

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. M. OULHADJ - Bouira
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés



Mémoire

Réalisé par

BOUSSAID Nadjat

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

**Etude et dimensionnement d'une serre tropicale
chauffée à l'aide d'un système de biogaz produit
par digestion anaérobie de déchets organiques**

Soutenu le 18/06/2026

Devant le jury :

M ^{me} . ZAABAR	Aida	Professeur	UAMO	Présidente
M ^{me} . ZIANI	Salima	Professeur	UAMO	Examinatrice
M. SAHNOUNE	Mohamed	MCA	UAMO	Encadrant

Année Universitaire : 2025/2026



نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) بوسعيد نجاة الصفة: طالب (ة)

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 4.00.95.07.51 والصادرة بتاريخ 2022/03/11

المسجل(ة) // بكلية العلوم التطبيقية قسم هندسة الطرائق

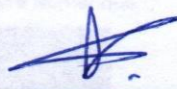
والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: Etude et dimensionnement d'une Seme tropicale chauffée

à l'aide d'un système de biogaz produit par digestion anaérobie de déchets ménagers

تحت إشراف الأستاذ(ة): مسنون محمد
أصرح بشرفي اني ألتم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة في
انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2026/06/10

 توقيع المعني (ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

15,7 %

النسبة:


الامضاء: الطرايق
رئيس قسم هندسة الطرائق
الطرايق
كلية العلوم التطبيقية



Faculté SNV Université Bouira



CERTIFICAT D'ANALYSE

NOM DU DOCUMENT

PFE BOUSSAID_GC.pdf

SOUIS PAR

Département Génie des Procédés FSSA Enseignant

TYPE D'ANALYSE

Usage universitaire

DATE DE SOUMISSION

2026-06-08

ÉTUDIANT CONCERNÉ

BOUSSAID Nadjet

15.7 %

TAUX GLOBAL DE SIMILARITÉ

● Similarité Forte (15.7%) ● Texte Original (84.3)

SOURCES IDENTIFIÉES

192

Internet

179

Base Detectia

13

Dépôt Institutionnel

0

CITATIONS & RÉFÉRENCES

NONE%

Juridique (Lois)

0.0%

Religieux (Textes sacrés)

0%

Autres

0.0%

AVIS LÉGAL

Ce document est un rapport technique généré automatiquement par la plateforme Detectia. Il ne constitue pas à lui seul une preuve de plagiat. L'interprétation des résultats incombe aux instances académiques compétentes, conformément à l'arrêté N° 1082 du 27 Décembre 2020 fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Signature Numérique



REF j3rsub-337329

Cachet et Signature



Remerciements

Au terme de ce travail, il m'est agréable d'exprimer ma sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements les plus chaleureux à mon encadrant, **Monsieur Sahnoune**, pour son accompagnement précieux, sa disponibilité et son soutien indéfectible jusqu'à la dernière minute. Ses conseils avisés et sa rigueur scientifique ont été une source d'inspiration tout au long de ce travail.

Je remercie également **Madame Zaabar**, présidente du jury, pour l'honneur qu'elle m'a accordé en acceptant de présider cette soutenance, ainsi que **Madame Ziani**, examinatrice, pour l'intérêt qu'elle a porté à ce travail et le temps consacré à son évaluation.

Mes remerciements vont aussi à toute **l'équipe du laboratoire Génie des Procédés**, et tout particulièrement à **Madame Bouras**, pour son aide précieuse, sa générosité et sa bienveillance tout au long de l'expérimentation.

Enfin, je remercie chaleureusement toutes mes camarades pour leur soutien moral, leur solidarité et les moments partagés durant cette belle aventure académique.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail...

À moi-même, Pour chaque nuit blanche, chaque effort fourni, chaque moment de doute surmonté et chaque larme essuyée. Tu as tenu bon jusqu'au bout, sois-en fière.

À mon père, Toi qui t'es fatigué pour moi depuis mes premiers pas à l'école primaire jusqu'à ce jour. Aucun mot ne pourra exprimer ce que tu as sacrifié pour me voir réussir. Ce travail est le fruit de ta sueur.

À ma mère, Pour chaque dua'a que tu as fait en ma faveur, pour tes précieux conseils et ton amour inconditionnel qui m'ont guidée et protégée tout au long de mon chemin.

À mes sœurs Inès et Lilia, Pour votre présence, votre soutien et votre amour au quotidien.

À mon frère Kamel, Pour ton encouragement et ta fierté qui m'ont donné la force d'avancer.

À mes chères amies Sabrina, Dounia, Malak et Meriem, Pour les rires partagés, les moments difficiles surmontés ensemble et cette belle amitié qui restera gravée dans mon cœur.

Que Dieu vous garde tous et vous comble de bonheur, de santé et de réussite.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Bases théoriques du système étudié	
I.1. Culture des fruits tropicaux	2
I.1.1. Conditions de la culture	2
I.1.1.1. Ensoleillement	3
I.1.1.2. Sols	3
I.1.1.3. Précipitation.....	3
I.1.1.4. Vents	3
I.1.1.5. Température et humidité	4
I.1.2. Contraintes de la culture dans les pays non tropicaux.....	4
I.1.2.1. Contraintes climatiques	4
I.1.2.2. Sols peu adaptés	4
I.1.2.3. Coûts élevés.....	4
I.2. Serres agricoles.....	5
I.2.1. Intérêt de la serre agricole	5
I.2.2. Types des serres agricoles	5
I.2.2.1. Serre tunnel.....	5
I.2.2.2. Serre adossée	6
I.2.2.3. Serre jardin (autoportée)	6
I.3. Serre intelligente.....	7
I.3.1. Unité de contrôle.....	7
I.3.2. Capteurs	8
I.3.2.1. Capteur de température.....	8
I.3.2.2. Capteur d'humidité	8
I.3.2.3. Capteur d'humidité de sol	8
I.3.2.4. Capteur de CO ₂	9
I.3.2.5. Capteur de lumière	9

I.3.3. Fonctions du système	9
I.3.3.1. Fonctions liées à l'humidité	9
I.3.3.1.1. Irrigation automatique	9
I.3.3.1.2. Humidification.....	10
I.3.3.2. Fonctions liées à la lumière	11
I.3.3.2.1. Éclairage artificiel.....	11
I.3.3.2.2. Ombrage	11
I.3.3.3. Fonctions liées à la température	12
I.3.3.3.1. Ventilation	12
I.3.3.3.2. Chauffage	12
I.4. Biogaz : source d'énergie renouvelable.....	14
I.4.1. Composition du biogaz	15
I.4.1.1. Le méthane	15
I.4.1.2. Dioxyde de carbone CO ₂	15
I.4.1.3. Vapeur d'eau.....	16
I.4.1.4. Sulfure d'hydrogène H ₂ S	16
I.4.2. Processus de la méthanisation	17
I.4.2.1. Phases de processus	18
I.4.2.1.1. Hydrolyse	18
I.4.2.1.2. Acidogenèse	18
I.4.2.1.3. Acétogenèse.....	18
I.4.2.1.4. Méthanogenèse	18
I.4.2.2. Conditions physico-chimiques	19
I.4.2.2.1. Conditions de température.....	19
I.4.2.2.2. Conditions de milieu physico-chimique.....	19
I.4.3. Épuration du biogaz.....	20
I.4.4. Valorisation énergétique du biogaz	21
I.4.4.1. La cogénération	21
I.4.4.2. Production d'électricité	22
I.4.4.3. Valorisation thermique	23
I.4.4.4. Valorisation en biométhane	24

Chapitre II : Matériels et méthodes

II.1. Production du biogaz	25
II.1.1. Substrats et inoculum	25
II.1.1.1. Substrat	25
II.1.1.1.1. Nature de substrat.....	25
II.1.1.1.2. Caractéristiques physico-chimiques du substrat	26
II.1.1.2. Inoculum	28
II.1.1.3. Ratio substrat/inoculum.....	29
II.1.2. Dispositif expérimental	29
II.1.2.1. Type de réacteur	29
II.1.2.3. Équipement pour agitation, contrôle du pH et de la température	31
II.1.2.3.1. Agitation.....	31
II.1.2.3.2. pH.....	31
II.1.2.3.3. Température	31
II.1.3. Protocole de méthanisation	31
II.1.3.1. Étapes de préparation	31
II.1.3.2. Conditions opératoires.....	32
II.2. Traitement et valorisation du biogaz	33
II.2.1. Volume du biogaz	33
II.2.2. Pouvoir calorifique du biogaz	33
II.2.3. Energie produite par un biogaz	34
II.3. Modélisation thermique de la serre	34
II.3.1. Hypothèses de modélisation	35
II.3.2. Matériau de couverture de la serre	35
II.3.3. Modèle thermique utilisé	36
II.3.4. Besoins thermiques de la serre	36

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Caractéristiques initiales du substrat et de l'inoculum	37
III.2. Évolution du pH au cours du temps	38

III.3. Suivi de la production du biogaz	39
III.3.1. Cinétique de production cumulée de biogaz	39
III.3.2. Production journalière du biogaz	40
III.4. Évolution du pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la teneur en CH₄	41
III.5. Évaluation du potentiel énergétique du biogaz.....	42
III.6. Estimation des besoins thermiques en fonction des matériaux	43
III.7. Analyse de l'adéquation entre le potentiel énergétique du biogaz et les besoins thermiques de la serre.....	44
Conclusion générale & perspectives.....	45
Références bibliographiques.....	48

Liste des figures

Chapitre I – Bases théoriques du système étudié

Figure I.1 : Variété de fruits tropicaux	2
Figure I.2 : Serre tunnel.....	6
Figure I.3 : Serre adossée	6
Figure I.4 : Serre jardin	7
Figure I.5 : Système d'irrigation automatique.....	10
Figure I.6 : Humidification par système de brumisation	10
Figure 7.1 : Des ampoules pour éclairer la serre.....	11
Figure I.8 : Système d'ombrage pour une serre	12
Figure I.9 : Des panneaux solaires sur la serre	14
Figure I.10 : Unité de stockage de l'usine de biogaz de Güssing (Burgenland, Autriche)	14
Figure I.11 : Structure de la molécule de méthane	15
Figure I.12 : Structure du dioxyde de carbone	16
Figure I.13 : Structure de sulfure d'hydrogène	16
Figure I.14 : Schéma de la méthanisation.....	17
Figure I.15 : Schéma de procédé d'une installation de traitement des gaz par une amine.....	20
Figure I.16 : Procédé de séparation membranaire	21
Figure I.17 : Les voies de valorisation du biogaz	21
Figure I.18 : Schéma de la cogénération.....	22
Figure I.19 : Évolution de la production d'électricité à partir de biogaz dans l'UE et objectifs	23
Figure I.20 : Évolution de la production de chaleur à partir du biogaz et objectifs dans l'UE23	
Figure I.21 : Utilisation du biométhane dans les transports dans les pays européens.....	24

Chapitre II – Matériels et méthodes

Figure II.1 : Épluchures de pommes de terre utilisées	26
Figure II.2 : Épluchures de pommes de terre broyées	26

Figure II.3 : pH-mètre utilisé.....	28
Figure II.4 : Fumier de vache utilisé	28
Figure II.5 : Montage expérimental utilisé	29
Figure II.6 : Le système de collecte du biogaz	30
Figure II.7 : Le mélange final substrat-inoculum	32

Chapitre III – Résultats et discussions

Figure III.1 : Évolution du pH au cours du temps.....	38
Figure III.2 : Cinétique de production cumulée de biogaz.....	39
Figure III.3 : Production journalière du biogaz	41
Figure III.4 : Évolution du pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la teneur en CH ₄ ...	41

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Caractéristiques initiales du substrat et de l'inoculum.....	37
Tableau III.2 : Évaluation du potentiel énergétique du biogaz	42
Tableau III.3 : Estimation des besoins thermiques en fonction des matériaux	43

Liste des abréviations

CH₄	: Méthane
CO₂	: Dioxyde de carbone
H₂S	: Sulfure d'hydrogène
MS	: Matière sèche
MV	: Matière volatile
PCI	: Pouvoir calorifique inférieur
pH	: Potentiel hydrogène
IoT	: Internet des objets (Internet of Things)
LED	: Diode électroluminescente (Light Emitting Diode)
IR	: Infrarouge
UE	: Union Européenne

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale

Face aux défis croissants liés au changement climatique et à la sécurité alimentaire, le développement de pratiques agricoles durables s'impose comme une nécessité. En Algérie, les contraintes climatiques constituent un frein à la culture de certaines espèces végétales, en particulier les fruits tropicaux, dont les exigences élevées en température imposent des conditions de culture spécifiques et contrôlées. Dans ce contexte, le recours aux serres agricoles apparaît comme une solution pertinente pour recréer un microclimat favorable à leur développement. Néanmoins, ces systèmes nécessitent un apport énergétique important, notamment pour le chauffage et la régulation des paramètres climatiques¹.

Par ailleurs, la gestion des déchets organiques représente un enjeu environnemental majeur en raison de leur accumulation et de leur impact potentiel sur les écosystèmes. Leur valorisation par méthanisation constitue une alternative durable, permettant de produire du biogaz, une source d'énergie renouvelable exploitable. L'intégration de ce procédé dans les systèmes agricoles, en particulier pour le chauffage des serres, pourrait ainsi contribuer à une meilleure autonomie énergétique tout en réduisant l'empreinte environnementale. Dans cette optique, il apparaît pertinent d'évaluer l'adéquation entre le potentiel de production de biogaz issu de déchets organiques et les besoins thermiques d'une serre destinée à la culture de fruits tropicaux en Algérie².

Le présent mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique abordant, dans un premier temps, la culture des fruits tropicaux ainsi que les conditions nécessaires à leur développement, puis les serres agricoles, leurs types et l'émergence des serres intelligentes. Il traite ensuite des notions relatives au biogaz et aux principes du processus de méthanisation. Le deuxième chapitre décrit le matériel utilisé ainsi que la méthodologie expérimentale mise en œuvre pour la production et le suivi du biogaz. Enfin, le troisième chapitre présente les résultats obtenus et leur discussion en relation avec les objectifs de l'étude.

CHAPITRE I : Bases **théoriques du système étudié**

Ce chapitre aborde la culture des fruits tropicaux, les serres agricoles et serres intelligentes, ainsi que de la production de biogaz à partir des déchets organiques, en mettant en lumière les techniques modernes qui permettent d'améliorer la production tout en valorisant les ressources de manière durable.

I.1. Culture des fruits tropicaux

Un fruit tropical est un fruit qui pousse naturellement dans les régions chaudes et humides situées généralement près de l'équateur³. Dans les pays où ces conditions climatiques ne sont pas présentes, il est souvent désigné sous le terme « fruit exotique ». Ces fruits se distinguent par leurs saveurs particulières, leur richesse en vitamines et minéraux, et leur aspect souvent coloré et original⁴. Des exemples courants incluent la mangue, la papaye, l'ananas ou le fruit de la passion.

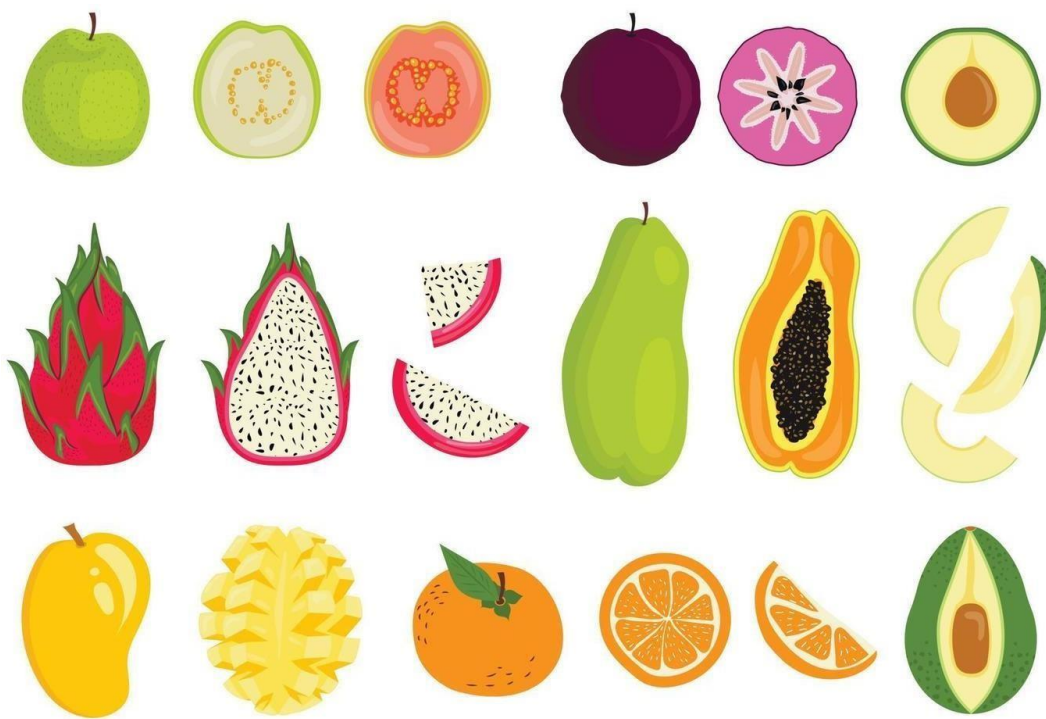


Figure I.1 : Variété de fruits tropicaux.⁵

I.1.1. Conditions de la culture

La culture des fruits tropicaux prospère dans des milieux où les conditions naturelles offrent un contexte propice à leur développement. Les régions tropicales et équatoriales, grâce

à leur climat chaud et humide ainsi qu'à la fertilité de leurs sols, constituent un environnement optimal pour ces productions. La constance de ces facteurs favorise l'épanouissement des plantes et une production fruitière continue tout au long de l'année, ce qui confère à ces zones un statut privilégié pour l'agriculture tropicale ^{3 5}.

I.1.1.1. Ensoleillement

L'ensoleillement dans les zones tropicales humides est très important tout au long de l'année. Ces régions reçoivent le soleil presque perpendiculairement deux fois par an, et le soleil se trouve élevé dans le ciel la plupart du temps, ce qui signifie un fort apport solaire quotidien sans véritable hiver. Ce haut niveau d'ensoleillement favorise la chaleur constante dans ces zones ⁵.

I.1.1.2. Sols

Pour la culture de fruits tropicaux, un sol bien drainé, léger, avec une bonne capacité à retenir l'humidité, est idéal. La plupart des fruits tropicaux requièrent un sol riche en matière organique, telles que le compost mûr (issu de déchets végétaux et animaux), le fumier bien décomposé (bovin, ovin ou de volaille) et les résidus de cultures broyés (pailles, feuilles, tiges), et un entretien par fertilisation organique ou chimique adaptée pour compenser la faible teneur naturelle en éléments nutritifs ^{3 6}.

I.1.1.3. Précipitation

Les zones tropicales humides se caractérisent par des précipitations abondantes et régulières tout au long de l'année, souvent supérieures à 2000 mm annuels, avec des maxima dans les régions équatoriales où la convergence des alizés humides favorise des pluies quasi permanentes ⁶.

I.1.1.4. Vents

Les vents dans les zones tropicales humides sont généralement faibles à modérés dans les parties proches de l'équateur en raison de la zone de convergence intertropicale où les vents s'annulent souvent, créant une atmosphère plutôt calme. Ces vents faibles favorisent l'humidité élevée et la formation fréquente de nuages et de précipitations ⁶.

I.1.1.5. Température et humidité

Dans les zones tropicales humides, la température reste élevée tout au long de l'année, avec des moyennes généralement comprises entre 20 et 30 °C. Ces régions, proches de l'équateur, reçoivent une lumière solaire intense et constante, ce qui maintient des températures élevées et une forte évaporation contribuant à une humidité élevée. L'humidité relative dans ces zones dépasse fréquemment 80%, créant une atmosphère souvent moite ⁵.

I.1.2. Contraintes de la culture dans les pays non tropicaux

I.1.2.1. Contraintes climatiques

Dans les pays non tropicaux, la culture des fruits tropicaux est largement limitée par le climat. Ces plantes ont besoin de températures élevées et stables, or les hivers froids et les gels fréquents peuvent endommager, voire tuer les arbres. La lumière naturelle y est souvent insuffisante, surtout en hiver, ce qui ralentit la croissance et réduit la production de fruits. L'humidité peut aussi poser problème : trop faible, elle assèche les plantes, trop variable, elle favorise les maladies. Enfin, la saison de croissance est généralement courte, ce qui empêche ces fruits de mûrir correctement. Dans l'ensemble, le climat impose donc la principale barrière à leur culture en dehors des zones tropicales ⁵.

I.1.2.2. Sols peu adaptés

Les sols des zones non tropicales représentent un autre frein à la culture des fruits tropicaux. Ces plantes préfèrent des sols profonds, bien drainés et riches en matières organiques, alors que dans de nombreuses régions tempérées, les sols sont souvent plus argileux, compacts ou pauvres en nutriments. Un mauvais drainage peut provoquer la pourriture des racines, et un sol trop acide ou trop pauvre limite l'absorption des éléments essentiels. Par conséquent, même si le climat était favorable, la nature du sol peut sérieusement réduire la croissance et la productivité des arbres tropicaux ⁵.

I.1.2.3. Coûts élevés

Les coûts constituent une contrainte importante dans les régions non tropicales. Produire des fruits tropicaux localement exige des investissements élevés : serres chauffées pour maintenir des températures adaptées, systèmes d'irrigation performants, protections contre le gel et apports réguliers en fertilisants pour compenser des sols moins favorables. À cela s'ajoutent les dépenses liées à l'énergie, à l'entretien et au renouvellement des plants sensibles

au froid. Dans la majorité des cas, le coût total de production dépasse largement celui de l'importation, ce qui rend souvent plus économique d'acheter ces fruits depuis les régions où ils poussent naturellement que de les cultiver sur place ⁵.

I.2. Serres agricoles

Une serre est une structure généralement fermée utilisée pour la production agricole. Elle vise à soustraire les cultures produites pour l'alimentation ou le contrôle des conditions climatiques afin de mieux gérer la demande végétale et d'accélérer sa croissance ou sa production en toute saison. La culture en serre est appelée serriculture ⁶.

I.2.1. Intérêt de la serre agricole

La serre de culture offre la possibilité de s'affranchir des contraintes climatiques extérieures. Elle est conçue pour recréer un environnement donné. Elle permet le chauffage de l'air et des racines, le contrôle d'irrigation et de la fertilisation, l'enrichissement en CO₂ et le contrôle de l'humidité. Elle joue un rôle économique en présentant des produits sur le marché en hors saison ⁷.

La serre permet ainsi d'obtenir une production végétale dans des conditions meilleures que celles existantes naturellement et ce par une meilleure qualité du produit. Pour aboutir à ces résultats, il faut répondre minutieusement aux exigences de la culture pour les différents facteurs intervenant dans sa croissance et son développement, ceci suppose la connaissance des interactions entre ces divers paramètres ⁸.

I.2.2. Types des serres agricoles

I.2.2.1. Serre tunnel

C'est une serre de forme allongée avec un toit arrondi. Elle est souvent utilisée pour la culture de plantes en rangées, telles que les fraises ou les tomates ⁵.



Figure I.2 : Serre tunnel.⁹

I.2.2.2. Serre adossée

C'est une serre qui est construite contre un mur. Elle est souvent utilisée pour les jardins urbains où l'espace est limité⁵.



Figure I.3 : Serre adossée.¹⁰

I.2.2.3. Serre jardin (autoportée)

Ce type est destiné à la plantation et à la protection des plantes en hiver, et aussi à la récolte annuelle⁵.



Figure I.4 : Serre jardin. ¹¹

I.3. Serre intelligente

Une serre intelligente est une serre qui utilise un réseau de capteurs et d'actionneurs pour maintenir automatiquement des conditions optimales de culture. Des sondes mesurent en continu la température, l'humidité de l'air, l'hygrométrie du sol, la luminosité et parfois la concentration de CO₂. Lorsque la température descend sous un seuil défini, le système active le chauffage ; si elle dépasse la limite haute, la ventilation se déclenche automatiquement. L'irrigation est gérée par des capteurs d'humidité du substrat qui commandent l'ouverture des électrovannes afin de fournir juste la quantité d'eau nécessaire ⁹.

L'humidification s'active quand l'air devient trop sec, tandis que l'ombrage motorisé se déploie automatiquement lorsque l'intensité lumineuse devient excessive, protégeant ainsi les plantes du stress thermique. L'éclairage horticole LED prend le relais en cas de luminosité insuffisante pour assurer un photopériodisme stable. L'ensemble est coordonné par une unité de contrôle qui ajuste en permanence chaque fonction pour maintenir un environnement précis et stable, souvent consultable ou paramétrable à distance via une interface numérique ¹⁰.

I.3.1. Unité de contrôle

Une unité de contrôle est un dispositif qui reçoit des informations, prend des décisions et envoie des commandes aux actionneurs. Elle est généralement composée de plusieurs éléments ¹⁰ :

- **Processeur/microcontrôleur** : le cerveau, qui exécute le programme et prend les décisions.
- **Alimentation électrique** : pour fournir l'énergie nécessaire à l'unité et aux capteurs/actionneurs.
- **Entrées** : pour recevoir des données des capteurs (température, humidité, luminosité...).
- **Sorties** : pour contrôler des actionneurs (pompes, ventilateurs, chauffages...).
- **Interfaces de communication** : pour connecter l'unité à un ordinateur, réseau, ou interface utilisateur.

I.3.2. Capteurs

Un capteur est un dispositif permettant d'interpréter l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur exploitable, telle qu'une tension électrique, une hauteur de mercure, un courant électrique ou la déviation d'une aiguille ¹¹.

I.3.2.1. Capteur de température

Un capteur de température constitue un dispositif capable de percevoir les fluctuations thermiques de l'air ou de l'eau et de les convertir en un signal électrique destiné à un système électronique. Ce signal provoque alors des ajustements au sein de ce système de régulation thermique ¹¹.

I.3.2.2. Capteur d'humidité

Un capteur d'humidité est un appareil dont la réponse varie selon le taux d'humidité de l'air ambiant auquel son élément sensible est exposé, et qui produit un signal électrique exploitable par un instrument de mesure (tel qu'un hygromètre), un affichage ou un système automatisé ¹¹.

I.3.2.3. Capteur d'humidité de sol

Un capteur d'humidité du sol est un instrument conçu pour évaluer la quantité d'eau contenue dans le sol. Il détermine indirectement le taux d'humidité en exploitant les propriétés électriques du sol, telles que la résistance ou la capacité électrique entre deux électrodes. Plus le sol est saturé en eau, plus la conductivité ou la capacité électrique mesurée est importante, ce qui permet d'estimer la teneur en eau présente dans le sol ¹¹.

I.3.2.4. Capteur de CO₂

Un capteur de CO₂ constitue un instrument destiné à évaluer la concentration de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'air environnant, généralement mesurée en parties par million (ppm). Cet appareil joue un rôle crucial dans le contrôle de la qualité de l'air intérieur, notamment dans les espaces confinés tels que les serres connectées, les locaux professionnels ou les salles de classe, en permettant de signaler une accumulation excessive liée à la respiration humaine ou à des phénomènes biologiques ¹¹.

I.3.2.5. Capteur de lumière

Un capteur de lumière constitue un dispositif électronique capable de mesurer le niveau d'éclairement ambiant. Il transforme la lumière incidente en un signal électrique dont l'intensité est directement liée à la quantité de lumière perçue ¹¹.

I.3.3. Fonctions du système

Les systèmes d'une serre rassemblent l'ensemble des dispositifs techniques qui permettent de créer et de maintenir un environnement optimal pour la croissance des plantes. Ils régulent la température, l'humidité, la lumière et l'apport en eau afin de compenser les variations climatiques extérieures. Grâce à ces fonctions essentielles, la serre devient un espace contrôlé où les conditions de culture peuvent être ajustées avec précision pour améliorer la qualité, la productivité et la continuité des productions végétales ¹⁰.

I.3.3.1. Fonctions liées à l'humidité**I.3.3.1.1. Irrigation automatique**

Un système d'irrigation automatisé est conçu pour contrôler la distribution de l'eau aux plantes avec une intervention manuelle minimale. En utilisant la technologie internet des objets (IoT), il intègre des capteurs pour surveiller l'humidité du sol et les conditions météorologiques, en ajustant l'approvisionnement en eau en conséquence. Ce système améliore l'efficacité en fournissant la bonne quantité d'eau au bon moment. Les systèmes d'irrigation automatisés ne fonctionnent pas comme les systèmes d'irrigation par aspersion classiques en raison de leur précision et de leurs capacités d'automatisation, ce qui les rend essentiels dans l'agriculture moderne pour conserver l'eau et augmenter le rendement ¹⁴.



Figure I.5 : Système d'irrigation automatique. ¹⁴

I.3.3.1.2. Humidification

L'humidification est le processus consistant à augmenter la teneur en eau, sous forme de vapeur, dans l'air ou dans un milieu non saturé, ce qui revient à rendre l'air plus humide. Elle peut être réalisée par divers procédés tels que l'injection de vapeur, la pulvérisation d'eau fine, l'atomisation ou l'évaporation. Cette action modifie directement les propriétés de l'air, notamment son hygrométrie. Dans une serre, maintenir un bon niveau d'humidité contribue à favoriser la germination, soutenir une croissance saine des plantes et limiter les stress liés à un air trop sec ¹⁰.

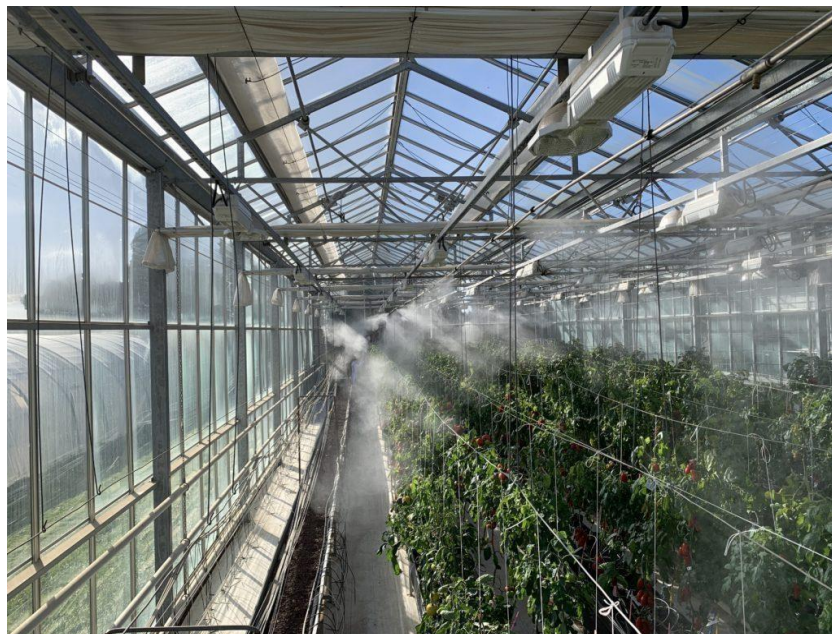


Figure I.6 : Humidification par système de brumisation. ¹⁶

I.3.3.2. Fonctions liées à la lumière

I.3.3.2.1. Eclairage artificiel

L'éclairage artificiel consiste à utiliser des sources lumineuses produites par l'homme, telles que des lampes, des LED ou des lampes horticoles, pour fournir de la lumière lorsque l'éclairage naturel est insuffisant ou inadapté. Dans les serres et autres cultures sous abri, il peut compléter la lumière du soleil ou la remplacer totalement afin de répondre aux besoins lumineux des plantes. Son rôle est essentiel pour assurer la photosynthèse lorsque l'ensoleillement est limité, par exemple en hiver, lors de journées courtes, dans des régions peu ensoleillées ou sous des toitures opaques, mais aussi pour contrôler précisément les conditions de croissance. De plus, l'éclairage artificiel permet de prolonger la durée d'éclairement, appelée photopériode, ce qui peut accélérer la croissance, déclencher ou réguler la floraison et améliorer les rendements des cultures ¹⁴.



Figure I.7 : Des ampoules pour éclairer la serre. ¹⁴

I.3.3.2.2. Ombrage

Un système d'ombrage souvent constitué d'un filet d'ombre installé sur ou autour de la serre permet de réduire l'intensité de la lumière solaire et de limiter l'entrée de chaleur lorsqu'un ensoleillement est trop fort. Ce voile peut bloquer une partie variable de la lumière (souvent entre 30 % et 80 %, selon le tissu choisi), ce qui permet de baisser la température intérieure, de

protéger les plantes contre le stress thermique ou les brûlures provoquées par un soleil direct, et d'éviter une montée excessive de chaleur ¹⁵.



Figure I.8 : Système d'ombrage pour une serre. ¹⁵

En filtrant la lumière, l'ombre diffuse garantit un éclairage plus homogène, ce qui peut favoriser une croissance plus uniforme des plantes, tout en préservant la photosynthèse quand l'ombrage n'est pas excessif. En outre, en réduisant la chaleur et l'évaporation, un bon ombrage aide à conserver l'humidité du sol et de l'air, ce qui peut diminuer la fréquence des arrosages dans certaines conditions.

I.3.3.3. Fonctions liées à la température

I.3.3.3.1. Ventilation

La ventilation dans une serre consiste à assurer un renouvellement régulier de l'air pour réguler la température, l'humidité et la concentration de gaz à l'intérieur. Elle permet d'évacuer l'air chaud et humide, d'apporter de l'air frais et oxygéné, et de limiter le développement de maladies fongiques ou bactériennes liées à l'excès d'humidité. Une bonne ventilation favorise également la circulation de l'air autour des plantes, ce qui améliore la photosynthèse et renforce les tissus végétaux. Elle peut être naturelle, par des ouvertures et des fenêtres qui exploitent les différences de pression et de température, ou forcée, grâce à des ventilateurs et des systèmes mécaniques pour contrôler plus précisément les conditions climatiques de la serre ¹⁶.

I.3.3.3.2. Chauffage

Le chauffage dans une serre est utilisé pour maintenir la température intérieure à un niveau optimal pour la croissance des plantes, notamment pendant les périodes froides ou les

nuits d'hiver. Un contrôle thermique approprié permet de favoriser la germination, la croissance végétative, la floraison et le rendement des cultures. Le chauffage peut être assuré par différents systèmes : chauffages à air chaud, à eau chaude (radiateurs ou tuyaux), électriques, ou même par le sol (plancher chauffant). L'objectif est d'éviter le stress thermique causé par le froid, de maintenir un microclimat stable et d'assurer une production continue, surtout dans les régions où les températures extérieures sont basses ou très variables. Parmi les types de chauffage ¹⁶ :

- **Chauffage de l'air :**

Un générateur d'air chaud brûle du combustible et évacue la chaleur avec l'air de la serre à l'aide d'un brûleur, selon le modèle. La chaleur est ensuite évacuée dans la serre à l'aide d'un ventilateur.

- **Chauffage par le sol :**

Le chauffage par le sol est un système de chauffage qui exploite la capacité de conduction thermique du sol. Il se compose d'un réseau de tuyaux posés en mailles le long du sol de la serre. Ces tuyaux sont remplis d'eau chaude qui agit comme un fluide thermique, et la chaleur rayonne des tuyaux vers le haut, chauffant à la fois le sol, les racines des plantes et l'air de la serre.

- **Chauffage à l'énergie solaire**

Les serres peuvent également être complétées par des panneaux solaires qui captent et stockent l'énergie solaire, laquelle est ensuite convertie en chaleur pour les chauffer.

- **Chauffage à la biomasse**

Le chauffage à la biomasse est un système qui utilise des matières organiques, telles que des déchets agricoles, des copeaux de bois ou des granulés, pour produire de la chaleur. Ce processus implique une combustion contrôlée de la biomasse, libérant de la chaleur qui est acheminée par un système de distribution dans la serre.



Figure I.9 : Des panneaux solaires sur la serre. ¹⁶

I.4. Biogaz : source d'énergie renouvelable

Le biogaz est un gaz issu de la fermentation de matières organiques. Il s'agit d'un gaz combustible composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone. Ce gaz peut être utilisé directement sur le site de production, via un procédé de cogénération, pour générer à la fois de la chaleur et de l'électricité. Il peut également être épuré pour produire du biométhane, lequel est comparable au gaz naturel et peut servir de carburant pour véhicules ou être injecté dans le réseau de distribution de gaz naturel ¹⁸.



Figure I.10 : Unité de stockage de l'usine de biogaz de Güssing (Burgenland, Autriche). ²⁰

La méthanisation survient naturellement dans les zones humides telles que les marais (produisant le gaz des marais), les rizières, les grands lacs de retenue ou les barrages

hydroélectriques situés sous les tropiques, ainsi que dans les décharges renfermant des déchets ou des matières organiques d'origine animale, végétale, fongique ou bactérienne. Il est également possible de l'induire de manière artificielle au sein de digesteurs, notamment pour le traitement des boues d'épuration et des déchets organiques issus des secteurs industriels ou agricole ²⁰.

I.4.1. Composition du biogaz

Le biogaz est principalement composé de méthane 50 à 70 %, mais aussi de dioxyde de carbone CO₂ et de quantités variables de vapeur d'eau et de sulfure d'hydrogène H₂S ²⁰.

I.4.1.1. Méthane

Le méthane, dont la formule chimique est CH₄, a été découvert et isolé par Alessandro Volta entre 1776 et 1778. Il constitue l'hydrocarbure le plus simple ainsi que le premier représentant de la famille des alcanes. Ce gaz, doté d'un fort potentiel énergétique, représente jusqu'à 90 % de la composition du gaz naturel. Sa température d'auto-inflammation dans l'air atteint 540 °C, et sa réaction de combustion s'exprime par l'équation suivante ²⁰ :

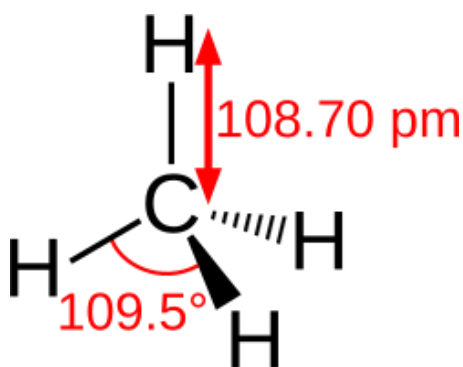
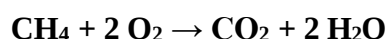


Figure I.11 : Structure de la molécule de méthane.

I.4.1.2. Dioxyde de Carbone CO₂

Le dioxyde de carbone, également désigné sous les termes de gaz carbonique ou anhydride carbonique, est un composé inorganique de formule chimique CO₂, dont la molécule adopte une structure linéaire de type O=C=O. Dans des conditions normales de température et de pression, il se manifeste sous la forme d'un gaz incolore, inodore, doté d'une saveur piquante.

Ce composé est commercialisé sous diverses formes pour des applications multiples, sur un marché dominé par de grandes entreprises²⁰.

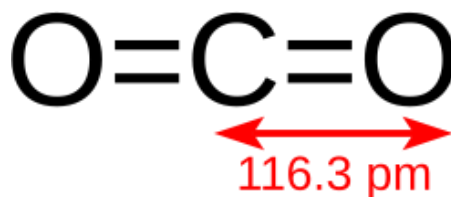


Figure I.12 : Structure du dioxyde de carbone.

I.4.1.3. Vapeur d'eau

La vapeur d'eau est la forme gazeuse de l'eau, un gaz inodore et incolore. Dans l'hydrosphère, elle résulte de l'évaporation, de l'ébullition de l'eau liquide ou de la sublimation de la glace. En langage courant, ce terme désigne parfois le brouillard issu de la condensation de cette vapeur en microgouttelettes, ce qui contredit la définition scientifique. L'industrie l'emploie principalement comme fluide caloporteur ou pour actionner des machines, et accessoirement dans des éjecteurs à vapeur, sirènes ou sifflets. Ses propriétés de transfert thermique servent aussi à la stérilisation²⁰.

I.4.1.4. Sulfure d'hydrogène H₂S

Le sulfure d'hydrogène (H₂S) est un gaz composé de soufre et d'hydrogène. Inflammable, incolore et toxique, il dégage une odeur fétide d'œuf pourri et est faiblement soluble dans l'eau, formant l'acide sulfhydrique. Il réagit avec les solutions basiques et des métaux comme l'argent ou l'acier inoxydable. Présent naturellement dans le pétrole, le gaz naturel, les gaz volcaniques et les sources chaudes, il provient aussi de nombreuses activités industrielles²⁰.

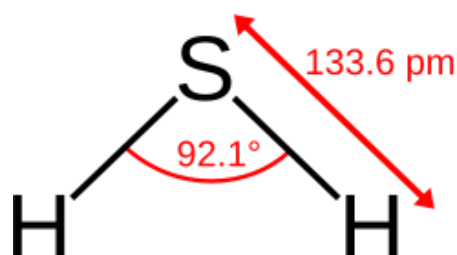


Figure I.13 : Structure de sulfure d'hydrogène.

I.4.2. Processus de la méthanisation

La méthanisation constitue un processus biologique de décomposition de la matière organique en milieu anaérobie. Désignée également sous les termes de biométhanisation ou de digestion anaérobie, elle repose sur l'action de micro-organismes qui convertissent les composés organiques en un gaz riche en méthane, ainsi qu'en un résidu semi-solide appelé digestat, pouvant être valorisé. Une fraction de la matière organique est transformée en méthane, tandis que le reste est utilisé pour le métabolisme et la croissance des micro-organismes méthanogènes. Dans le domaine de l'ingénierie, ce processus est reproduit et optimisé au sein d'unités de méthanisation afin d'accélérer la dégradation et de produire un biogaz exploitable, dénommé biométhane après épuration, à partir de déchets organiques ou de substrats issus de cultures énergétiques ²¹.

La méthanisation constitue un procédé biologique mis en œuvre dans un digesteur afin de décomposer la matière organique et de générer du méthane. Ce processus permet le traitement de différents types de déchets, tels que les eaux usées, les boues d'épuration, les effluents d'élevage, les résidus agroalimentaires, les biodéchets ménagers ainsi que les déchets agricoles. Le biogaz ainsi produit peut ainsi être utilisé pour produire de la chaleur ou de l'électricité, participant ainsi à la génération d'énergie renouvelable, tout en limitant la pollution et en fournissant, selon les substrats employés, un digestat stabilisé ¹⁵.

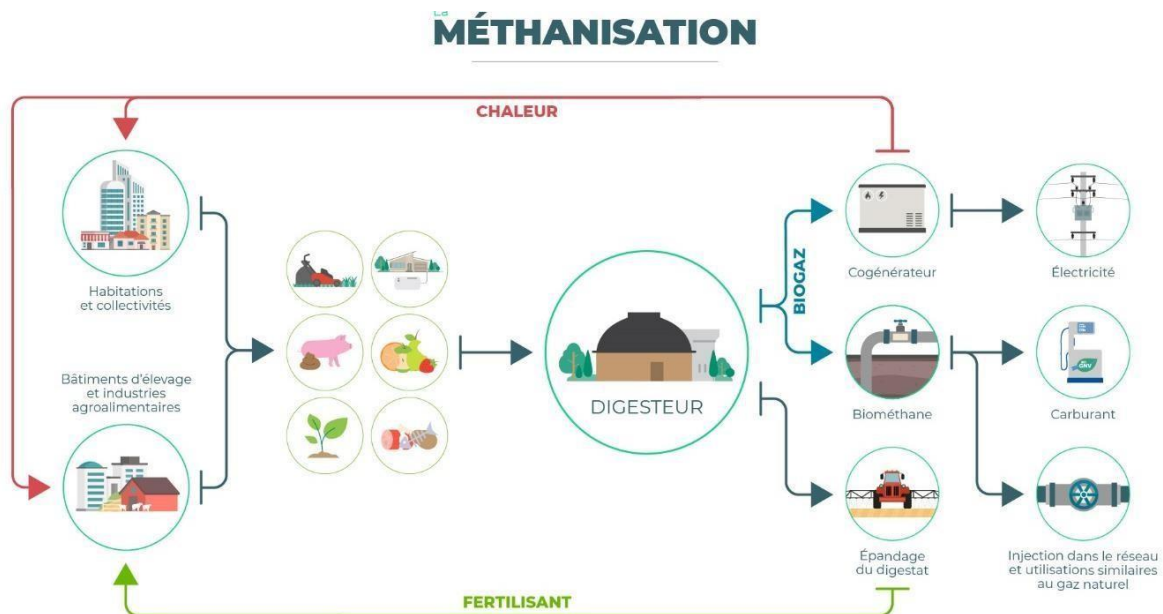


Figure I.14 : Schéma de la méthanisation. ²¹

I.4.2.1. Phases de processus

La méthanisation découle de l'activité de divers groupes de micro-organismes microbiens interagissant entre eux pour former un réseau trophique. On identifie généralement quatre phases consécutives²⁰.

I.4.2.1.1. Hydrolyse

Dans le réacteur, la matière organique complexe est d'abord hydrolysée en molécules simples sous l'action de micro-organismes. Ainsi, les lipides, polysaccharides, protéines et acides nucléiques sont convertis en monosaccharides, acides aminés, acides gras et bases azotées. Cette décomposition est assurée par des enzymes extracellulaires, telles que les amylases, cellulases, protéases et lipases.

Cette étape peut devenir limitante en raison de sa lenteur, notamment pour des composés difficilement ou lentement hydrolysables, comme la lignine, la cellulose, l'amidon ou les graisses. Dans le cas d'un mélange de déchets solides, l'hydrolyse se produit à des vitesses variables selon la bioaccessibilité des constituants de la biomasse, tandis qu'elle est simultanée dans les milieux homogènes et plus liquides²⁰.

I.4.2.1.2. Acidogenèse

Ces substrats sont employés au cours de la phase d'acidogenèse par les micro-organismes qualifiés d'acidogènes, lesquels génèrent des alcools, des acides organiques, ainsi que de l'hydrogène et du dioxyde de carbone. Cette étape se déroule de 30 à 40 fois plus rapidement que l'hydrolyse²⁰.

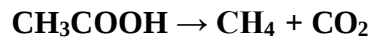
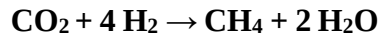
I.4.2.1.3. Acétogenèse

L'étape d'acétogenèse assure la conversion des différents composés provenant de la phase antérieure en précurseurs immédiats du méthane, à savoir l'acétate, le dioxyde de carbone et l'hydrogène²⁰.

I.4.2.1.4. Méthanogenèse

La méthanogenèse est réalisée par des microorganismes anaérobies stricts appartenant au domaine des Archaea. Cette phase finale conduit à la génération de méthane, selon deux voies distinctes : la première, dite hydrogénotrophe, utilise l'hydrogène et CO₂, tandis que la seconde, acétotrophe, repose sur l'acétate.

Leur vitesse de croissance est inférieure à celle des bactéries acidogènes ²⁰.



I.4.2.2. Conditions physico-chimiques

La méthanisation constitue un processus biologique complexe requérant l'établissement de conditions physico-chimiques spécifiques permettant d'optimiser la réaction biologique. Les Archaea méthanogènes sont des organismes anaérobies stricts, dont le développement est satisfaisant lorsque le potentiel d'oxydo-réduction du milieu, mesuré par rapport à l'électrode normale à hydrogène, est particulièrement bas ²³.

I.4.2.2.1. Conditions de température

La température cible est dite température de consigne. Trois régimes thermiques sont possibles ²⁰ :

- **Psychrophile** : lorsqu'il n'y a pas de système de chauffage, la température est alors comprise entre 5 et 25 °C.
- **Mésophile** : de 30 à 40 °C, c'est le plus courant dans les installations agricoles.
- **Thermophile** : de 45 à 60 °C, souvent à 55 °C, dans une gamme de pH comprise entre 6 et 8 avec un optimum compris entre 6,5 et 7,2.

I.4.2.2.2. Conditions de milieu physico-chimique

Les Archaea méthanogènes présentent des exigences spécifiques en oligo-éléments, incluant le fer, le molybdène, le nickel, le magnésium, le cobalt, le cuivre, le tungstène et le sélénium. La pression partielle d'hydrogène doit être maintenue en dessous de 10^{-4} bar dans la phase gazeuse. Un pH neutre favorise davantage la production de biogaz qu'un pH acide.

Pour réduire la concentration de sulfure d'hydrogène dans le biogaz produit, il est possible d'instaurer des conditions micro-aérobies à la surface du milieu réactionnel, en introduisant une faible quantité d'oxygène dans la partie gazeuse du digesteur ²¹.

I.4.3. Épuration du biogaz

Le traitement du biogaz constitue un procédé de séparation des mélanges gazeux visant à convertir ce dernier en biométhane, caractérisé par une teneur élevée en méthane, par l'élimination du dioxyde de carbone. Diverses technologies sont actuellement proposées sur le marché. Parmi celles-ci ²⁴ :

- **Absorption : traitement des gaz par les amines :**

Le traitement des gaz par les amines est un procédé de séparation de mélanges gazeux qui repose sur l'utilisation de solutions aqueuses d'amines afin d'éliminer les gaz acides, tels que le sulfure d'hydrogène (H_2S) et le dioxyde de carbone (CO_2), de ces mélanges. Ces techniques sont largement employées dans l'industrie chimique. Les amines les plus fréquemment utilisées incluent la diéthanolamine, l'éthanolamine, la N-méthyl diéthanolamine, la diisopropylamine et la diglycolamine. ²⁴.

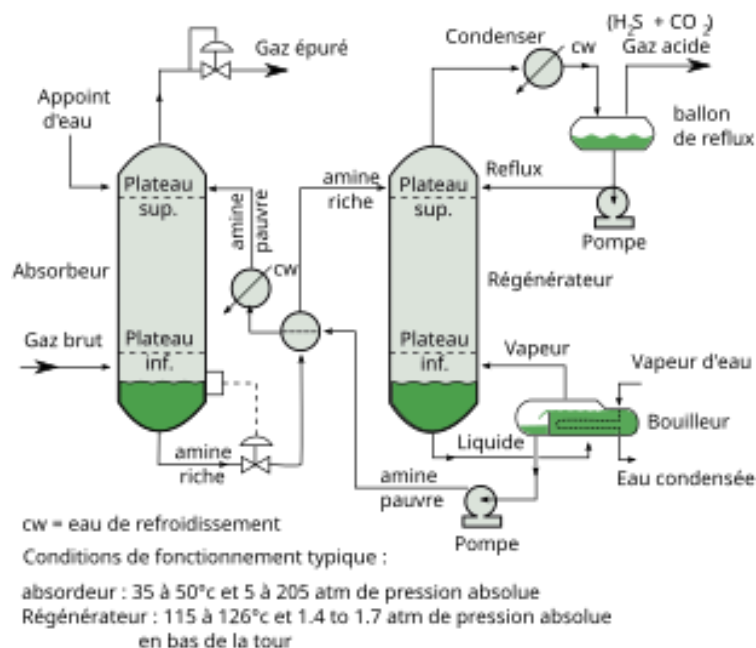


Figure I.15 : Schéma de procédé d'une installation de traitement des gaz par une amine. ²⁰

- **Méthode de séparation membranaire :**

Les procédés de séparation membranaire reposent sur l'utilisation d'une membrane synthétique, une fine couche de matière agissant comme agent séparateur pour les fluides. L'épaisseur de cette membrane peut varier de 100 nanomètres à un peu plus d'un centimètre. Elle permet de retenir ou de laisser passer sélectivement certaines substances, qu'elles soient

dissoutes ou non dans un mélange, entre les deux milieux qu'elle sépare. La fraction du mélange retenue par la membrane est désignée sous le terme de rétentat (ou concentrat), tandis que celle qui la traverse est appelée perméat. La séparation s'effectue sous l'effet d'une force motrice de transfert, selon un mécanisme de séparation spécifique. Les propriétés des membranes sont définies par deux paramètres essentiels : la perméabilité et la sélectivité²⁵.

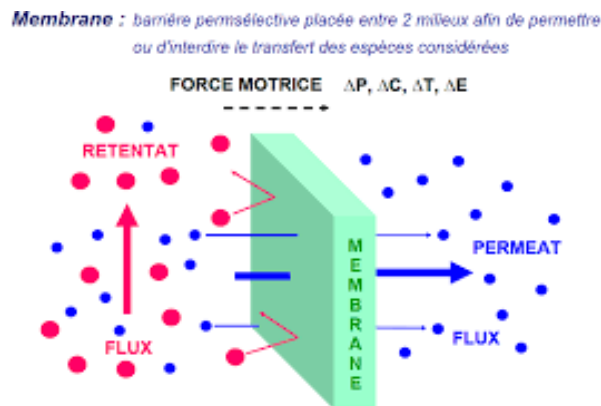


Figure I.16 : Procédé de séparation membranaire.²⁰

I.4.4. Valorisation énergétique du biogaz

La valorisation énergétique du biogaz consiste à convertir le mélange gazeux issu de la méthanisation en énergie utile.

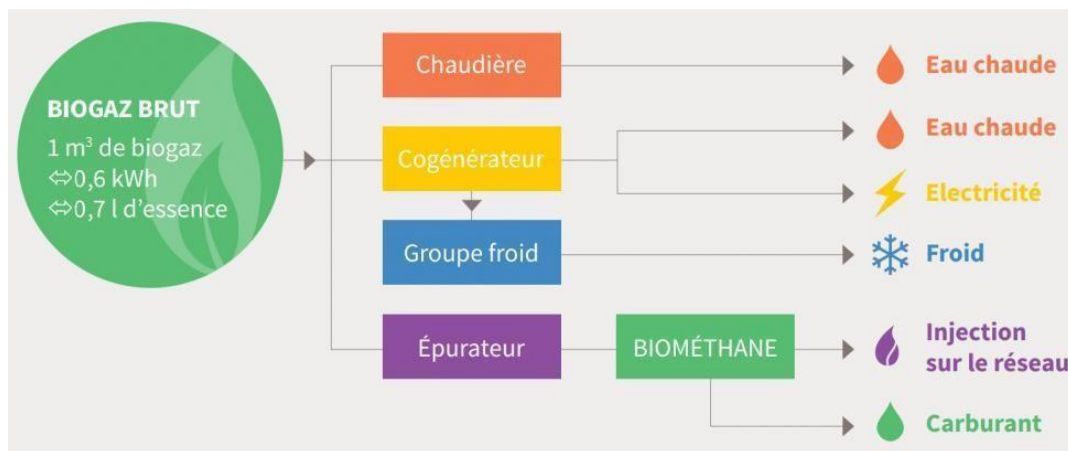


Figure I.17 : Les voies de valorisation du biogaz.

I.4.4.1. La cogénération

La cogénération consiste à produire simultanément, au sein d'une même installation, de l'électricité et de la chaleur à partir de l'énergie thermique et mécanique. Ce procédé permet de récupérer l'énergie habituellement non exploitée dans une centrale thermique conventionnelle,

atteignant ainsi un rendement énergétique global pouvant aller jusqu'à 85 %. Son fonctionnement se déroule comme suit ²⁵ :

❖ **La combustion :**

Le combustible, qu'il provienne de sources fossiles ou renouvelables (telles que la biomasse), est brûlé dans une chaudière. Certaines centrales exploitent également l'énergie géothermique. Ce processus de combustion génère de la chaleur ainsi que de la vapeur d'eau sous haute pression.

❖ **Récupération de la chaleur :**

La chaleur est récupérée au sein d'un échangeur thermique, puis distribuée dans des réseaux de chaleur destinés à un usage industriel ou collectif.

❖ **Production d'électricité :**

La vapeur sous haute pression actionne une turbine couplée à un alternateur, ce qui génère de l'électricité.

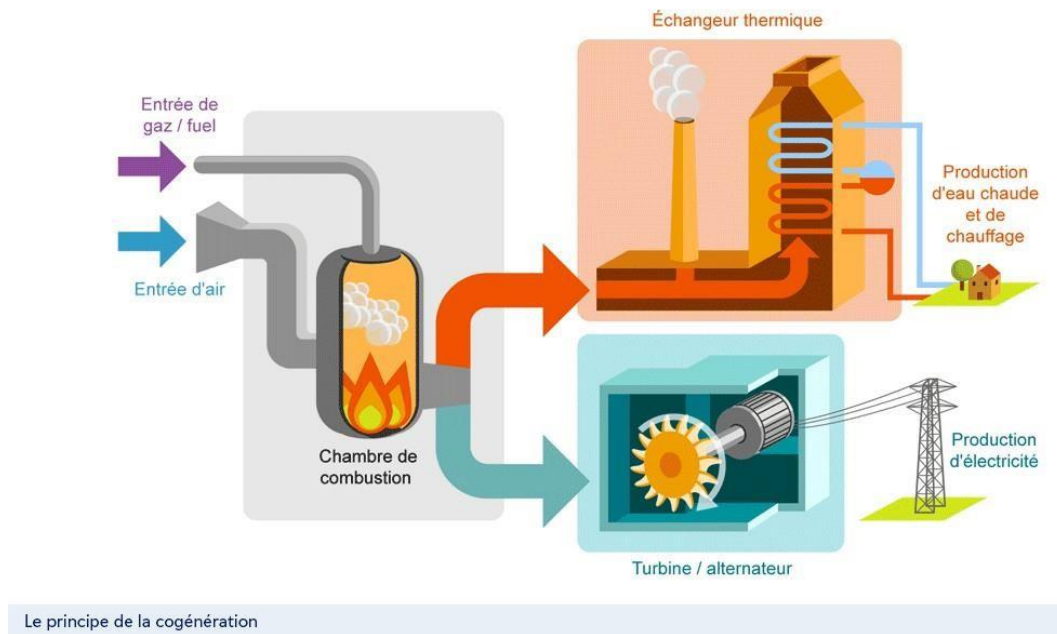


Figure I.18 : Schéma de la cogénération.

I.4.4.2. Production d'électricité

Le biogaz peut être utilisé comme combustible pour des moteurs à combustion interne, des turbines à gaz ou des micro turbines en vue de produire de l'électricité. Cette solution est couramment mise en œuvre dans les stations de traitement des eaux usées et les exploitations

agricoles. Le rendement électrique se situe généralement entre 30 et 40 %, en fonction de la technologie employée ²⁷.

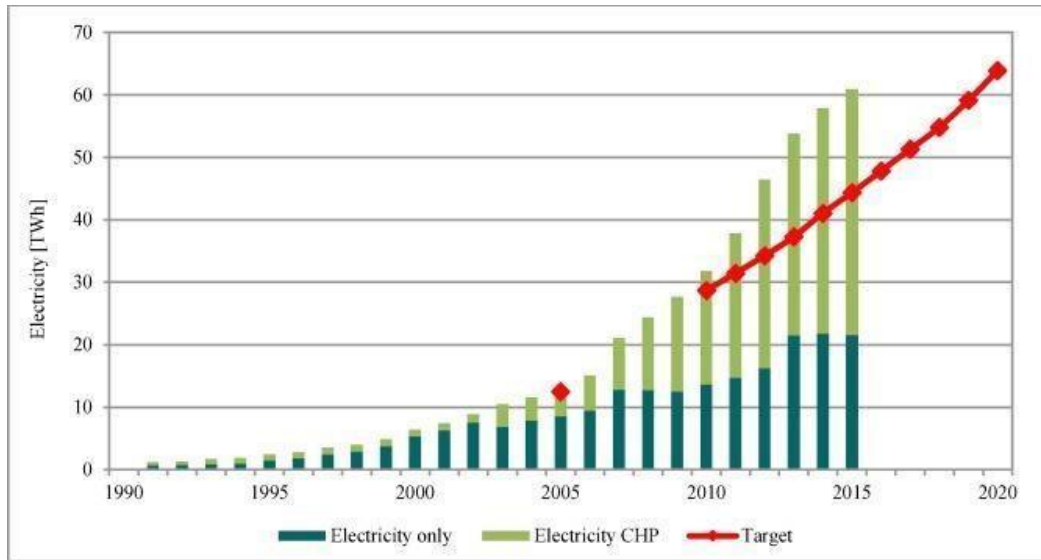


Figure I.19 : Évolution de la production d'électricité à partir de biogaz dans l'UE et objectifs. ²⁷

Ce graphique montre l'évolution de la production d'électricité à partir du biogaz (1990-2020), en distinguant l'électricité seule et la cogénération (CHP). On observe une croissance faible jusqu'en 2005, puis une forte accélération à partir de 2006, dépassant largement l'objectif cible (ligne rouge) dès 2012. La cogénération domine la production totale.

I.4.4.3. Valorisation thermique

Lorsque les besoins en chaleur sont significatifs, le biogaz peut être employé dans des équipements tels que des chaudières pour générer de la vapeur ou de l'eau chaude, ainsi que dans des séchoirs ou des procédés industriels. Cette voie de valorisation n'exige pas une purification avancée, ce qui permet de diminuer les coûts ; toutefois, le rendement global dépend étroitement des besoins thermiques locaux ²⁷.

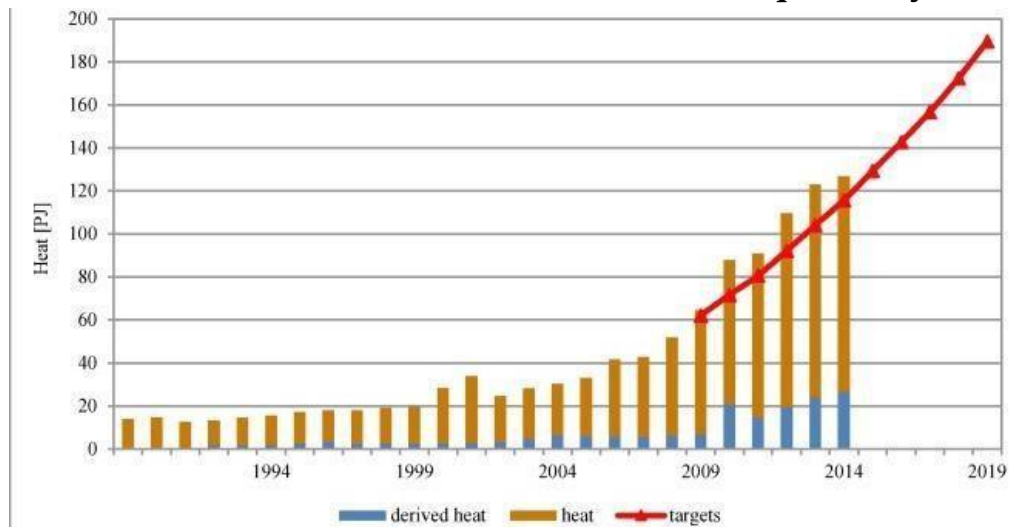


Figure I.20 : Évolution de la production de chaleur à partir du biogaz et objectifs dans l'UE. ²⁷

Ce graphique présente l'évolution de la production de chaleur à partir du biogaz (1990-2019), répartie entre chaleur dérivée (derived heat) et chaleur directe (heat), comparée aux objectifs cibles (ligne rouge). On constate une production stable et faible jusqu'en 1999, puis une croissance progressive jusqu'en 2009, suivie d'une accélération plus marquée jusqu'en 2014, où la production atteint environ 125 PJ. Contrairement au graphique de l'électricité, ici la production reste en dessous de l'objectif cible à partir de 2009, montrant un retard du secteur chaleur par rapport aux prévisions.

I.4.4.4. Valorisation en biométhane

Une fois purifié, le biogaz peut être converti en biométhane, dont la qualité est comparable à celle du gaz naturel. Il peut être utilisé pour être injecté dans le réseau de gaz naturel ou comme carburant pour véhicules. Le biométhane revêt un intérêt particulier dans les pays disposant d'un réseau gazier étendu ²⁷.

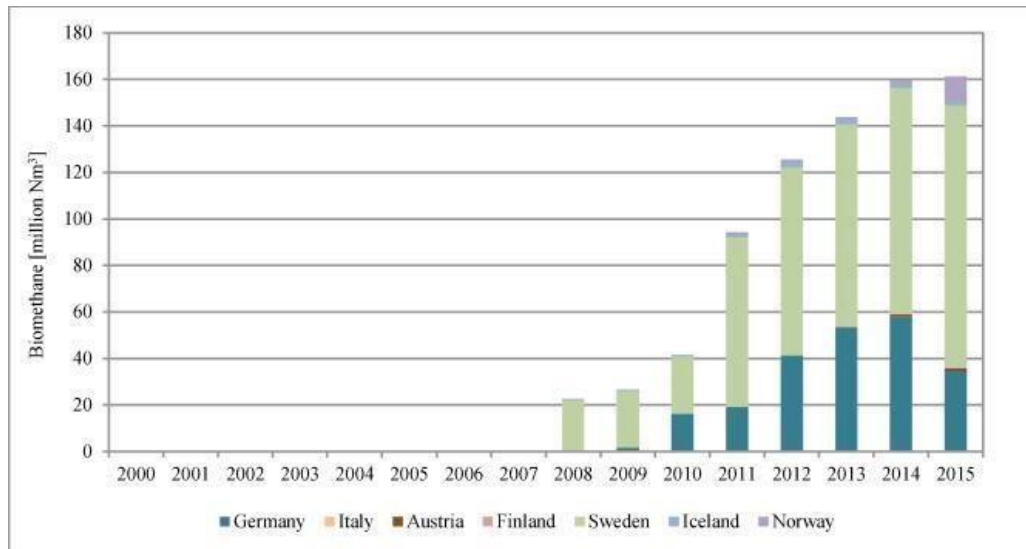


Figure I.21 : Utilisation du biométhane dans les transports dans les pays européens. ²⁷

Ce graphique illustre l'évolution de la production de biométhane (en millions de Nm³) dans plusieurs pays européens entre 2000 et 2015. La production reste nulle jusqu'en 2007, puis démarre progressivement à partir de 2008, avec une croissance forte et continue jusqu'en 2014, atteignant environ 160 millions de Nm³. La Suède (vert clair) et l'Allemagne (bleu foncé) dominent largement cette production, les autres pays (Italie, Autriche, Finlande, Islande, Norvège) restant marginaux ou quasi absents sur la période.

CHAPITRE II : Matériels et **méthodes**

Ce chapitre présente l'étude de la production et de la valorisation du biogaz, ainsi que son utilisation pour le chauffage d'une serre. Elle décrit les matériaux et méthodes expérimentales, les conditions de méthanisation, ainsi que l'évaluation du biogaz produit et de l'énergie qu'il peut fournir, permettant ainsi de relier les résultats expérimentaux à une application concrète.

II.1. Production du biogaz

La production du biogaz repose sur l'utilisation d'un substrat organique associé à un inoculum riche en micro-organismes méthanogènes. Cette section présente les caractéristiques des substrats utilisés ainsi que l'origine et le rôle de l'inoculum dans le processus de digestion anaérobie.

II.1.1. Substrats et inoculum

Le choix du substrat et de l'inoculum constitue une étape déterminante dans le processus de méthanisation. Le substrat représente la matière organique à dégrader, tandis que l'inoculum assure l'apport en micro-organismes nécessaires à la production de biogaz.

II.1.1.1. Substrat

II.1.1.1.1. Nature de substrat

Le substrat retenu dans le cadre de ce travail est constitué d'épluchures de pomme de terre, issues des opérations courantes de préparation alimentaire. Ces résidus représentent une fraction importante des déchets organiques générés quotidiennement et sont considérés comme des rejets biodégradables.

Le choix de ce substrat repose sur sa teneur élevée en matière organique, en particulier en composés glucidiques tels que l'amidon, qui sont facilement assimilables par les micro-organismes impliqués dans le processus de méthanisation. Cette caractéristique favorise ainsi la production de biogaz. Par ailleurs, la disponibilité importante de ces déchets et leur faible coût en font une ressource intéressante à valoriser dans une démarche de gestion durable des déchets.

Avant leur mise en œuvre dans le digesteur, elles ont été lavées et broyées, afin d'obtenir une meilleure homogénéité et de faciliter leur dégradation biologique.



Figure II.1 : Epluchures de pommes de terre utilisées.



Figure II.2 : Épluchures de pommes de terre broyées.

II.1.1.1.2 Caractéristiques physico-chimiques du substrat

La caractérisation physico-chimique du substrat constitue une étape essentielle pour évaluer son aptitude à la méthanisation. Dans le cadre de cette étude, cette caractérisation s'est limitée à la détermination de la matière sèche (MS), de la matière volatile (MV) et du pH. La matière sèche permet d'estimer la fraction solide du substrat après élimination de l'eau, tandis que la matière volatile correspond à la part organique biodégradable susceptible d'être convertie en biogaz par l'action des micro-organismes. Ces deux paramètres sont donc directement liés au potentiel méthanogène du substrat. Par ailleurs, le pH représente un facteur déterminant pour le bon déroulement du processus de digestion anaérobie, car l'activité des micro-organismes méthanogènes est fortement influencée par les conditions d'acidité du milieu. Un pH adéquat est nécessaire pour assurer la stabilité du système et optimiser la production de biogaz.

- **Matière sèche (ms)**

La matière sèche du substrat a été déterminée par une méthode gravimétrique basée sur l'élimination de l'eau par séchage. Une masse connue d'échantillon a été prélevée puis placée dans une étuve réglée à 105 °C pendant 24 heures, jusqu'à obtention d'une masse constante. Après refroidissement dans un dessiccateur, l'échantillon a été pesé à nouveau. La matière sèche correspond à la fraction résiduelle après évaporation de l'eau et est exprimée en pourcentage de la masse initiale.

$$ms (\%) = \frac{m^0}{m^1} \times 100 \quad (\text{Éq. II. 1})$$

Avec :

m^0 : La masse de l'échantillon prélevée (kg).

m^1 : La masse de l'échantillon après le séchage (kg).

- **La matière volatile (mv)**

La matière volatile a été déterminée à partir de l'échantillon sec obtenu après l'étape de mesure de la matière sèche. Cet échantillon a été introduit dans un four à moufle et porté à une température de 550 °C pendant une durée de 2 heures. Cette opération permet la combustion de la matière organique. Après refroidissement dans un dessiccateur, le résidu minéral restant a été pesé. La matière volatile correspond à la perte de masse observée lors de la calcination et représente la fraction organique du substrat, exprimée en pourcentage de la matière sèche⁴².

$$mv (\%) = \frac{m^1 - m^2}{m^1} \times 100 \quad (\text{Éq. II. 2})$$

Avec :

m^2 : La masse de l'échantillon après la calcination (kg).

- **pH**

Le pH du substrat a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre préalablement étalonné à l'aide de solutions tampons. Pour cette mesure, une quantité du substrat a été mélangée avec de l'eau distillée afin d'obtenir une suspension homogène. L'électrode du pH-mètre a ensuite été immergée dans le mélange, et la valeur du pH a été relevée une fois la stabilisation de la lecture obtenue.



Figure II.3 : pH-mètre utilisé.

II.1.1.2. Inoculum

L'inoculum utilisé dans cette étude est constitué de fumier de vache, reconnu pour sa richesse en micro-organismes anaérobies, notamment les bactéries méthanogènes impliquées dans le processus de digestion anaérobie telles que *Methanobacterium*, *Methanosaeta* et *Methanosarcina*.. Ce type d'inoculum est largement utilisé dans les procédés de production de biogaz en raison de sa capacité à initier et à maintenir l'activité biologique nécessaire à la dégradation de la matière organique. Le fumier de vache a été collecté à partir d'une ferme, puis conservé dans des conditions adéquates afin de préserver son activité microbienne jusqu'à son utilisation dans le digesteur. Le choix de cet inoculum se justifie par sa forte charge microbienne, sa disponibilité et sa bonne adaptation aux substrats organiques d'origine végétale, tels que les épluchures de pomme de terre. En outre, il permet d'améliorer le démarrage du processus de méthanisation et d'optimiser la production de biogaz.



Figure II.4 : Fumier de vache utilisé.

II.1.1.3. Ratio substrat/inoculum

Le ratio substrat/inoculum constitue un paramètre déterminant dans le processus de méthanisation, car il influence l'équilibre entre la matière organique à dégrader et la population microbienne disponible. Dans cette étude, 245 g de substrat et 245 g d'inoculum ont été introduits dans chaque réacteur, correspondant à un ratio substrat/inoculum de 1:1. Ce ratio a été adopté afin d'assurer un apport suffisant en micro-organismes tout en maintenant une quantité adéquate de substrat. Ce choix permet de favoriser un bon démarrage du processus de digestion anaérobie, de limiter les risques d'accumulation d'acides et de garantir la stabilité du milieu réactionnel. Un équilibre approprié entre substrat et inoculum est ainsi essentiel pour optimiser la production de biogaz⁴³.

II.1.2 Dispositif expérimental

II.1.2.1. Type de réacteur

Le dispositif de digestion anaérobie utilisé dans cette étude repose sur un réacteur de type discontinu, constitué d'un bocal hermétique en verre. Ce choix permet d'assurer un milieu fermé, indispensable au maintien de conditions strictement anaérobies nécessaires au développement des micro-organismes méthanogènes.



Figure II.5 : Montage expérimental utilisé.

Le couvercle du bocal a été modifié par la réalisation de deux ouvertures permettant l'insertion de deux tuyaux en plastique. Ces derniers ont été soigneusement fixé et étanchéifié afin d'éviter toute fuite de gaz ou entrée d'air. Le premier tuyau assure l'évacuation du biogaz produit vers le système de collecte et le deuxième aide à aspirer un peu de substrat avec la seringue pour l'évaluation du pH. Ce type de montage présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, économique et adapté aux essais de laboratoire visant à évaluer le potentiel de production de biogaz à partir de substrats organiques.

La quantification du biogaz produit a été réalisée à l'aide d'un dispositif basé sur le principe du déplacement d'eau. Ce système consiste à diriger le gaz généré dans le réacteur vers une éprouvette graduée d'un volume de 1 litre, préalablement remplie d'eau et maintenue en position inversée dans un récipient contenant de l'eau. Le biogaz, acheminé à travers le tuyau en plastique, pénètre dans l'éprouvette et provoque le déplacement du liquide. Le volume d'eau déplacé correspond ainsi directement au volume de gaz produit, permettant un suivi quantitatif de la production au cours du temps. Cette méthode présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, peu coûteuse et adaptée aux expériences de laboratoire à petite échelle, tout en offrant une estimation fiable du volume de biogaz généré.

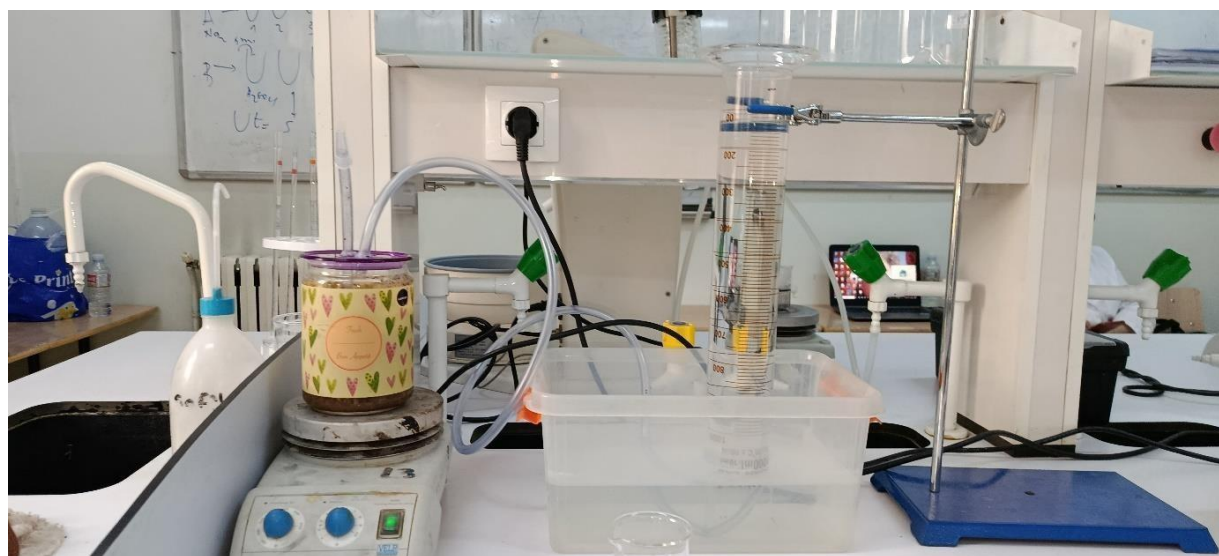


Figure II.6 : Le système de collecte du biogaz.

II.1.2.3. Équipement pour agitation, contrôle du pH et de la température**II.1.2.3.1. Agitation**

L'homogénéisation du milieu réactionnel a été assurée par une agitation manuelle effectuée à intervalles réguliers. Cette opération consiste à mélanger le contenu du réacteur de manière simple, sans recours à un dispositif mécanique, afin de favoriser le contact entre le substrat et les micro-organismes. L'agitation permet également de limiter la formation de zones de stratification à l'intérieur du réacteur et d'améliorer la répartition des nutriments, contribuant ainsi au bon déroulement du processus de digestion anaérobie. Cette méthode, bien que rudimentaire, reste adaptée aux essais réalisés à l'échelle du laboratoire.

II.1.2.3.2. pH

Le suivi du pH du milieu réactionnel a été réalisé à l'aide d'un pH-mètre Ohaus Starter 2100, permettant des mesures précises de l'acidité du substrat au cours de l'expérience. Avant chaque utilisation, l'appareil a été calibré avec des solutions tampons étalons afin de garantir la fiabilité des mesures. La mesure du pH a été effectuée sur les prélèvements aspirés à l'aide de la seringue. Le contrôle de ce paramètre est essentiel, car les variations du pH peuvent influencer l'activité des micro-organismes anaérobies et, par conséquent, le rendement de la production de biogaz.

II.1.2.3.3. Température

La température du système a été assurée au moyen d'une plaque chauffante, utilisée comme dispositif principal de chauffage. Cet équipement permet de fournir et de maintenir les conditions thermiques requises au sein du réacteur. Son utilisation garantit un apport de chaleur constant et homogène, contribuant ainsi à la stabilité du fonctionnement du système pendant toute la durée de l'expérimentation.

II.1.3. Protocole de méthanisation**II.1.3.1. Étapes de préparation**

La mise en œuvre de l'expérience de méthanisation a nécessité une série d'étapes préalables visant à préparer le substrat et l'inoculum dans des conditions favorables au démarrage du processus. Dans un premier temps, les épluchures de pomme de terre ont été collectées puis préparées afin d'obtenir une texture plus homogène et de faciliter leur

dégradation biologique, cette étape permet d'augmenter la surface de contact entre le substrat et les micro-organismes. Par la suite, le fumier de vache utilisé comme inoculum a été préalablement homogénéisé afin d'assurer une répartition uniforme de la biomasse microbienne. Le substrat et l'inoculum ont ensuite été mélangés selon le ratio défini, de manière à obtenir un milieu homogène. Le mélange obtenu a été introduit dans le réacteur en ajoutant un peu d'eau distillée, en veillant à ne pas le remplir complètement afin de laisser un espace libre pour l'accumulation du biogaz. Enfin, le réacteur a été soigneusement fermé pour garantir son étanchéité, puis connecté au système de collecte du biogaz avant le démarrage de l'expérimentation.



Figure II.7 : Le mélange final substrat-inoculum.

II.1.3.2. Conditions opératoires

Les conditions opératoires ont été définies de manière à assurer un fonctionnement optimal du processus de digestion anaérobie. La température du réacteur a été maintenue à 50 °C, correspondant à la gamme thermophile, favorable à l'activité des micro-organismes méthanogènes. Toutefois, pour des raisons de sécurité en laboratoire, la plaque chauffante a été systématiquement éteinte de 16 h à 8 h. Ainsi, durant la période diurne, le système évoluait dans des conditions thermophiles, tandis que pendant la nuit, la température du milieu redescendait et s'équilibrait avec celle de l'environnement extérieur, avoisinant 25 °C.

Le suivi du pH a été réalisé quotidiennement, afin de surveiller l'évolution de l'acidité du milieu et de s'assurer de sa compatibilité avec le bon déroulement du processus biologique.

Le pH optimal pour la méthanisation se situe généralement entre 6,5 et 8,5, plage favorable à l'activité des micro-organismes méthanogènes. Lorsque le pH diminuait en dessous de cet intervalle, un ajustement était effectué par l'ajout de bicarbonate de sodium, afin de rétablir des conditions adéquates au maintien de l'activité biologique.

L'ensemble de ces conditions a permis de maintenir un environnement favorable à la dégradation de la matière organique et à la production de biogaz.

II.2. Traitement et valorisation du biogaz

II.2.1. Volume du biogaz

La production de biogaz entraîne un déplacement du liquide contenu dans l'éprouvette, permettant ainsi une mesure directe du volume de gaz produit. Le volume de biogaz correspond au volume d'eau déplacé et a été relevé quotidiennement afin de suivre l'évolution de la production au cours du temps.

Les volumes mesurés ont été utilisés pour évaluer la performance du processus de méthanisation et pour analyser la cinétique de production du biogaz en fonction des conditions expérimentales appliquées.

II.2.2. Pouvoir calorifique du biogaz

Le pouvoir calorifique du biogaz correspond à la quantité d'énergie libérée lors de sa combustion complète. Il dépend essentiellement de la composition du gaz, en particulier de la fraction de méthane, qui constitue le principal composé combustible. Dans le cadre de l'évaluation énergétique, le pouvoir calorifique du biogaz peut être déterminé à partir de sa composition en différents gaz. Il est généralement estimé comme la somme des contributions énergétiques de chaque constituant, pondérées par leur fraction volumique. Ainsi, le pouvoir calorifique du biogaz peut être exprimé par la relation suivante :

$$PCI_{biogaz} = x_{CH_4} \cdot PCI_{CH_4} + \sum x_i \cdot PCI_i \quad (\text{Éq. II. 3})$$

Avec :

x_{CH_4} : La fraction volumique de méthane.

PCI_{CH_4} : Le pouvoir calorifique de méthane, environ 9,94 kWh/Nm³.

x_i : La fraction volumique de chaque gaz combustible présent dans le biogaz.

PCI_i : Le pouvoir calorifique de chaque gaz combustible présent dans le biogaz.

En pratique, le méthane étant le constituant majoritaire du biogaz et seul gaz combustible.

En raison de l'absence d'une analyse expérimentale permettant de déterminer précisément la composition du biogaz produit, l'évaluation du pouvoir calorifique a été basée sur des données issues de la littérature scientifique. En général, le biogaz contient une proportion de méthane variant entre 50 et 70 %, le reste étant constitué majoritairement de dioxyde de carbone ainsi que de faibles quantités d'autres gaz. Cette plage de concentration en méthane a été retenue dans cette étude comme base de modélisation pour l'estimation du potentiel énergétique du biogaz et l'évaluation de son aptitude au chauffage de la serre.

II.2.3. L'énergie produite par un biogaz

L'énergie produite par le biogaz dans cette étude correspond à l'énergie thermique libérée lors de sa combustion complète. Cette énergie est directement liée au volume de biogaz généré ainsi qu'à son pouvoir calorifique inférieur (PCI), qui représente la quantité de chaleur dégagée. L'estimation de l'énergie thermique repose sur la relation suivante :

$$E = V_{biogaz} \cdot PCI_{biogaz} \quad (\text{Éq. II. 4})$$

Où :

E : l'énergie produite (kWh).

V_{biogaz} : le volume de biogaz (m^3).

PCI_{biogaz} : le pouvoir calorifique inférieur de biogaz (kWh/m^3).

II.3. Modélisation thermique de la serre

Dans le cadre de cette étude, une modélisation thermique simplifiée de la serre a été adoptée afin d'évaluer les besoins énergétiques nécessaires au maintien d'une température intérieure favorable au développement des cultures. Cette approche permet d'estimer les pertes thermiques de la serre et d'analyser la possibilité d'utiliser le biogaz produit comme source de chauffage. La serre étudiée est considérée comme un système fermé échangeant de la chaleur avec le milieu extérieur à travers les parois de couverture.

Les échanges thermiques sont principalement liés à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la serre.

II.3.1. Hypothèses de modélisation

Afin de simplifier l'étude thermique, les hypothèses suivantes ont été retenues. Ces hypothèses permettent d'obtenir une estimation théorique des besoins thermiques de la serre dans des conditions simplifiées adaptées à une étude préliminaire :

- La serre étudiée possède des dimensions de $1 \times 1 \times 1$ m ;
- La température à l'intérieur de la serre est supposée homogène ;
- Les pertes thermiques se produisent principalement à travers les parois de couverture ;
- Les échanges thermiques par le sol sont négligés ;
- Les propriétés thermiques du matériau de couverture sont considérées constantes ;
- Le régime thermique est supposé stationnaire pendant la période étudiée ;
- Les effets du rayonnement solaire et du vent ne sont pas pris en compte dans cette modélisation simplifiée ;
- La température extérieure minimale considérée dans le cadre de la modélisation est fixée à 0°C , correspondant à des conditions hivernales défavorables.

II.3.2. Matériau de couverture de la serre

Le matériau de couverture joue un rôle essentiel dans les performances thermiques de la serre, puisqu'il influence directement les échanges de chaleur avec l'environnement extérieur. Dans cette étude, la serre est supposée être recouverte d'un matériau transparent permettant la transmission du rayonnement solaire tout en limitant les pertes thermiques.

Parmi les matériaux couramment utilisés pour les serres agricoles figurent le verre, le polyéthylène et le polycarbonate. Chacun de ces matériaux possède des propriétés thermiques différentes influençant les besoins énergétiques de chauffage.

Le comportement thermique du matériau est caractérisé par le coefficient global de transfert thermique U , exprimé en $W/m^2 \cdot K$. Ce coefficient représente la capacité du matériau à transmettre la chaleur entre l'intérieur et l'extérieur de la serre. Une faible valeur du coefficient U traduit une meilleure isolation thermique et donc une réduction des pertes de chaleur.

II.3.3. Modèle thermique utilisé

L'évaluation des pertes thermiques de la serre a été réalisée à partir d'un modèle simplifié de transfert de chaleur. La puissance thermique nécessaire pour compenser les pertes est donnée par la relation suivante :

$$Q = U \cdot A \cdot (T_{int} - T_{ext}) \quad (\text{Éq. II. 5})$$

Où :

Q : puissance thermique nécessaire (W).

U : coefficient global de transfert thermique du matériau de couverture ($W/m^2 \cdot K$).

A : surface totale d'échange thermique de la serre (m^2).

T_{int} : température intérieure souhaitée de la serre ($^{\circ}C$ ou K).

T_{ext} : température extérieure ($^{\circ}C$ ou K).

Ce modèle permet ainsi d'estimer la puissance thermique nécessaire pour maintenir les conditions thermiques souhaitées à l'intérieur de la serre en fonction des propriétés du matériau de couverture et des conditions climatiques extérieures.

II.3.4. Les besoins thermiques de la serre

L'énergie thermique nécessaire au chauffage de la serre dépend de la puissance thermique requise ainsi que de la durée de fonctionnement du système de chauffage. Elle peut être estimée par la relation suivante :

$$E = Q \times t \quad (\text{Éq. II.6})$$

Où :

E : énergie thermique nécessaire (Wh ou kWh).

Q : puissance thermique nécessaire (W).

t : durée de chauffage (h).

Cette relation permet d'estimer les besoins énergétiques de la serre pour différentes conditions de température extérieure et différents matériaux de couverture. Les résultats obtenus pourront ensuite être comparés au potentiel énergétique du biogaz produit afin d'évaluer la faisabilité de son utilisation comme source de chauffage pour la serre.

CHAPITRE III : Résultats **et discussions**

Le troisième chapitre de ce mémoire est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus au cours de cette étude. Il porte principalement sur la caractérisation physico-chimique du substrat et de l'inoculum, ainsi que sur le suivi du pH et la production de biogaz.

Ce chapitre permet également d'évaluer la teneur en méthane du biogaz produit ainsi que l'énergie pouvant être valorisée à partir de cette production. Enfin, une estimation des besoins thermiques de la serre est réalisée afin d'établir une comparaison entre l'énergie produite par le biogaz et l'énergie nécessaire au chauffage de la serre. L'ensemble des résultats obtenus est interprété et discuté en se basant sur les données expérimentales et les références bibliographiques disponibles.

III.1. Caractéristiques initiales du substrat et de l'inoculum

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques initiales du substrat et de l'inoculum, notamment le pH, la teneur en matière sèche (MS) et la teneur en matière volatile (MV).

Tableau III.1 : Caractéristiques initiales du substrat et de l'inoculum.

	Substrat	Inoculum
pH	6,6	6,8
MS (%)	13,6	48,1
MV (%)	9,71	66,989

Les résultats des analyses physicochimiques initiales révèlent des différences notables entre le substrat et l'inoculum. En ce qui concerne le pH, les valeurs mesurées sont respectivement de 6,6 et 6,8, des valeurs proches de la neutralité qui demeurent compatibles avec le processus de digestion anaérobie, sachant que les microorganismes méthanogènes se développent de manière optimale dans une plage comprise entre 6,8 et 7,5. Par ailleurs, la teneur en matière sèche (MS) du substrat s'élève à 13,6 %, traduisant une forte proportion d'eau qui favorise les échanges entre les microorganismes et leur milieu, tandis que l'inoculum affiche une MS bien plus élevée de l'ordre de 48,1 %, reflétant une concentration importante en biomasse microbienne active. Cette richesse en biomasse se confirme également à travers les valeurs de matière volatile (MV), où l'inoculum présente un taux de 66,989 % contre seulement

9,71 % pour le substrat, ce qui signifie que l'inoculum renferme une fraction organique biodégradable nettement plus importante, garantissant ainsi une activité méthanogène soutenue dès le lancement du processus. Globalement, bien que le substrat présente des caractéristiques organiques modestes, l'association avec un inoculum riche en matière volatile et à pH quasi neutre offre des conditions de départ favorables à une méthanisation efficace.

III.2. Evolution du pH au cours du temps

La figure ci-dessous illustre l'évolution du pH au fil du temps sur toute la durée de l'expérience.

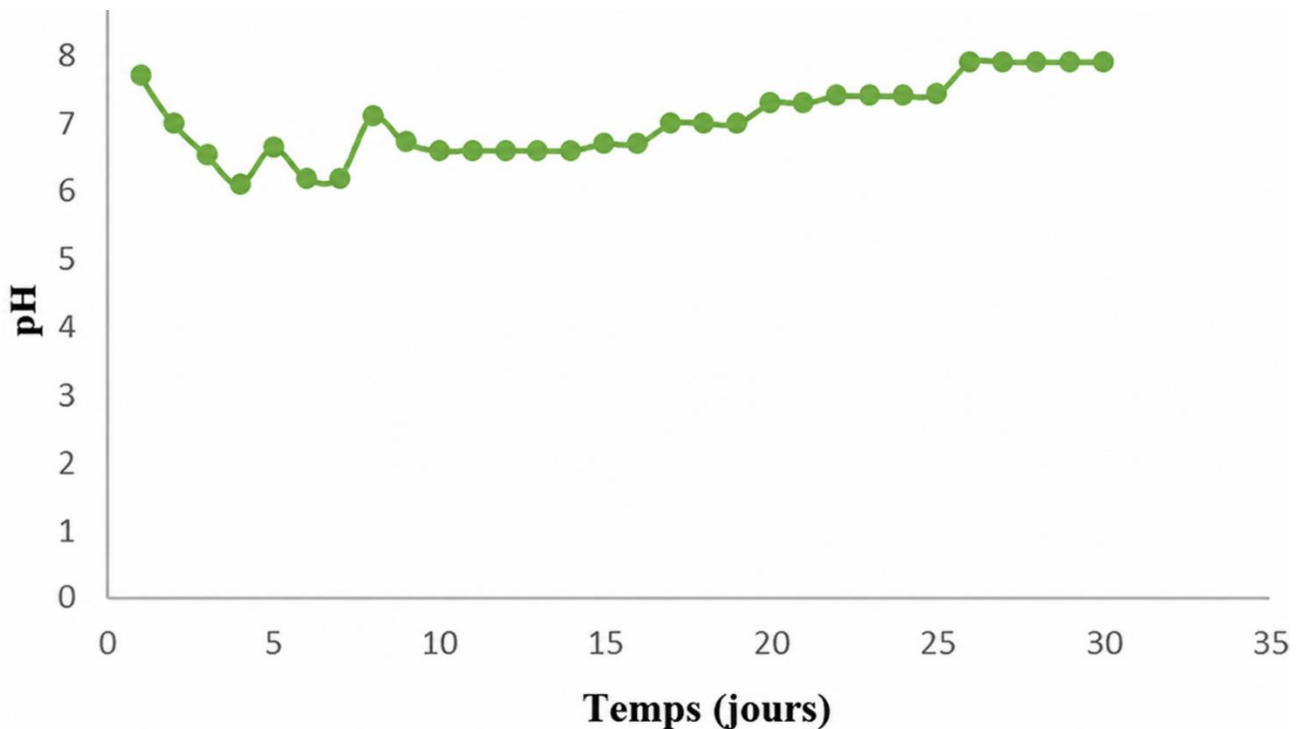


Figure III.1 : Evolution du pH au cours du temps

L'analyse de la courbe montre que le pH a connu une évolution dynamique tout au long de la période de digestion anaérobie s'étalant sur 30 jours. Au cours des premiers jours, une baisse du pH a été observée, atteignant des valeurs légèrement inférieures à 6,8, ce qui s'explique par l'accumulation d'acides gras volatils produits tels que l'acide acétique, l'acide propionique, lors de la phase d'acidogénèse, étape durant laquelle les bactéries hydrolytiques et acidogènes dégradent la matière organique en acides organiques. Cette acidification transitoire est un phénomène classique en début de fermentation anaérobie.

Afin de corriger cette tendance à l'acidification et d'éviter une inhibition des microorganismes méthanogènes particulièrement sensibles aux pH bas, du bicarbonate de sodium a été ajouté au digesteur aux jours 5 et 8. Ce choix est justifié par le rôle tampon bien

connu du bicarbonate, qui neutralise l'excès d'acidité en réagissant avec les protons libres, permettant ainsi de maintenir le milieu dans des conditions favorables à la méthanogenèse. Les oscillations observées sur la courbe autour de ces deux jours témoignent précisément de l'effet de ces ajouts correctifs.

À partir du 10^{ème} jour, le pH s'est progressivement stabilisé et a évolué de manière croissante pour atteindre des valeurs avoisinant 7,9 en fin d'expérience. Cette stabilisation traduit un équilibre atteint entre la production d'acides et leur consommation par les archées méthanogènes, signe d'un bon fonctionnement du processus de méthanisation. Les valeurs finales obtenues se situent dans la plage optimale pour la production de biogaz, confirmant que l'ajout de bicarbonate de sodium a été efficace.

III.3. Suivi de la production du biogaz

III.3.1. Cinétique de production cumulée de biogaz

La figure suivante présente l'évolution du volume cumulé de biogaz produit au cours des 30 jours d'expérimentation.

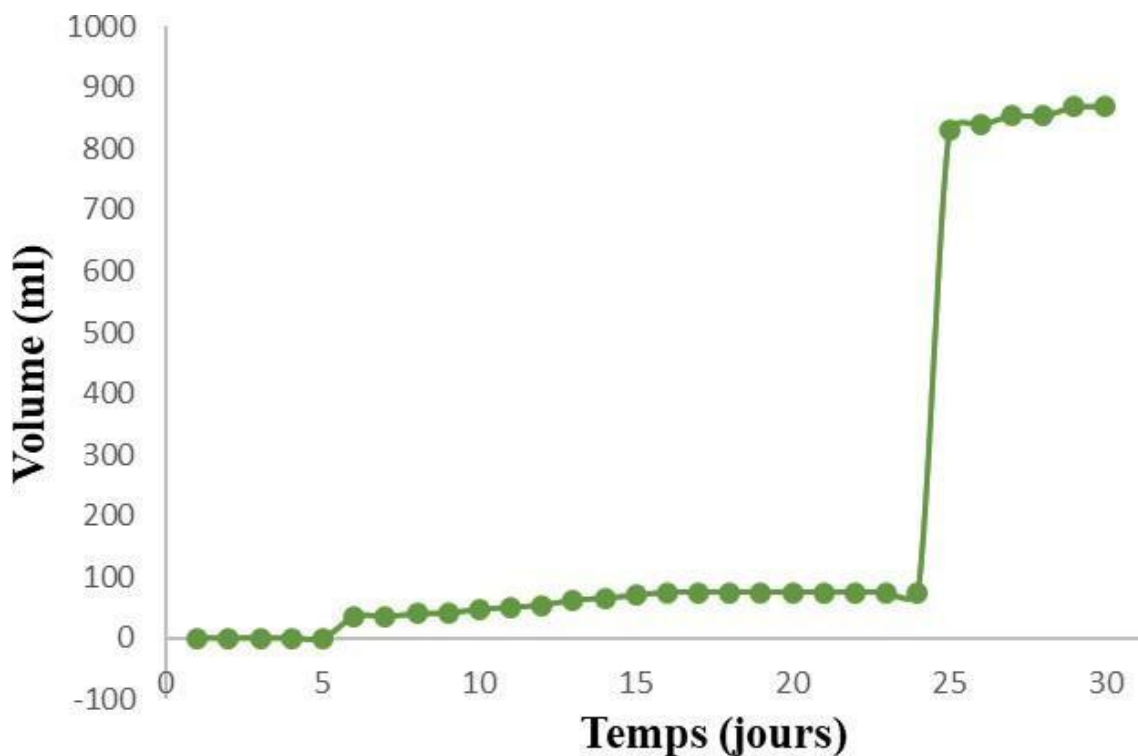


Figure III.2 : Cinétique de production cumulée de biogaz

Cette courbe illustre l'évolution du volume cumulé de biogaz produit au cours des 30 jours d'expérimentation.

Dès le jour 4, l'apparition de bulles de gaz à la sortie du digesteur au niveau du début du tuyau a constitué le premier signe visible d'une activité microbienne naissante. Ce signal précoce, bien qu'encore discret, témoigne du fait que les microorganismes avaient commencé à s'adapter à leur nouvel environnement et à initier la dégradation de la matière organique. Cependant, les volumes mesurés sont restés très faibles durant cette période, avec seulement 35 ml au jour 9 puis 75 ml au jour 16, ce qui traduit une phase de démarrage lente où l'activité méthanogène s'installe progressivement.

Entre le jour 16 et le jour 25, la courbe montre une stagnation quasi totale de la production, le volume cumulé restant pratiquement inchangé. Cette phase de blocage peut s'expliquer par une stratification du contenu du digesteur et une insuffisance du contact entre les microorganismes et le substrat disponible, limitant ainsi les transferts de matière nécessaires à la poursuite de la fermentation.

C'est précisément pour remédier à cette situation qu'une agitation manuelle a été réalisée au jour 25. Cette intervention s'est révélée déterminante puisqu'elle a provoqué une remobilisation brutale du biogaz piégé dans la masse du digestat, entraînant un déplacement d'eau de 830 ml, mesuré par la méthode de déplacement d'eau. Ce saut spectaculaire du volume cumulé en un seul jour illustre à quel point l'agitation joue un rôle crucial dans l'homogénéisation du milieu et la libération du gaz accumulé. Enfin, au jour 30, le volume total cumulé a atteint 870 ml, après quoi la production semble se stabiliser, suggérant que la majeure partie de la matière organique biodégradable du substrat avait été consommée et que le digesteur approchait de son potentiel méthanogène maximal.

III.3.2. Production journalière du biogaz

La production journalière de biogaz tout au long de la période de digestion est reportée en **Figure III.3**.

La production de biogaz démarre timidement dès le jour 6 avec un petit pic de 35 ml, suivi de valeurs faibles mais continues entre les jours 8 et 15 (3 à 8 ml/jour), témoignant d'une activité microbienne naissante. Une phase de silence s'installe ensuite entre les jours 16 et 25. Le pic majeur survient au jour 25 avec 755 ml, marquant l'apogée de l'activité méthanogène.

La production redescend rapidement après, avec quelques valeurs résiduelles (10–15 ml) aux jours 26, 27 et 29.

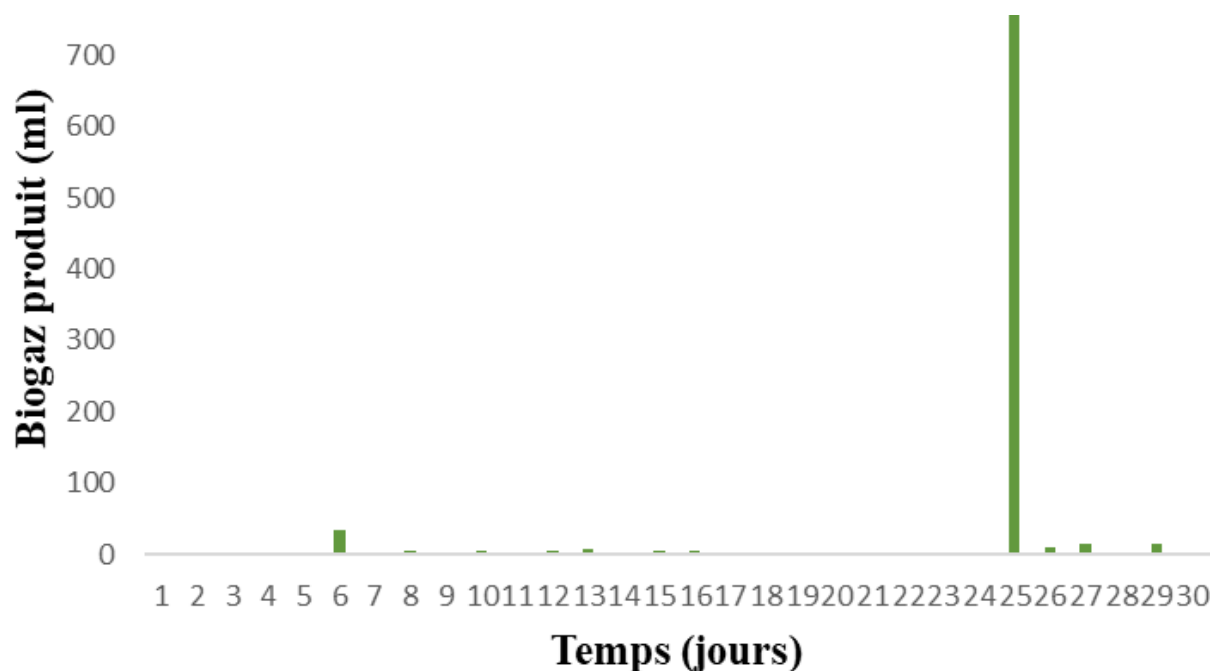


Figure III.3 : Production journalière du biogaz

III.4. Evolution du pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la teneur en CH_4

Le pouvoir calorifique inférieur du biogaz dépend essentiellement de sa teneur en méthane, principal composé combustible. En l'absence d'une composition expérimentale précise, une estimation du PCI a été réalisée pour des teneurs en méthane variant de 50 à 80 %, plage couramment rencontrée dans les procédés de méthanisation.

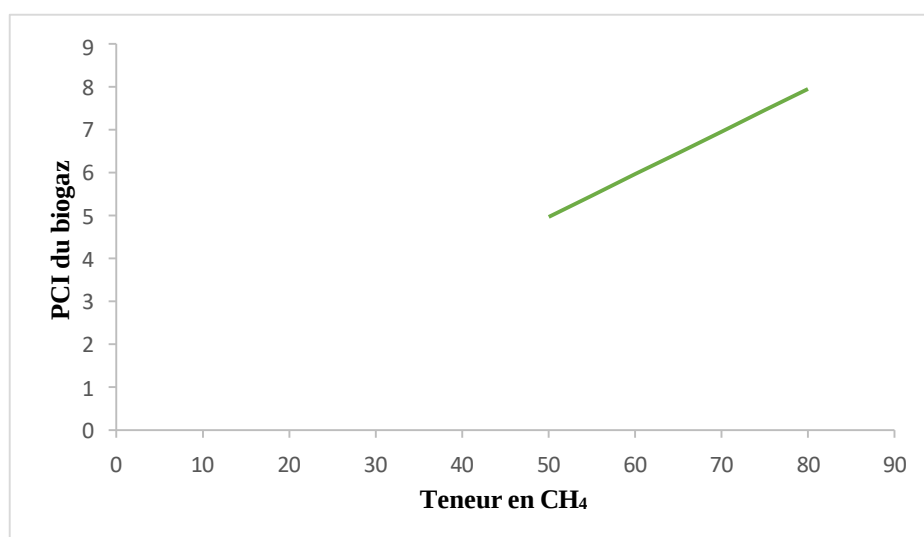


Figure III.4 : Evolution du pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la teneur en CH_4 .

La **Figure III.4** illustre clairement la relation entre la teneur en méthane (CH_4) et le pouvoir calorifique inférieur du biogaz. On observe une évolution linéaire et croissante : plus la concentration en méthane augmente, plus le PCI du biogaz est élevé. Cela s'explique naturellement par le fait que le méthane est le principal composant combustible du biogaz, c'est lui qui brûle et libère de l'énergie. Ainsi, un biogaz riche en CH_4 aura un contenu énergétique plus important, ce qui le rend plus intéressant pour une valorisation thermique.

III.5. Evaluation du potentiel énergétique du biogaz

Le tableau ci-dessous présente l'évolution du potentiel énergétique en fonction de différentes teneurs en CH_4 , allant de 50 % à 80 %.

Tableau III.2 : Evaluation du potentiel énergétique du biogaz.

Teneur en CH_4 (%)	PCI du biogaz (kWh/m^3)	Potentiel énergétique (kWh)
50	4,97	0,0043239
55	5,467	0,00475629
60	5,964	0,00518868
65	6,461	0,00562107
70	6,958	0,00605346
75	7,455	0,00648585
80	7,952	0,00691824

En observant les valeurs du potentiel énergétique, on remarque qu'il évolue de façon régulière et croissante avec la teneur en méthane. En passant de 50 % à 80 % de CH_4 , le potentiel énergétique progresse de 0,00432 à 0,00692 kWh.

Même si ces valeurs restent modestes en termes absolus, elles reflètent fidèlement la quantité de biogaz produite lors de notre expérimentation. Cela montre que toute amélioration des conditions de digestion, favorisant une meilleure production de méthane, se traduira directement par un gain énergétique plus important.

III.6. Estimation des besoins thermiques en fonction des matériaux

Le tableau suivant présente une estimation des besoins thermiques de la serre en fonction des matériaux utilisés. Les calculs ont été réalisés pour une serre de surface égale à 6 m², avec une température intérieure souhaitée de 25 °C et une température extérieure de 0 °C.

Tableau III.3 : Estimation des besoins thermiques en fonction des matériaux.

Matériaux	U (W/m ² . °C)	Les puissances thermiques (W)	Les besoins thermiques (kWh)
Verre simple, hermétique	6,2	930	0,93
Verre simple, faible émissivité	5,4	810	0,81
Double verre, hermétique	3,7	555	0,555
Plastique simple	6,2	930	0,93
Polycarbonate simple, ondulé	6,8	1020	1,02
Fibre de verre simple, ondulée	5,7	855	0,855
Double polyéthylène	4	600	0,6
Double polyéthylène, anti-IR	2,8	420	0,42
Acrylique rigide, double paroi	3,2	480	0,48
Polycarbonate rigide, double paroi	3,6	540	0,54
Acrylique rigide, avec billes de polystyrène	0,57	85,5	0,0855
Double polyéthylène sur verre	2,8	420	0,42
Verre simple avec couverture thermique	4	600	0,6
Double polyéthylène avec couverture thermique	2,5	375	0,375

Le **Tableau III.3** met en évidence l'impact direct du matériau de couverture d'une serre sur les pertes thermiques et les besoins en chauffage. Les matériaux simples, tels que le verre ordinaire ou le plastique, présentent les coefficients U les plus élevés (6,2 à 6,8 W/m².°C), entraînant d'importantes déperditions de chaleur. À l'inverse, l'acrylique rigide avec billes de polystyrène se distingue par un coefficient U de seulement 0,57, soit des besoins thermiques très faibles (0,0855 kWh), ce qui en fait le matériau le plus isolant.

Globalement, les doubles parois et les matériaux dotés d'une couverture thermique surpassent nettement les matériaux simples. Par exemple, le double polyéthylène avec couverture thermique atteint $2,5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, réduisant significativement les besoins de chauffage.

En conclusion, le choix du matériau influence considérablement la consommation énergétique de la serre et, par conséquent, la quantité de biogaz nécessaire à son chauffage.

III.7. Analyse de l'adéquation entre le potentiel énergétique du biogaz et les besoins thermiques de la serre

L'évaluation de la correspondance entre le potentiel énergétique du biogaz et les besoins thermiques de la serre indique clairement que l'énergie générée reste insuffisante pour satisfaire les exigences de chauffage, quelle que soit la configuration examinée. En effet, même dans le scénario le plus avantageux, à savoir en confrontant le potentiel énergétique maximal obtenu avec une teneur en méthane de 80 % (0,00692 kWh) aux besoins thermiques les plus réduits, correspondant à l'acrylique rigide associé à des billes de polystyrène (0,0855 kWh), l'écart persiste à 0,0786 kWh. Cela confirme que, même dans les conditions les plus optimistes, le biogaz produit ne peut couvrir qu'une portion minime des besoins thermiques de la serre.

Néanmoins, cet écart se réduit notablement lorsque l'on associe une teneur en méthane élevée à des matériaux présentant une forte capacité isolante, ces derniers permettant de diminuer la demande énergétique. Ainsi, l'amélioration de l'isolation thermique de la serre contribue directement à réduire cet écart et à renforcer la compatibilité entre la production énergétique du biogaz et les besoins de chauffage.

Cette analyse souligne donc que la valorisation énergétique du biogaz peut constituer une source d'énergie complémentaire pour le chauffage des serres, mais que son efficacité dépend étroitement à la fois du volume, de la qualité du biogaz produit, notamment sa teneur en méthane, et des performances thermiques des matériaux de couverture employés.

CONCLUSION
GENERALE
&
PERSPECTIVES

Conclusion générale & perspectives

Ce mémoire avait pour objectif d'évaluer la faisabilité de l'utilisation du biogaz issu de la valorisation de déchets organiques comme source d'énergie renouvelable pour le chauffage d'une serre agricole destinée à la culture de fruits tropicaux en Algérie. Pour répondre à cette problématique, une approche à la fois théorique, expérimentale et modélisatrice a été adoptée, articulée autour de trois axes complémentaires.

Sur le plan expérimental, la production de biogaz a été réalisée par digestion anaérobie d'épluchures de pomme de terre en présence de fumier de vache comme inoculum, selon un ratio substrat/inoculum de 1 :1, dans un réacteur de type discontinu maintenu à une température oscillante entre les régimes thermophile (50 °C) et mésophile (environ 25 °C la nuit). Le suivi du pH sur 30 jours a révélé une acidification initiale liée à la phase d'acidogenèse, corrigée efficacement par l'ajout de bicarbonate de sodium, permettant une stabilisation progressive des valeurs autour de 7,9, plage favorable à l'activité méthanogène. La production cumulée de biogaz a atteint 870 ml en fin d'expérimentation. Cette production a été caractérisée par une phase de démarrage lente, une période de stagnation entre les jours 16 et 25, puis une libération massive du biogaz piégé dans le digestat à la suite d'une agitation manuelle réalisée au jour 25. Ce dernier constat souligne l'importance cruciale de l'agitation dans l'optimisation des transferts de matière au sein du réacteur.

Sur le plan énergétique, l'évaluation du potentiel calorifique du biogaz produit, réalisée pour des teneurs en méthane variant de 50 à 80 %, a montré que le pouvoir calorifique inférieur évolue de 4,97 à 7,95 kWh/m³. Toutefois, compte tenu du volume de biogaz produit à l'échelle du laboratoire, l'énergie valorisable demeure extrêmement faible, oscillant entre 0,0043 et 0,0069 kWh. Par ailleurs, la modélisation thermique simplifiée de la serre a permis d'estimer les besoins en chauffage en fonction de différents matériaux de couverture. Les résultats indiquent que ces besoins varient de 0,0855 kWh pour l'acrylique rigide avec billes de polystyrène à 1,02 kWh pour le polycarbonate simple ondulé, pour une serre de 1 m³ soumise à un écart de température de 25 °C.

La confrontation entre le potentiel énergétique du biogaz et les besoins thermiques de la serre met en évidence un déficit énergétique à l'échelle du dispositif expérimental mis en œuvre. Le biogaz produit ne suffit pas, à lui seul, à couvrir les pertes thermiques de la serre, quelle que soit la nature du matériau de couverture envisagé. Néanmoins, cette conclusion ne remet pas en cause la pertinence de la filière biogaz comme source d'énergie complémentaire pour le chauffage des serres agricoles.

Conclusion générale & perspectives

En effet, cette inadéquation est directement liée à la dimension réduite du réacteur expérimental utilisé.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail ouvrent la voie à plusieurs perspectives d'amélioration susceptibles d'optimiser la production de biogaz et d'en renforcer le potentiel énergétique pour le chauffage de serres agricoles.

1. Utilisation d'un digesteur à plus grande échelle

L'une des principales limites de cette étude réside dans la taille réduite du réacteur utilisé, qui a conduit à des volumes de biogaz et des potentiels énergétiques très modestes. Le passage à un digesteur de plus grande capacité permettrait d'augmenter significativement les quantités de substrat traitées et, par conséquent, les volumes de biogaz produits. À une échelle semi-industrielle ou pilote, la production de biogaz pourrait atteindre des niveaux suffisants pour couvrir réellement les besoins thermiques d'une serre agricole, rendant ainsi le système énergétiquement viable et techniquement exploitable. Par exemple, l'utilisation d'un digesteur pilote de 10 m³ ou d'un digesteur agricole de plusieurs dizaines de mètres cubes permettrait de produire des quantités de biogaz nettement plus importantes que celles obtenues à l'échelle du laboratoire.

2. Utilisation d'un fumier bovin frais

Dans cette étude, le fumier de vache utilisé comme inoculum avait été collecté et conservé avant son emploi, ce qui peut entraîner une diminution de l'activité microbienne au fil du temps. L'utilisation d'un fumier bovin frais, prélevé directement à la ferme et introduit rapidement dans le digesteur, permettrait de disposer d'une charge microbienne plus élevée et plus active, notamment en bactéries méthanogènes. Cela favoriserait un démarrage plus rapide du processus de digestion anaérobie, une phase d'acclimatation réduite et, in fine, une production de biogaz plus précoce et plus soutenue tout au long de la fermentation.

3. Optimisation des conditions opératoires

Les conditions opératoires appliquées dans cette étude présentaient certaines imperfections susceptibles d'avoir limité les performances du processus. En particulier, l'alternance entre un régime thermophile le jour et une chute de température la nuit, due à l'extinction de la plaque chauffante, a introduit des variations thermiques défavorables à la stabilité de l'activité microbienne. Le maintien d'une température constante et contrôlée tout au long de la fermentation, idéalement dans la plage mésophile (35–40 °C) ou thermophile (50–

Conclusion générale & perspectives

55 °C), constitue une amélioration essentielle. De même, le remplacement de l'agitation manuelle ponctuelle par un système d'agitation mécanique continu ou programmé permettrait d'assurer une meilleure homogénéisation du milieu, d'éviter la stratification du digestat et de limiter les phénomènes de blocage de la production observés entre les jours 16 et 25 de l'expérimentation.

Références bibliographiques

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). Climate-smart agriculture. FAO.
2. Kapoor, R., Ghosh, P., Kumar, M., Sengupta, S., Gupta, A., Kumar, S. S., Vijay, V. K., Kumar, V., Kumar Vijay, V., & Pant, D. (2022). Biogas production systems and upgrading technologies: A review. *Bioresource Technology Reports*, 18, 101059.
3. Nakasone, H., & Paull, R. (1998). *Tropical fruits*. CABI Publishing.
4. Morton, J. (1987). *Fruits of warm climates*. Purdue University.
5. Vecteezy. (s.d.). Collection de fruits tropicaux exotiques entiers et coupés : pomme étoile, goyave, avocat, fruit du dragon, mangue, papaye, orange, style plat [Illustration vectorielle]. Vecteezy. <https://fr.vecteezy.com/art-vectoriel/4672872-collection-de-fruits-tropicaux-exotiques-entiers-et-coupees-pomme-etoile-goyave-avocat-fruit-du-dragon-mangue-papaye-orange-style-plat>.
6. Food and Agriculture Organization. (s. d.). *Tropical fruits compendium*. FAO.
7. Taiz, L., & Zeiger, E. (s. d.). *Plant physiology and development*. Sinauer.
8. Magnific. (s.d.). Serre agriculture [Photographie]. Magnific. <https://www.magnific.com/fr/photos-vecteurs-libre/serre-agriculture/18>
9. Intent24. (s.d.). Serre adossée [Photographie]. Intent24. <https://www.intent24.fr/serre-jardin/serre-adossee/gfpv00748.html>
10. Dreamstime. (s.d.). Construire une serre [Photographie]. Dreamstime. <https://fr.dreamstime.com/photos-images/construire-une-serre.html>
11. Food and Agriculture Organization. (s. d.). *Greenhouse vegetable production guide for the tropics*. FAO.
12. Nelson, P. V. (s. d.). *Greenhouse operation and management*. Prentice Hall.
13. Castilla, N. (s. d.). *Greenhouse technology and management*. CABI.
14. Von Zabeltitz, C. (s. d.). *Integrated greenhouse systems for mild climates*. Springer.
15. Shamshiri, R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., & Shad, Z. M. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture. *Biosystems Engineering*.
16. Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big data in smart farming – A review. *Agricultural Systems*.
17. Jones, H. G. (s. d.). *Plants and microclimate*. Cambridge University Press.
18. Zhang, Q. (s. d.). *Precision agriculture technology for crop farming*. CRC Press.
19. Kozai, T. (s. d.). *LED lighting for urban agriculture*. Springer.
20. Stanghellini, C., & Montero, J. I. (s. d.). Resource use efficiency in protected cultivation. *Acta Horticulturae*.
21. Both, A. J., Benjamin, L., Franklin, J., Holroyd, G., Incropera, F. P., Janes, H. W., &

- Kurtz,
R. (s. d.). *Guidelines for measuring greenhouse energy consumption*. ASABE.
22. Deublein, D., & Steinhauser, A. (s. d.). *Biogas from waste and renewable resources*. Wiley.
23. IEA Bioenergy. (s. d.). *Biogas handbook*. IEA Bioenergy.
24. Wikipédia. (2026). Biogaz. *Wikimedia Foundation*. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Biogaz>
25. Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of anaerobic digestion. *Progress in Energy and Combustion Science*.
26. Metcalf & Eddy. (s. d.). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery*.
27. Khanal, S. K. (s. d.). *Anaerobic biotechnology for bioenergy production*. Wiley.
28. Ryckebosch, E., Drouillon, M., & Vervaeren, H. (2011). Techniques for biogas upgrading.
Biomass and Bioenergy.
29. Petersson, A., & Wellinger, A. (s. d.). *Biogas upgrading technologies*. IEA Bioenergy.
30. Achebe, C., Nwoye, A., & Eze, J. I. (2017). Production de biogaz à partir du déchet de la pomme de terre. *ResearchGate*.

31. Westerholm, M., Moestedt, J., & Schnürer, A. (2021). Anaerobic digestion of animal manure and influence of organic loading rate and temperature on process performance, microbiology, and methane emission from digestates. *Frontiers in Energy Research*, 9, 740314.
32. Podmirseg, S. M., Oberauner-Wappis, L., Praegl, K., Etemadi-Shalamzari, M., Insam, H., & Knapp, B. A. (2019). Comparison of rumen and manure microbiomes and implications for the inoculation of anaerobic digesters. *MicrobiologyOpen*, 8(9), e00854.
33. Nasr, M., Tawfik, A., Ookawara, S., Suzuki, M., Kumari, S., & Bux, F. (2020). Effect of substrate to inoculum ratio on biogas yield during anaerobic digestion of food waste.
34. Luo, G., Johansson, S., Bok, K., Shen, L., Wu, Z., & Angelidaki, I. (2012). Simultaneous hydrogen utilization and in situ biogas upgrading in an anaerobic reactor. *Biotechnology and Bioengineering*, 109(4), 1088–1094.
35. Molleta, R. (2011). *La méthanisation*. Editions Tec & Doc.
36. Frédéric, S. (s. d.). Valorisation du biogaz. *Méthanisation.info*. Récupéré le 30 mai 2026, de <https://methanisation.info/valorisation.html>
37. Rasheed, A., Lee, J. W., & Lee, H. W. (2017). Development of a model to calculate the overall heat transfer coefficient of greenhouse covers. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 15(4), e0208.
38. Villeneuve, J. (2010). Le défi de l'énergie dans les serres. Région Centre, France. Cité dans : Horti Generation. (2025). Greenhouses and heat loss: Comparing insulation materials for greater efficiency.
39. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6e éd.). John Wiley & Sons.
40. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water Environment Federation (WEF). (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). American Public Health Association.
41. American Society of Agricultural Engineers. (2003). *Heating, ventilating and cooling greenhouses (ANSI/ASAE EP406.4)*. ASAE.
42. Al-Iraqi, A. R., Gandhi, B. P., Folkard, A. M., Barker, P. A., & Semple, K. T. (2024). Influence of inoculum to substrate ratio and substrates mixing ratio on biogas production from the anaerobic co-digestion of *Phragmites australis* and food waste. *BioEnergy Research*, 17(3), 1277–1287.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude et le dimensionnement d'une serre tropicale chauffée par un système biogaz issu de la digestion anaérobie de déchets organiques, en l'occurrence des épluchures de pomme de terre associées à du fumier de vache comme inoculum. Sur le plan expérimental, la production de biogaz a été réalisée dans un réacteur discontinu en verre, à un ratio substrat/inoculum de 1 :1, avec une température oscillante entre le régime thermophile (50 °C) le jour et mésophile (25 °C) la nuit. Le suivi du pH sur 30 jours a mis en évidence une acidification initiale corrigée par ajout de bicarbonate de sodium, permettant une stabilisation autour de 7,9. La production cumulée de biogaz a atteint 870 ml, avec un pic majeur au jour 25 consécutif à une agitation manuelle. L'évaluation énergétique a montré que le pouvoir calorifique inférieur du biogaz évolue entre 4,97 et 7,95 kWh/m³ pour des teneurs en méthane comprises entre 50 et 80 %, correspondant à un potentiel énergétique de 0,0043 à 0,0069 kWh à l'échelle du laboratoire. La modélisation thermique simplifiée de la serre, basée sur le coefficient de transfert thermique U, a permis d'estimer les besoins en chauffage entre 0,0855 kWh (acrylique avec billes de polystyrène) et 1,02 kWh (polycarbonate ondulé simple). La confrontation de ces résultats révèle un déficit énergétique à l'échelle du laboratoire. Néanmoins, à plus grande échelle, le biogaz issu de la valorisation de déchets organiques représente une source d'énergie renouvelable pertinente pour le chauffage des serres agricoles en Algérie.

Mots-clés : serre intelligente, bilan énergétique, fruits tropicaux et biogaz.

Abstract

This thesis focuses on the study and design of a tropical greenhouse heated by a biogas system derived from the anaerobic digestion of organic waste, namely potato peelings combined with cow manure as inoculum. From an experimental standpoint, biogas production was carried out in a batch glass reactor at a substrate-to-inoculum ratio of 1:1, with temperature alternating between thermophilic conditions (50 °C) during the day and mesophilic conditions (25 °C) at night. pH monitoring over 30 days revealed an initial acidification that was effectively corrected by adding sodium bicarbonate, stabilizing values around 7.9. Cumulative biogas production reached 870 ml, with a major peak on day 25 following manual stirring. The energy assessment showed that the lower heating value of biogas ranges from 4.97 to 7.95 kWh/m³ for methane contents between 50% and 80%, corresponding to an energy potential of 0.0043 to 0.0069 kWh at laboratory scale. Simplified thermal modelling of the greenhouse, based on the overall heat transfer coefficient U, estimated heating requirements between 0.0855 kWh (rigid acrylic with polystyrene beads) and 1.02 kWh (single corrugated polycarbonate). Comparing these results reveals an energy deficit at laboratory scale. Nevertheless, at a larger scale, biogas produced from the valorization of organic waste represents a relevant renewable energy source for heating agricultural greenhouses in Algeria.

Keywords: smart greenhouse, energy balance, tropical fruits, and biogas.

المخلص

تتناول هذه المذكرة دراسة وتصميم بيت محمي استوائي يتم تسخينه بواسطة نظام غاز حيوي ناتج عن الهضم اللاهوائي للنفايات العضوية، وتحديدًا قشور البطاطا مع روث البقر كـمُطْعَم. على الصعيد التجريبي، جرى إنتاج الغاز الحيوي في مفاعل دفعي زجاجي بنسبة ركيزة/مُطْعَم تساوي 1:1، مع تأرجح درجة الحرارة بين النظام الحراري الشديد (50 °م نهارًا) والنظام المتوسط (25 °م ليلاً). وقد كشفت تتبع درجة الحموضة (pH) على مدى 30 يومًا عن حدوث تـمـحـض أولي تم تصحيحه بإضافة بيكربونات الصوديوم، مما أتاح استقرار الوسط عند قيمة تقارب 7.9. بلغ الحجم التراكمي للغاز الحيوي المنتج 870 مل، مع تسجيل ذروة رئيسية للإنتاج في اليوم الخامس والعشرين إثر عملية تحريك يدوي. وأظهر التقييم الطاقوي أن القيمة الحرارية الدنيا للغاز الحيوي تتراوح بين 4.97 و7.95 كيلوواط ساعة/م³ لنسب ميثان تتراوح بين 50 و80%، وهو ما يعادل طاقة كامنة تتراوح بين 0.0043 و0.0069 كيلوواط ساعة على المستوى المخبري. كما أتاحت النمذجة الحرارية المبسطة للبيت المحمي، بالاعتماد على معامل انتقال الحرارة الكلي (U)، تقدير احتياجات التدفئة بين 0.0855 كيلوواط ساعة في حالة استعمال الأكرليك الصلب مع حبيبات البوليستيرين، و1.02 كيلوواط ساعة في حالة استعمال البولي كربونات الموجب البسيط. تكشف مقارنة هذه النتائج عن وجود عجز طاقي على المستوى المخبري، غير أن الغاز الحيوي المنتج من تـمـيـن النفايات العضوية يُعد، على نطاق أوسع، مصدرًا متجددًا للطاقة وملائمًا لتدفئة البيوت المحمية الزراعية في الجزائر.

الكلمات المفتاحية: الدفيئة الذكية، الحسابات الطاقية، الفاكهة الاستوائية، والغاز الحيوي.