organiques</p>	<p>Activités clés</p> <p>Recherche et développement pour améliorer le produit.</p> <p>Fabrication et production de prototypes.</p> <p>Marketing et publicité pour promouvoir le produit.</p> <p>Évaluer les performances du système et apporter des améliorations si nécessaire</p> <p>Assurer la conformité réglementaire avec les lois environnementales et énergétiques</p> <p>Former et sensibiliser les clients potentiels sur l'utilisation et l'entretien du système.</p>	<p>Propositions de valeur</p> <p>Une solution innovante pour la production d'électricité durable, respectueuse de l'environnement, économe en énergie et adaptée aux besoins des smart houses et d'autres applications similaires.</p> <p>Une source d'énergie renouvelable et autonome pour la maison ou l'entreprise.</p> <p>La possibilité de gérer les déchets organiques de manière durable et écologique.</p> <p>Une réduction des coûts énergétiques pour les clients.</p>	<p>Relation client</p> <p>Éduquer les clients potentiels sur les avantages de la méthanisation et de la production d'électricité à partir de déchets organiques, ainsi que sur la manière de mettre en place et de gérer le système.</p> <p>Offrir un service de maintenance et de support client pour garantir le bon fonctionnement continu du système et la satisfaction du client.</p>	<p>Segments de clientèle</p> <p>Ménages et propriétaires de maisons écologiques souhaitant produire de l'énergie renouvelable et réduire leur empreinte carbone.</p> <p>Entreprises souhaitant produire leur propre énergie renouvelable et réduire leurs coûts énergétiques.</p>
	<p>Ressources clés</p> <p>Personnel qualifié pour la fabrication, l'assemblage et l'installation du produit.</p> <p>Matériaux et équipements pour la fabrication du produit.</p> <p>Fonds pour la recherche et le développement.</p>		<p>Canaux de distribution</p> <p>Vente en ligne via un site Web.</p> <p>Vente en personne à des salons et des événements liés à l'environnement et à l'énergie renouvelable.</p> <p>Vente en gros à des installateurs d'énergie renouvelable.</p>	
<p>Structure des coûts</p> <p>Coûts de développement du prototype / Coûts de production en série /</p> <p>Coûts de marketing et de distribution / Coûts de maintenance et de réparation</p> <p>Frais de bactéries microbiennes</p>		<p>Flux de revenus</p> <p>Vente directe de produits.</p> <p>Vente en gros à des installateurs d'énergie renouvelable.</p>		