

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université de Djilali Bounaama - Khemis Miliana



Faculté des Sciences et de la technologie
Département de la Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de

Master

En

Filière : Génie mécanique

Option : Energétique

Titre :

**ETUDE ET REALISATION D'UN DIGESTEUR
ANAEROBIQUE POUR LA PRODUCTION DE BIOGAZ**

Réalisé par :

SELMANE HEMZA

TIMTAOUCINE SADDAM

Encadré par :

Dr. KHELIDJ

Année Universitaire 2016/2017

Résumé :

Ce travail expérimental a pour objectif la valorisation de déchets organiques issus de l'élevage en général, et utilisés comme substrats pour la production de biogaz qui peut être exploitable pour un usage domestique dans une région non desservie. Notre installation est constituée d'une enceinte fermée de 500 litres qui fait office de digesteur, d'un système de stockage pneumatique de 120 litres de biogaz produit, et d'un bain-marie pour le chauffage du digesteur et le maintien de sa température stable. Les paramètres de la digestion anaérobie ont été suivis régulièrement. Le contrôle de la température est assuré par un thermostat mécanique et l'ajustement du pH de la solution est effectué par l'addition de l'eau de chaux afin de maintenir ses valeurs proches de 7. L'épuration est faite par passage du biogaz à travers de la chaux. Les premiers tests réalisés sur notre prototype montrent que notre système fonctionne et que le processus de bio-méthanisation est maîtrisé.

Mots-clés : Biogaz, Déchet organique, Digestat, Digestion anaérobie, Digesteur

Abstract:

This experimental work aims at the recovery of organic waste from livestock production in general and used as substrates for the production of biogas which can be exploited for domestic use in an unserved area. Our installation consists of a closed 500-liter enclosure that acts as a digester, a pneumatic storage system of 120 liters of biogas produced, and a water bath to heat the digester and maintain its temperature stable. The parameters of anaerobic digestion were monitored regularly. The temperature control is ensured by a mechanical thermostat and the adjustment of the pH of the solution is carried out by the addition of lime water in order to maintain its values close to 7. The purification is done by passing the biogas through lime. The first tests carried out on our prototype show that our system works and that the bio-mechanization process is under control.

Keywords: Biogas, Organic waste, Digestat, Anaerobic digestion, Digester

ملخص:

هذا العمل التجريبي يهدف لاستغلال النفايات العضوية و الزراعة بشكل عام وذلك لاستخدامها بمثابة ركائز لإنتاج الغاز الحيوي لتمكين من استغلاله للاستخدام المنزلي في المناطق غير مجهزة بمصادر الطاقة. يوجد لدينا نظام يتكون من غرفة مغلقة من 500 لتر الذي يعمل هاضم نظام تخزين الإطارات من 120 لتر من الغاز الحيوي المنتج والموضوع داخل حمام مائي لتسخين الهاضم والحفاظ على درجة الحرارة مستقرة. تم رصد معلومات الهاضم اللاهوائي بانتظام. ومن أجل ضمان التحكم في درجة الحرارة نقوم باستعمال ترموستات ميكانيكية وكذلك لضبط درجة الحموضة نقوم بإضافة ماء الجير من أجل الحفاظ على قيمها ثابتة 7 وللقيام بتنقية الغاز الحيوي نقوم بتمريره من خلال ماء الجير. يتم التحكم في التجارب الأولى من النموذج المصنوع الذي يكون مشغل وتكون عملية الميثان الحيوي تم التحكم فيها.

كلمات البحث: الغاز الحيوي، النفايات العضوية، الهضم، الهاضم اللاهوائي، الهاضم.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A ma famille et à tous mes amis

Selmane Hemza

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à la lumière de ma vie : mes très chers parents qui m'ont soutenu et encouragé durant toute ma scolarité.

- ❖ A mes frères et sœurs
- ❖ A mes oncles
- ❖ A mes grand parents
- ❖ A toute ma grande famille
- ❖ A mes très chers amis
- ❖ A tous les étudiants du département de génie mécanique.
- ❖ A tous mes collègues de travail

Timtaoucine Saddam

Remerciements

D'abord, nous remercions «Dieu le tout puissant» de nous avoir donné le courage et la patience pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre sincère et profonde reconnaissance à notre promoteur le Dr B.KHELIDJ pour sa patience avec nous, et pour la confiance qu'il nous a accordée tout au long de ce travail.

Nous remercions également tous les membres du jury qui ont accepté de juger ce modeste travail.

Nous remercions également à Mr ABDELKRIME SELMANE.

Nous exprimons notre gratitude à l'ensemble des enseignants de la faculté des Sciences et de la Technologie de l'Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana et en particulier ceux du département de génie mécanique.

Enfin, nous remercions tous ceux qui de près ou de loin ont participé à l'enrichissement de ce mémoire.

Sommaire

Dédicaces

Remerciements

Résumés

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE - I : ETAT DE L'ART SUR LE BIOGAZ

Introduction 2

1. Généralités sur le biogaz 2

1.1. Définition 2

1.2. Les sources de production 2

1.3. Utilisation du biogaz 2

1.4. Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) 3

2. Les avantages du biogaz 4

2.1. Une voie de valorisation possible des déchets 4

2.2. Une énergie renouvelable et stockable 5

2.3. Bilan carbone associé à la production de biogaz 5

3. Vue d'ensemble 7

3.1. Le biogaz dans le monde 7

3.2. Le biogaz en Algérie 8

CHAPITRE - II : LA PRODUCTION DE BIOGAZ

1. Le passage de la biomasse au biogaz : la méthanisation 11

1.1 Processus chimique : la biodégradation 11

1.2. Du déchet au biogaz : L'influence de la source 12

2. Choix d'un digesteur 13

2.1. Décomposition naturelle sans traitement 13

2.2. Amélioration : un digesteur mécanisé 14

Sommaire

3. Purification du biogaz	15
3.1. Elimination de l'eau	15
3.2. Elimination d'H ₂ S, des siloxanes et des COV	15
3.3. Conclusion sur la purification	16
4. Les utilisations du biogaz purifié	16
4.1. La Cogénération	16
4.2. La séparation CH ₄ /CO ₂ pour produire du méthane gazeux	18
4.3. La séparation par cryogénie : production de méthane liquéfié	19
4.4. Comparatif des méthodes de séparation CH ₄ /CO ₂	20
5. La valorisation des Co-produits	22
5.1. Valorisation du digestat	22
5.2. Valorisation du CO ₂	23
CHAPITRE - III : ETUDE THEORIQUE D'UN DIGESTEUR	
Introduction	26
1. Etude des déperditions thermiques du digesteur	26
1.1. Étude en régime permanent	26
1.2. Étude en régime variable	33
2. Notion de brassage	36
3. Dimensionnement de l'installation	37
3.1. calcul du volume de gazomètre	37
3.2. calcul du volume du réservoir	37
3.3. dimensionnement des conduits d'entrée de sortie	38
3.4. dimensionnement de la conduite à gaz	39

CHAPITRE - IV : ETUDE EXPERIMENTALE

Sommaire

Introduction :	40
Partie _ A:Etude en digesteur rudimentaire	40
A – 1. Matériel et méthodes	40
A - 1.1. Dispositif expérimental	40
A - 1.2. Paramètres de la fermentation	42
A – 2. Résultats et discussion	44
A – 2.1. Effet de la masse du substrat sur l'évolution de la température	44
A – 2.2. Effet de la nature du substrat sur l'évolution de la température	45
A – 2.3. Effet de l'isolation du digesteur sur l'évolution de la température	46
Partie_B: Etude en digesteur plus évolué	48
B – 1. Matériel et méthodes	49
B - 1.1. Dispositif expérimental	49
B - 1.2. Paramètres de la fermentation	50
B – 2. Résultats et discussion	51
B – 2.1. Volume de biogaz produit en fonction du temps	51
B – 2.2. Volume de biogaz produit en fonction du temps et de la température	54
B – 2.3. Mesure de la proportion de CH ₄ dans le biogaz produit	55
B – 2.4. Estimation de pH	55
B – 2.5. Evolution des températures de l'humidité	56
CONCLUSION	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIES	
ANNEXES	

Liste des tableaux

		Page
Tableau I-1 :	Tableau comparatif de la composition et de PCI entre différent type de biogaz et le gaz naturel	3
Tableau II-1 :	Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients de cogénération	16
Tableau II-2 :	Tableau comparatif des différentes techniques de séparation CH ₄ /CO ₂	21
Tableau A1-1 :	Tableau récapitulatif des différentes impuretés présentes dans le biogaz brut, leurs origines et leurs conséquences	A1
Tableau A1-2:	Proportion de H ₂ S dans le biogaz en fonction de sa provenance	A1
Tableau A1-3:	Composition molaire d'un biogaz en fonction de sa provenance	A1
Tableau A1-4 :	Proportions de gaz et de métaux dans le biogaz et le digestat en fonction de la provenance	A1
Tableau A3-1 :	Tableau de différentes technologies disponibles	A3
Tableau A3-2 :	Comparatif des différentes technologies disponibles	A3
Tableau A7-1:	Tableau des potentiels de stockage	A7

Liste des figures

	Page
Figure I-1 : Comparatif énergétique	3
Figure I-2 : Le cycle du carbone	4
Figure I-3 : Cycle de valorisation des déchets	4
Figure I-4 : Part des secteurs d'activités responsable des émissions des gaz à effet de serre en Algérie	5
Figure I-5 : Coefficient potentiel de réchauffement global à 100 ans	6
Figure I-6 : Bilans en histogrammes des émissions empêchées grâce à la méthanisation dans le cas d'une ferme	6
Figure I-7 : Répartition des contributions de chacune des régions	7
Figure II-1 : Schéma de principe du processus de biodégradation	11
Figure II- 2: Couverture nénufar à la ferme de Grignon	12
Figure II- 3: Différents types de digesteurs	13
Figure II- 4: Schéma de principe de la cogénération	16
Figure II- 5: Schéma de présentation générale de la membrane de séparation	17
Figure II- 6: Etapes du procédé Cryo-Pur	19
Figure II- 7: Répartition (%) en nombre d'unités existantes des techniques utilisées (données chiffrées)	20
Figure III-1 : Flux thermique à travers un mur monocouche	27
Figure III-2: Flux thermique à travers un cylindre creux	27
Figure III-3: Représentation symbolique d'un flux thermique	27
Figure III-4: Schéma des flux de conductions et convections surfaciques	29
Figure III-5: Schéma électrique équivalent (les encadrés précisent les surfaces d'échanges)	29
Figure III-6 : Résistances en parallèle	30
Figure III-7 : Schéma électrique simplifié	31

Liste des figures

Figure III-8:	Schéma électrique équivalent en régime variable	34
Figure IV-1 :	Effet de la masse du substrat sur la production du biogaz	40
Figure IV-2 :	Effet de la nature du substrat sur la production du biogaz	41
Figure IV-3 :	Effet de l'isolation du digesteur sur la production du biogaz	42
Figure IV-4 :	Effet du chauffage du digesteur sur la production du biogaz	42
Figure IV-5 :	Effet de la masse des déchets d'abattoir sur l'évolution de la température	44
Figure IV-6 :	Effet de la masse d'un mélange de déchets sur l'évolution de la température	45
Figure IV-7 :	Effet de la nature du substrat sur l'évolution de la température	45
Figure IV-8 :	Effet de l'isolation du digesteur sur l'évolution de la température	46
Figure IV-9 :	Effet de l'isolation du digesteur sur l'évolution de la température	47
Figure IV-10:	Relevé des températures des bouteilles isolées	48
Figure IV-11 :	Relevé des températures des bouteilles non isolées	48
Figure IV-12:	Dispositif expérimental formé de 3 digesteurs	49
Figure IV-13 :	Dispositif expérimental plus évolué	50
Figure IV-14 :	Relevé de volume pendant 8 jours à $T_{int}= 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	51
Figure IV-15 :	Relevé de température et de volume pendant 8 jours à $T_{int}= 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	52
Figure IV-16 :	Relevé de volume pendant 8 jours à $T_{int}= 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	52
Figure IV-17 :	Relevé de température et de volume pendant 8 jours à $T_{int}= 35\text{ }^{\circ}\text{C}$	53
Figure IV-18 :	Relevé de volume pendant 8 jours à $T_{int}= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	53
Figure IV-19 :	Relevé de température et de volume pendant 8 jours	54

Liste des figures

à $T_{int}= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Figure IV-20 :	volume de biogaz produit en fonction du temps	54
Figure IV-21 :	remplissage d'une seringue de 30 ml de biogaz est 30 ml d'eau de chaux	55
Figure IV-22 :	agitation de l'ensemble des deux produits	55
Figure IV-23 :	prélèvement d'un échantillon de solution	55
Figure IV-24 :	mesure de Ph dans l'échantillon de la solution	55
Figure IV-25 :	Evolution de température et de l'humidité	56
Figure A2-1 :	Schéma de principe de l'épuration biologique.	A2
Figure A3-1 :	Renedement en fonction de puissance	A3
Figure A3-2:	Renedement en fonction de puissance	A3
Figure A3-3:	Rendements thermique en fonction du rendement électrique	A3
Figure A4-1:	Vitesse de perméation de différents gaz	A4
Figure A4-2:	Mécanisme d'épuration membranaire	A4
Figure A4-3:	Installation Air Liquide pour la purification de biogaz à la ferme de Chaumes-en-Brie	A4
Figure A5-1:	Croissance du CO ₂ solide sur un échangeur de chaleur à basse température	A5
FigureA5-2 :	Captage de CO ₂ par anti sublimation	A5
Figure A5-3:	Diagramme d'équilibre liquide-vapeur du CH ₄	A5
Figure A6-1:	Evolution de temperature d'antisublimation du CO ₂ en fonction de fraction molaire	A6
Figure A6-2:	Diagramme binaire CH ₄ /CO ₂ à 30 bars	A6
Figure A7-1:	Schéma de principe	A7
Figure A9-1:	Evolution du coût de transport du CO ₂ par gazoduc sur terre et en mer sur une distance fixée de 250 km en fonction du débit massique	A9
Figure A9-1:	Evolution du coût de transport de CO ₂	A9

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
B₀ :	Potentiel méthanogène	L de CH ₄ / kg de MO
D :	Diamètre de cylindre creux	m
E :	Épaisseur	m
J :	Perte de charge	W
G:	Biogaz produit par jour	m ³ g / j
K :	Constante d'inhibition	
L :	Distance	m
P_v :	Production volumique : production de biogaz par m ³ de fermenteur / jour	m ³ g/m ³ f.j
φ :	L'énergie thermique	W
Q :	Le débit	kg/h
r₁, r₂ :	Rayons d'un cylindre creux	m
R_{th} :	Résistance thermique	°C/W
R_{SE} :	Résistance surfacique externe	k.W ⁻¹
R_b :	Résistance thermique	k.W ⁻¹
R_h :	Résistance thermique	k.W ⁻¹
R_{tot} :	Résistance totale	k.W ⁻¹
S :	Surface	m ²
S_d :	Surface de disque	m ²
S_c :	Charge volumique	kg(MS,MO, DCO) /m ³ i
S_p :	Surface intérieure	m ²
T :	Température	°C
T₁ :	Température d'entrée	K
T₂ :	Température de sortie	K
V :	Volume utile	m ³

Nomenclature

VD :	Volume du réservoir	m^3
ΔT:	Variation de température	
ΔQ :	L'énergie perdue	J
μm:	Coefficient cinétique (taux de croissance journalier des microorganismes)	J^{-1}
λ :	Conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
φ :	Flux thermique	W
ρ :	La masse volumique	kg/m^3

Liste d'abréviation

AGV :	Acides Gras Volatils
BTP :	Bâtiment Travaux Public
COV :	Composés Organiques Volatiles
EH:	Equivalent Habitant
GES:	Gaz à effet de serre
GNL :	Gaz Naturel Liquéfié
MO :	Matière organique
MS :	Matière sèche
PRG:	Potentiel de Réchauffement Global
pH :	Potentiel d'hydrogène
PCI :	Pouvoir calorifique inférieur
TRH:	Temps de rétention hydraulique moyen de l'effluent dans le réacteur $=V/Q$

Introduction

Dans le cadre du développement des énergies renouvelables, la méthanisation recèle un potentiel important par sa double capacité de valorisation énergétique des déchets organiques et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Pourtant, si le procédé de méthanisation est utilisé dans le nord de l'Europe depuis de nombreuses années, il a connu dans d'autres pays un développement très mesuré et principalement axé sur le secteur des boues d'épuration urbaines et industrielles.

Aujourd'hui, pour lutter contre l'effet de serre et pour développer des énergies renouvelables, ce procédé fait l'objet d'un fort regain d'intérêt surtout dans le monde agricole, dans certains pays par des politiques d'incitation financière.

En Algérie, la méthanisation des déchets est toujours à l'état d'expérimentation. Et pourtant malgré les richesses en hydrocarbures l'approvisionnement en combustible reste l'un des problèmes des régions non desservies. Pour répondre à ces besoins en énergie, la recherche et le développement de nouvelles sources énergies produites localement, et en particulier le biogaz sont plus que jamais d'actualité.

Afin d'apporter notre contribution à la maîtrise du processus de bio-méthanisation pour la valorisation des déchets organiques, nous avons conçu et testé un prototype de digesteur anaérobique. Ce dernier est réalisé dans le but de construire un banc d'essai pédagogique qui peut servir aux travaux pratiques des étudiants en énergétique.

Le mémoire présenté ici s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre est une généralité sur le biogaz. Nous présentons entre autre, dans ce dernier, une synthèse des travaux sur la bio-méthanisation.

Le deuxième chapitre, est consacré à l'étude de la production du biogaz. Nous présentons la méthanisation, y compris comment choisir un digesteur et comment purifier le biogaz.

Le chapitre trois est consacré à l'étude thermique d'un digesteur anaérobique afin d'évaluer les pertes calorifiques par les parois de notre prototype.

Dans le chapitre quatre nous présentons les résultats expérimentaux obtenus sur notre prototype de bio-digesteur anaérobique.

Introduction

Enfin nous terminons ce travail par une conclusion finale, qui résume les résultats des tests pratiques ainsi que les perspectives futures.

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'état de l'art sur le biogaz. Il donne un aperçu général sur ce dernier. De même, nous présentons dans ce chapitre, entre autre une synthèse des travaux sur la bio-méthanisation.

1. Généralités sur le biogaz

1.1. Définition

Le biogaz est issu de la fermentation de matières organiques, animales ou végétales, en l'absence d'oxygène. Ce processus, aussi appelé méthanisation, a lieu spontanément dans les décharges stockant des déchets organiques par exemple, ou artificiellement dans des digesteurs. Dans ces derniers peuvent être traités des déchets agricoles ou des boues issues de station d'épuration.

Le biogaz est composé majoritairement de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2) qui représente respectivement entre 45 et 75% du volume pour l'un et entre 20 et 55% du volume pour l'autre.

Il contient également des impuretés, comme des siloxanes ou du sulfure d'hydrogène (H_2S) [A1] [A2].

1.2. Les sources de production

Les matières organiques permettant le processus de méthanisation ont différentes origines : déchets de l'industrie agro-alimentaire, boues des stations d'épuration, déchets de l'agriculture et de l'élevage, ou déchets de tout type issus de décharges.

1.3. Utilisation du biogaz

En l'absence d'exploitation humaine, la fermentation des déchets relâche Nécessairement du biogaz donc du méthane, possédant un Potentiel de Réchauffement Global (PRG) 21 fois supérieur à celui du CO_2 [A2].

En pratique, il est brûlé en torchère pour relâcher du CO_2 plutôt que du CH_4 .

Mais il est possible de valoriser ce biogaz, selon les différentes utilisations suivantes : Production de chaleur seule pour les installations à proximité, production d'électricité seule, les deux à la fois (on parle alors de cogénération), injection de bio méthane dans le réseau de gaz naturel, transformation en carburant, valorisation pour l'industrie chimique ou encore production de dihydrogène (H_2).

1.4. Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI)

Le PCI est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible. Le (tableau I-1) permet de mettre en relation la composition moyenne du gaz naturel et son PCI.

Les propriétés énergétiques du biogaz brut en sortie de digesteur par exemple sont donc bien moins intéressantes que celles du gaz naturel. En revanche, les propriétés du méthane pur sont équivalentes. L'idée est donc de purifier le biogaz brut pour améliorer notamment son PCI et obtenir des propriétés comparables à celles du gaz naturel. De manière générale, le bio méthane issu du biogaz purifié est compétitif avec les autres sources d'énergie. La (figure I-1) donne les équivalences énergétiques d'un m³ de bio méthane.

Tableau I-1 : Tableau comparatif de la composition et du PCI entre différent type de biogaz et le gaz naturel.

	Biogaz 1 (ordure ménagères)	Biogaz 2 (agro-alimentaires)	Gaz naturel moyen	Méthane
Composition	60%CH ₄ 33%CO ₂ 1%N ₂ 0%O ₂ 6%H ₂ S	68%CH ₄ 26% CO ₂ 1%N ₂ 0%O ₂ 5%H ₂ S	95.0%CH ₄ 4.2%C ₂ 0.3%C ₃ 0.1%C ₄ ⁺ 0.4%N ₂	100%CH ₄
PCI (kWh/Nm³)	6.0	6.8	10.2	10.1

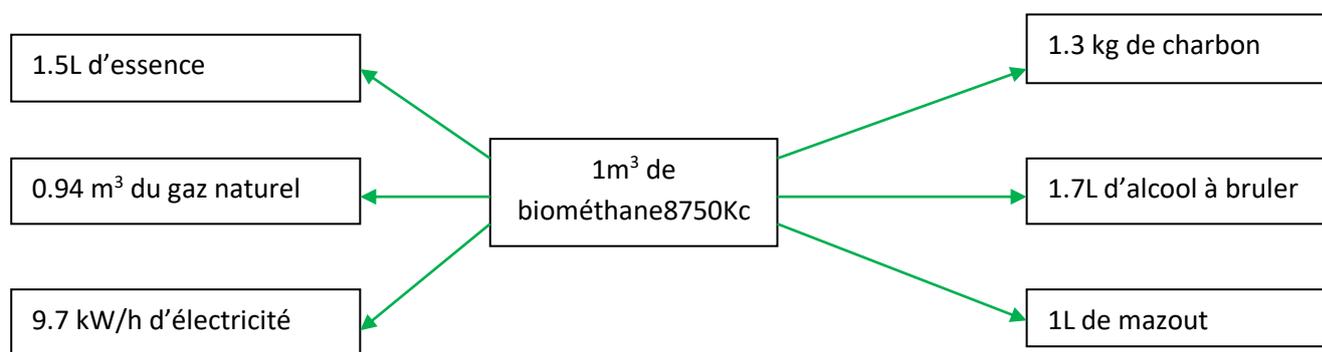


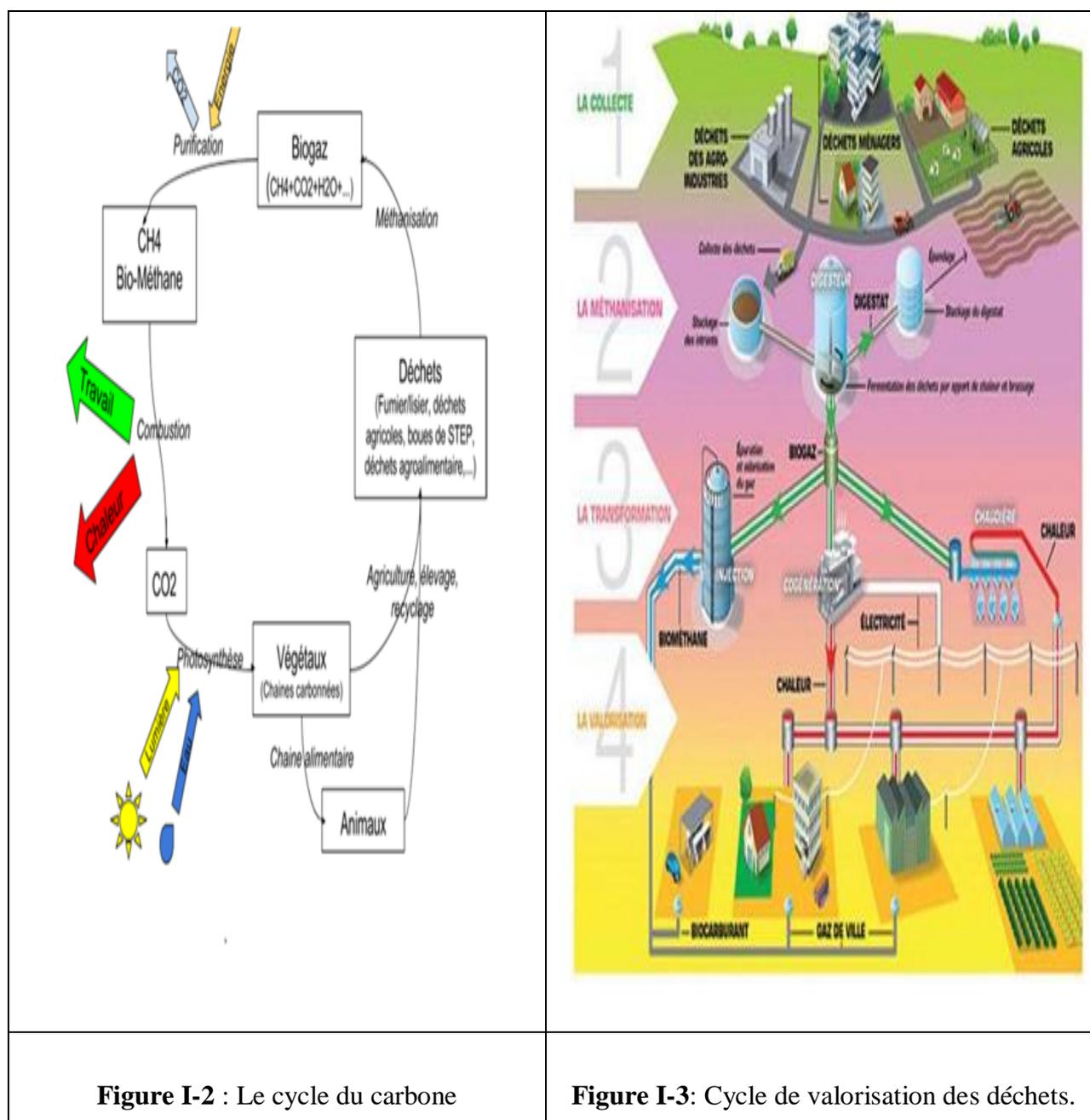
Figure I-1 : Comparatif énergétique

2. Les avantages du biogaz

2.1. Une voie de valorisation possible des déchets

La valorisation des déchets par la production de biogaz présente un double avantage comme le montre la (figure I-2).

D'une part, la production de biogaz permet une valorisation de nos déchets (ménagers, agricoles) et des boues de stations d'épuration, sous forme de vecteur énergétique comme le montre la (figure I- 3). D'autre part, le digestat (résidu solide issu de la méthanisation) est une matière fertilisante plus concentrée en éléments fertilisants (azote par exemple), ce qui facilite et accélère son assimilation par les plantes



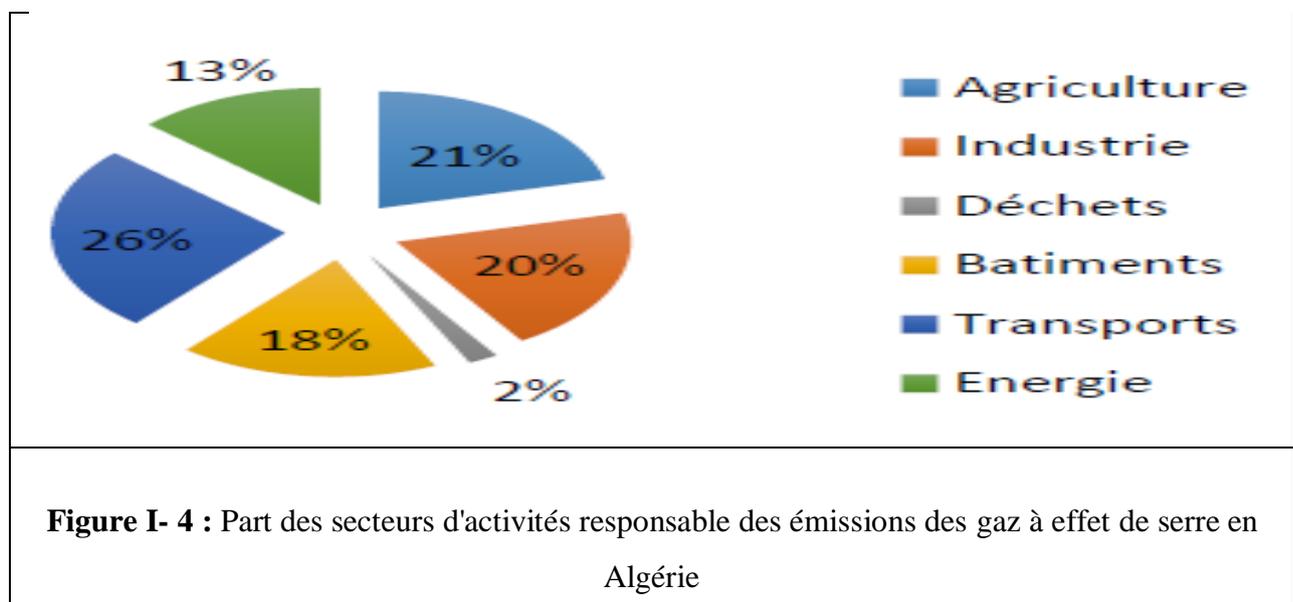
2.2. Energie renouvelable et stockable

La production de biogaz permet d'obtenir une énergie stockable, ce qui n'est pas le cas de la plupart des autres énergies renouvelables. Son avantage est de lisser la production d'énergie pour mieux s'adapter à la consommation.

2.3. Bilan carbone associé à la production de biogaz

Le réchauffement climatique est aujourd'hui au cœur de toutes les préoccupations, particulièrement dans le contexte brûlant de la COP 21. Il est donc nécessaire de trouver des solutions afin de réduire drastiquement l'impact anthropique sur le climat. Tout comme le secteur des transports et de l'industrie, l'agriculture joue un rôle important dans l'émission de gaz à effet de serre (GES). Ces émissions peuvent être dues à la production des fourrages, au chauffage, ou bien à la fermentation des déjections animales (pour l'élevage) ou à l'utilisation des engrais et carburant, pour l'agriculture. Si les installations agricoles dégagent moins de CO₂ dans l'atmosphère, c'est le protoxyde d'azote (N₂O) qui contribue fortement aux émissions de GES pour le secteur agricole [A6].

L'impact "effet de serre" engendré par une activité ou un produit peut être évalué par son empreinte carbone. Il s'agit de la quantification des émissions de GES exprimée pour les différents gaz en équivalent CO₂, et observée aux différentes étapes de la fabrication du produit

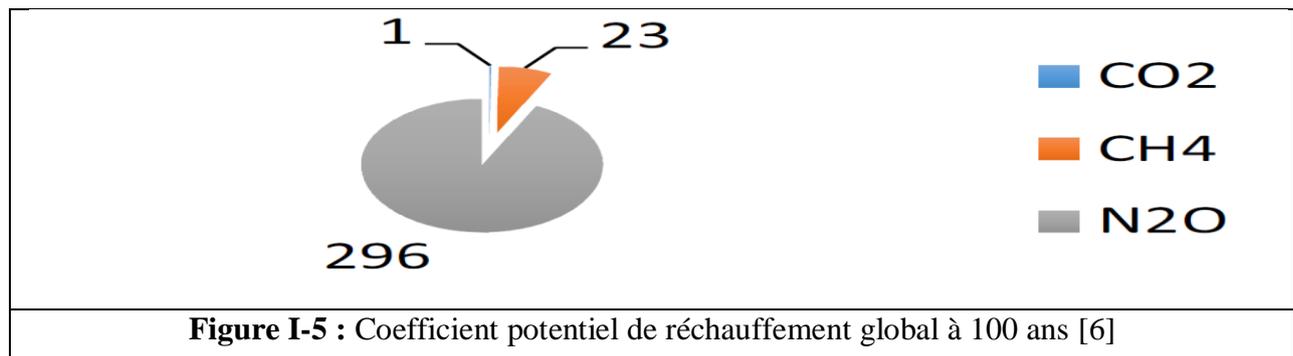


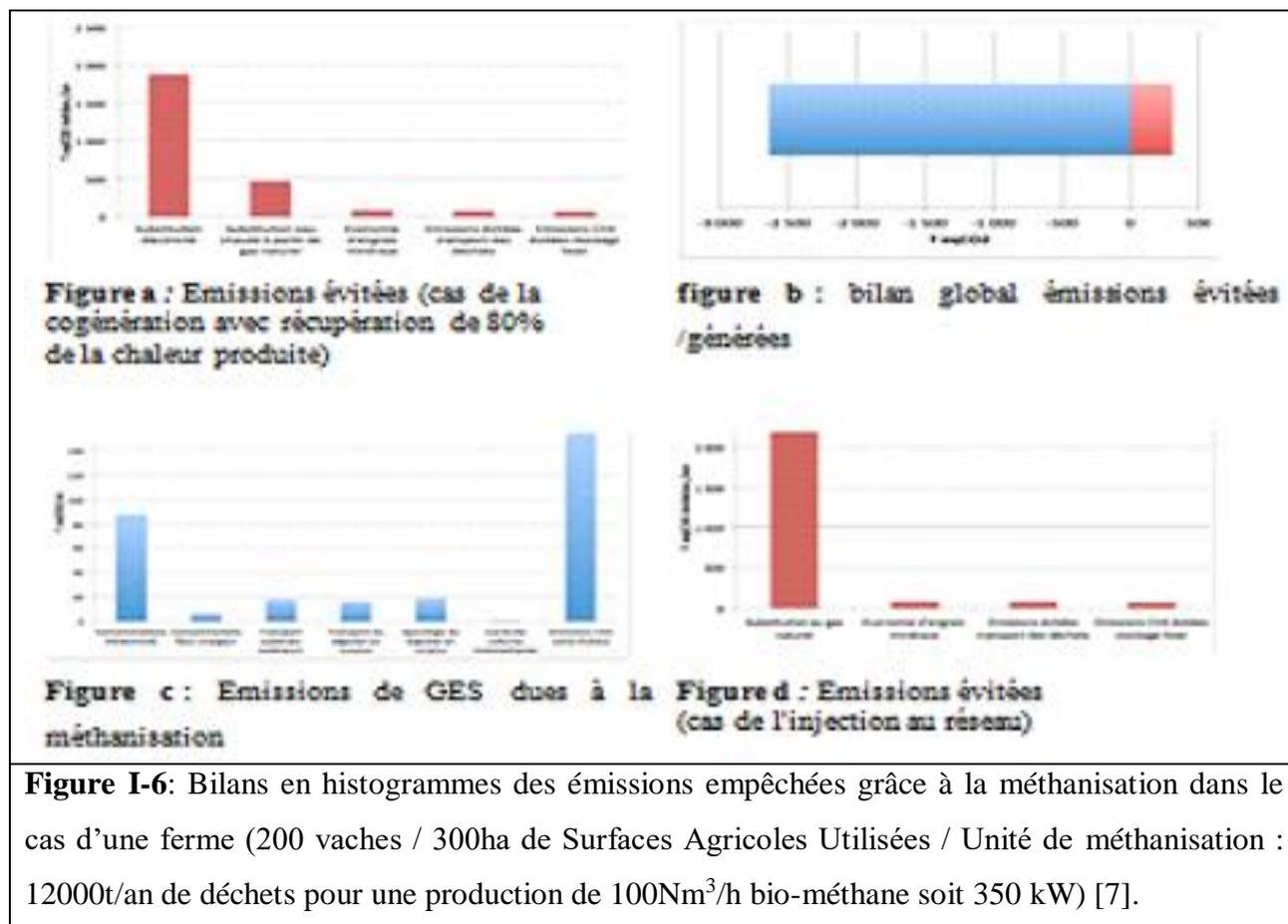
Les GES sont principalement : le CO₂, CH₄, N₂O la vapeur d'eau (H₂O) et l'ozone (O₃). On compare ces différents gaz en fonction de leur PRG (Potentiel de Réchauffement Global). Ce

dernier est utilisé pour prédire les impacts des gaz sur le réchauffement climatique en se basant sur leurs propriétés radiatives et leur durée de vie.

Depuis quelques années, de plus en plus d'agriculteurs font le choix de produire du biogaz, en récupérant les déchets organiques et en les laissant fermenter dans des digesteurs. Cette méthanisation empêche alors les rejets de méthane et de CO₂ directement dans l'atmosphère et contribue donc à réduire les émissions de GES.

Néanmoins, l'installation d'une unité de biogaz engendre un certain nombre de nouvelles émissions. Si l'on suit la chaîne de production, on peut citer par exemple la construction du digesteur (BTP, transport routier, etc.), le transport des déchets jusqu'au méthaniser, l'énergie à fournir pour le maintenir à la bonne température ou encore le CO₂ issu de la méthanisation et rejeté dans l'atmosphère. Sur ce dernier point, on peut cependant noter qu'il ne s'agit pas d'émissions d'origine fossile : elles font au contraire partie du cycle "naturel" du carbone et ne doivent donc pas être prises en compte. En revanche, le méthane récupéré grâce à l'installation d'une unité de biogaz joue un rôle déterminant dans la réduction des émissions de GES.



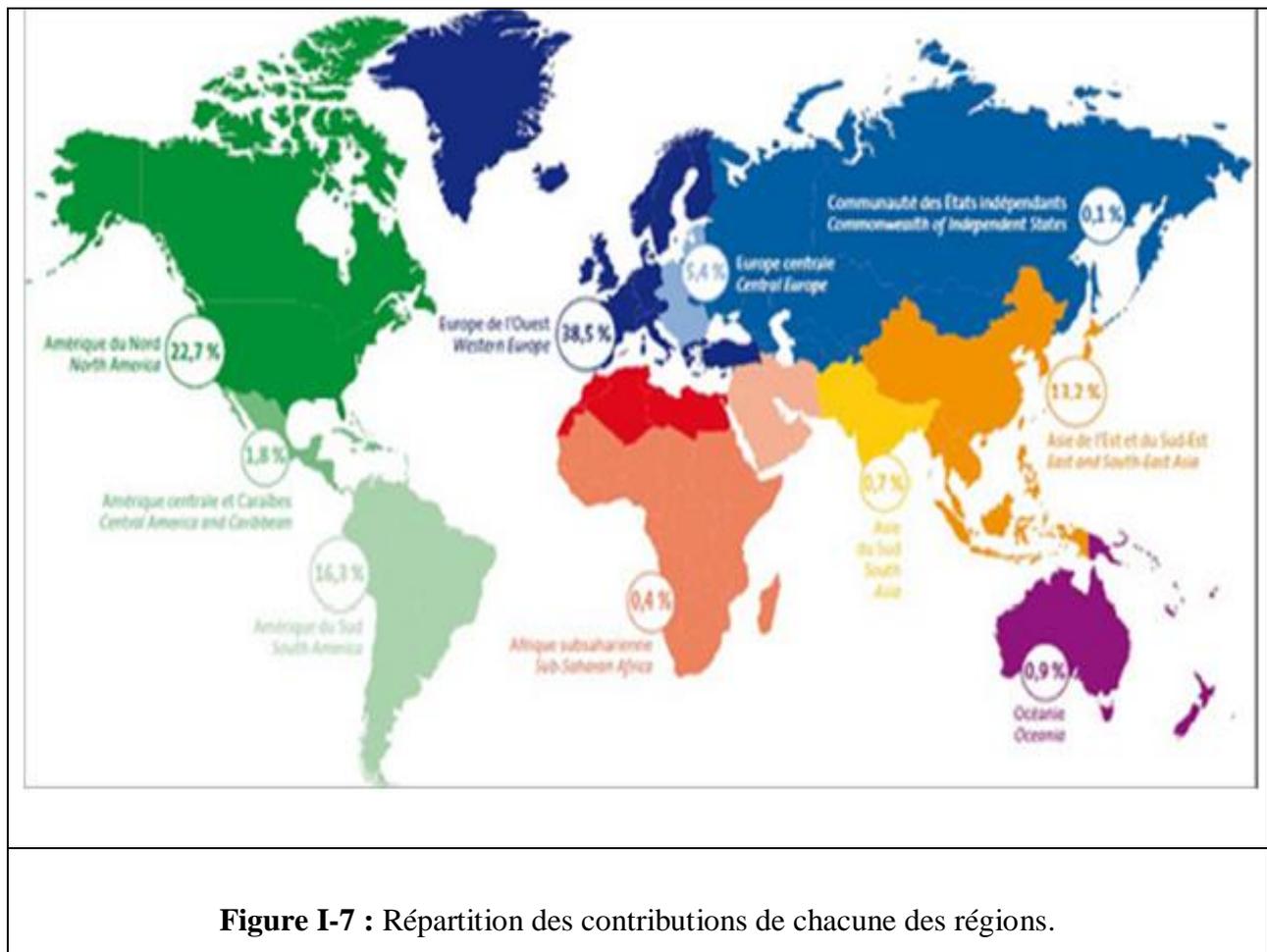


3. Vue d'ensemble

3.1. Le biogaz dans le monde

Les ressources mondiales de biogaz s'élèvent à 1800Mtep/an, ce qui équivaut à la consommation mondiale annuelle en gaz naturel. Si cette source d'énergie est difficilement valorisable dans sa totalité puisque trop dispersée et parfois peu récupérable, dans le cas des petites installations agricoles par exemple, le potentiel valorisable est compris entre 100 et 300Mtep/an.

Aujourd'hui, seulement 0.5% du potentiel global est exploité. Malgré tout, ce secteur connaît un fort développement [A3]. La (figure I-7) représente la répartition des contributions de chacune des régions mondiales pour la production de biogaz



Bien que l'Union Européenne soit le siège de près de 40% de la production mondiale du biogaz, les Etats-Unis, le Canada et quelques pays asiatiques (Chine, Japon, Corée du Sud) ont vu également s'installer des unités de méthanisation dès le début des années 2000. Par ailleurs, les projets de production du biogaz concernent aussi les pays en voie de développement : c'est le cas du Ghana et du Cameroun, par exemple [8].

L'objectif serait, à terme, de remplacer les ressources actuelles par le biogaz pour l'éclairage et la cuisine, tout en utilisant le digestat en tant qu'engrais naturel [9] [10].

3.2. Le biogaz en Algérie

L'utilisation du biogaz en Algérie remonte à 1940. Son exploitation avait permis la mise en marche des phases et des bouées qui ont illuminés toute la côte algérienne. C'est surtout grâce aux travaux de deux chercheurs DUCCELLIER et ISMAN que ce biocombustible convertible en toute forme d'énergie (chaleur, électricité, carburant etc. ...) a été exploité. Un premier digesteur fut construit à l'institut National Agronomique d'EL Harrach et en 1948 on assiste à la mise en marche de la première voiture expérimentale au niveau africain. L'année d'après ; 8 cuves de 40 m³ furent construites et produisirent jusque dans les années 1960 près de 30000m³ de bio

méthane par an. Le substrat de digestion était récupéré du cheptel qui comptait 15 bovins, 12 chevaux et 25 porcs produisant en moyenne 260 tonnes de fumier par an. Le gaz produit servait pour la cuisine de l'internat (200 élèves), pour les besoins du laboratoire et de 2 tracteurs.

En 1951, ces mêmes auteurs ont conçu un tracteur "Caterpillar" dont le moteur présentait une puissance supérieure à celui fonctionnant à l'essence. Un autre digesteur, constitué de 3 cuves de 14 m³, non enterrées en béton mince vibré et armé a été construit en 1953 à L'Ecole d'Agriculture de Guelma. Le biogaz était à usage domestique, (cuisine et chauffage de l'école qui comptait près de 80 personnes).Après l'indépendance. Cette technologie a été malheureusement abandonnée au profit de l'énergie fossile alors qu'en parallèle elle s'est développée, dans les pays voisins que ce soit en Tunisie, au Maroc et même dans les autres pays africains (Burkina, Mali, Niger, Sénégal...).

En effet, On dénombre actuellement en Tunisie plus d'une cinquantaine de digesteurs familiaux. Les eaux usées de la ville d'Agadir (Maroc) sont traitées par méthanisation et le biogaz produit sert de carburant pour les pompes et les tracteurs. D'ailleurs le jardin du roi est arrosé par ces eaux épurées. En ce qui nous concerne, ce n'est qu'en 1984 que le Centre des Equipements Solaires de Bouzaréah (actuellement le Centre de Développement des Energies Renouvelables) a relancé les recherches dans ce domaine à travers la réalisation d'un digesteur pilote à Bouzaréah et de deux autres, l'un à Igli (Bechar) et l'autre au parc Zoologique de Ben Aknoun. Ce sont les premières tentatives de la Division Bioénergie et Environnement.

Les activités se sont concrétisées par la conception et la réalisation d'un premier digesteur de 800 litres puis d'un second de 70 litres. La bouse de vache est utilisée comme substrat. Cette première approche vise l'autonomie énergétique des zones agricoles et isolées.

En effet face à l'immensité de notre pays plusieurs localités restent éloignées des centres de distribution énergétique. Le biogaz constituerait un très bon substitut au bois de chauffe et un important soutien aux programmes nationaux de lutte contre la déforestation et la désertification

Le digestat récupérée serait d'un apport certain pour l'émergence de l'agriculture de montage et vivrière contribuant ainsi à l'amélioration des conditions de vie des populations isolées dans le cadre d'un développement durable.

Par ailleurs, l'utilisation de la bio-méthanisation pour le traitement et la valorisation énergétique des effluents industriels et des déchets urbains est une orientation qui nous permettrait de solutionner le problème des déchets organiques et d'assainir l'environnement.

Enfin, le recours au biogaz en Algérie n'est aucunement une action dérisoire ou contradictoire vu les richesses du pays en hydrocarbures bien au contraire cette technologie permettrait d'instaurer une société qui sera basée sur le recyclage et non plus sur le gaspillage [A6].

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude de la production du biogaz, y compris la méthanisation, comment choisir un digesteur et purifier le biogaz.

1. Le passage de la biomasse au biogaz : la méthanisation

Le processus de méthanisation est naturel : les déchets agricoles le lisier fermentent Spontanément, c'est-à-dire se décomposent sous l'action d'enzymes secrétées par des microorganismes, ce qui libère du biogaz. Il s'agit alors de le récupérer et de favoriser sa production.

1.1. Processus chimique : la biodégradation

La réaction produisant du biogaz à partir de biomasse est de type catabolique : c'est une dégradation. Elle se décompose en quatre étapes biochimiques réalisées par trois groupes de Bactéries différents, et s'effectue en milieu anaérobie, en l'absence d'oxygène [A8] [A9].

1.1.1. Hydrolyse & acidogènes :

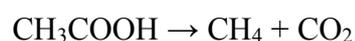
L'hydrolyse permet de solubiliser les molécules, les rendant ainsi moins Complexe et les rendant disponibles pour les micro-organismes. On obtient alors des monomères. La matière organique est transformée en intermédiaires de moindre taille, comme les AGV (Acides Gras Volatils), l'acide acétique (CH_3COOH), le dioxyde de carbone (CO_2), le dihydrogène (H_2), et les alcools. C'est l'acidogène. Elle est réalisée par les bactéries hydrolytiques et fermentatives.

1.1.2. A céto-genèse :

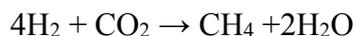
Elle permet de transformer la matière obtenue à la première étape en CH_3COOH , CO_2 et H_2 . CH_3COOH est le précurseur ultime du méthane. En parallèle de l'acétogénèse se produit l'homo_ acétogénèse, consistant à transformer H_2 et CO_2 en CH_3COOH .

1.1.3. Méthanogènes :

Les Archées méthanogènes ont pour fonction de transformer l'acide acétique et l'acétate du milieu en CH_4 , CO_2 et H_2O . On distingue les archées acétoclastes des archées hydrogénéophile. Les premières réagissent avec l'acide acétique pour produire du méthane selon les réactions :



Les archées hydrogénéophile réduisent le dioxyde de carbone par réactions avec le dihydrogène pour former du méthane et de l'eau selon l'équation d'oxydoréduction :



L'équilibre microbien à l'intérieur de la cuve est très fragile. Par exemple, la production d'AGV par le premier groupe de bactéries est très rapide. Ainsi, si on augmente la charge organique en introduisant davantage de biomasse dans le digesteur, la concentration d'AGV augmente très rapidement. Mais les réactions d'acétogénèse à une cinétique plus lente : les AGV s'accumulent, provoquant une acidification du milieu. S'ensuit l'inhibition des bactéries méthanogènes, ne supportant pas la baisse de pH, et le procédé s'arrête.

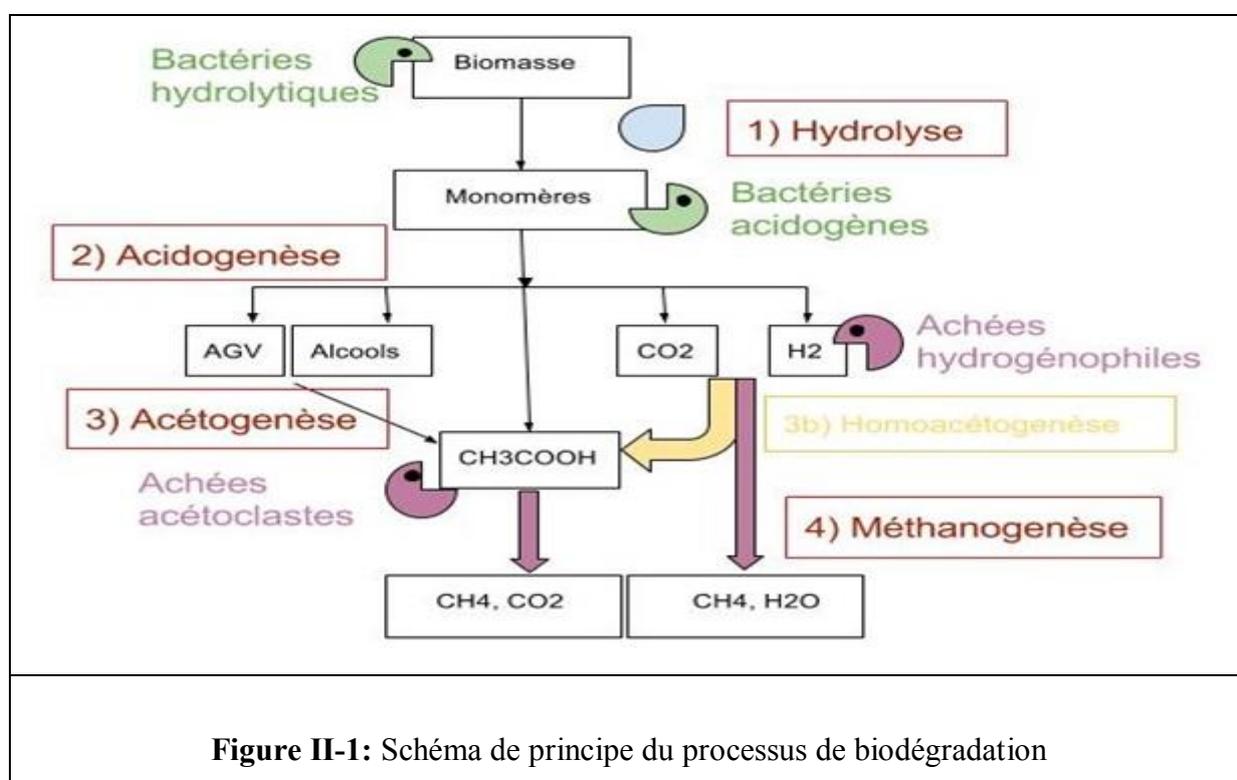


Figure II-1: Schéma de principe du processus de biodégradation

1.2. Du déchet au biogaz : L'influence de la source

Les quantités de biogaz obtenues par tonne de déchets ainsi que sa composition fluctuent de manière conséquente selon la proportion des différents déchets dans le mélange insèrent dans déméthaniser. Le choix de la recette se fait alors suivant plusieurs critères : avoir le meilleur rendement possible en méthane, répondre aux critères législatifs concernant les gaz toxiques comme H_2S , hydrocarbures et métaux lourds, et produire un digestat de qualité et de quantité adapte aux besoins de l'agriculteur. Il est important de s'intéresser à plusieurs choses : le pouvoir méthanogène de chaque type de déchets (Nm^3 de CH_4 par

tonne), la composition du biogaz obtenu avec ces déchets et les quantités que l'on peut espérer de chaque déchet dans leur contexte actuel de production.

2. Choisir son digesteur

2.1. Décomposition naturelle sans traitement

Principe : A la ferme de l'Agro Paris Tech, l'exploitant a fait une pré-étude en 2010 pour conclure en 2013 que la solution la plus rentable serait de faire appel au projet Nénufar. Le but est de limiter les émissions de GES de la ferme et de réduire sa consommation en énergie fossile ce qui lui permet d'économiser 11 000 €.

Les 180 vaches de cette ferme produisent du lisier, placé dans une cuve, de volume 1500 m³. La bâche tendue au-dessus (figure II-2) piège le biogaz produit. Elle est maintenue par des flotteurs, qui exercent une force de retenue équivalente à 2 tonnes, pour contrer la poussée du biogaz présent dans la bâche, ou la pression est de 1,001 bar. Après purification, le biogaz est acheminé jusqu'à la chaudière et valorisé sur place.

Cette solution est peu coûteuse mais doit être choisie pour des sites consommant de grandes quantités de chaleur. Dans le cas de la ferme de Grignon, cette solution est adaptée car l'atelier de production laitière nécessite une quantité importante d'énergie pour chauffer l'eau qui servira à transformer le lait (pasteurisation, nettoyage).

Cette solution est peu coûteuse mais doit être choisie pour des sites consommant de grandes quantités de chaleur. Dans le cas de la ferme de Grignon, cette solution est adaptée car l'atelier de production laitière nécessite une quantité importante d'énergie pour chauffer l'eau qui servira à transformer le lait (pasteurisation, nettoyage)[A7].



Figure II-2 : Couverture nénufar à la ferme de Grignon.

Cependant, le principal inconvénient de ce choix est la grande durée de décomposition dans le digesteur, sans chauffage et sans agitation (de 1 à 6 mois). Cela entraîne une faible production de biogaz, à faible rendement, pour une utilisation locale et non pour la vente.

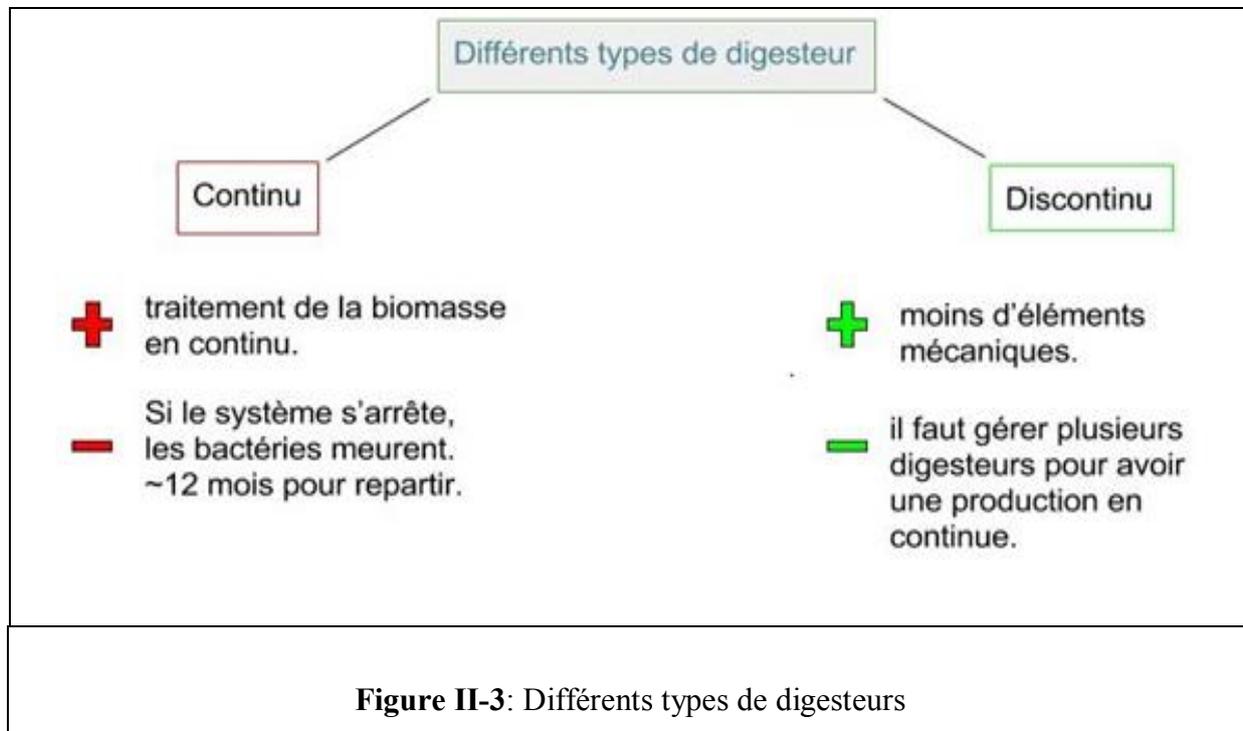
2.2. Amélioration : un digesteur mécanisé

Dans un digesteur mécanisé, la transformation de la biomasse en biogaz est accélérée car le mélange est agité et chauffé. La température varie entre 30°C et 50°C, selon les bactéries dégradantes.

2.2.1. Digesteur continu ou discontinu

Il existe deux types de digesteur : l'un dit continu, l'autre non. L'avancée continue de la matière dans le premier cas se fait soit par pompe, soit par gravité ou encore par vis sans fin.

Dans le second, on remplit une cuve de biomasse et on laisse le biogaz se former pendant des semaines voire des mois. On utilise plusieurs cuves en roulement pour avoir une production à peu près constante.



3. Purification du biogaz : l'étape de prétraitement

Comme nous l'avons vu, le biogaz récupère en sorti du digesteur ou à la suite de la valorisation des boues est constitué majoritairement de CH₄ (45 et 75% du volume) et de CO₂ (20 et 55%). Cependant, le biogaz produit contient également des impuretés qui, malgré leur faible concentration, diminuent fortement le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du biogaz et donc sa valorisation énergétique future. C'est le cas notamment d'H₂S ou des Composés Organiques Volatiles (COV). Avant toute utilisation, une étape de purification est nécessaire pour éliminer la vapeur d'eau, H₂S et les silotages ainsi que les COV avant la phase de valorisation, d'une part pour augmenter le PCI du biogaz et d'autre part pour augmenter la durée de vie des installations. Une liste non exhaustive de ces impuretés est donnée par les tableaux en annexe A1.

3.1. Elimination de l'eau

Le séchage du biogaz est nécessaire en vue de la majorité des valorisations possibles. Il existe différentes solutions techniques pour le réaliser.

3.1.1. Condensation le long des conduits

Elle nécessite des conduites ayant une pente de 1% minimum le long desquels l'eau se condensera. L'utilisation de séparateurs diphasiques permet de récupérer le condensat, dans lequel l'H₂S sera piégé. Elle est particulièrement adaptée pour des installations de valorisation éloignées de la zone de production. En 2000, sur 375 installations en Allemagne, 61% ont fait le choix de cette solution technologique simple. En sortie de processus, le biogaz séché contient au maximum une fraction molaire d'eau de 0.015 à 15°C.

3.1.2. Le séchage par refroidissement et compression

Le principe est le même que précédemment, sauf qu'on refroidit préalablement le biogaz jusqu'à son point de rosée (environ +5°C) à une pression de 7 bars grâce à une compression pour augmenter la solubilité d'H₂S dans l'eau. Le séchage par refroidissement nécessite une source froide, qui peut être obtenue soit à partir d'un groupe frigorifique (très consommateur en énergie), soit après utilisation d'un échangeur de chaleur avec l'air extérieur (peu performant). En sortie, pour une pression d'entrée de 7 bars, et pour une pression de vapeur saturante de l'eau à 5°C égale à 900 Pa, la teneur en eau maximale du biogaz sera de l'ordre de 0.012 donc un taux d'humidité inférieur à 80%.

3.2. Elimination d'H₂S, des siloxanes et des COV

De nombreuses solutions technologiques existent d'ores et déjà : nous ne présenterons ici que les plus répandues. Pour une description plus précise des phénomènes physiques mis en jeu et pour une liste plus détaillée des autres solutions, on se référera à l'annexe A2.

3.3. Conclusion sur la purification

Le traitement minimum à adopter est un séchage du biogaz qui permet d'éliminer par la même occasion une partie de l' H_2S . Si on ne peut pas connaître avec certitude sa composition du biogaz avant sa production, on conseillera un prétraitement capable d'éliminer une grande partie du soufre et des siloxanes et de réaliser une fois la production commencer une analyse précise pour déterminer quelle solution est la plus adaptée. Dans les techniques les plus couramment utilisées, on peut lister La micro oxygénation pour le biogaz d'origine agricole, l'injection de chlorure de fer pour le traitement des boues et l'adsorption sur charbon actif pour les autres procédés (biogaz industriel, méthanisation de déchets ménagers...). Le traitement des siloxanes se fait majoritairement par adsorption sur charbon actif.

4. Les utilisations du biogaz purifié

Nous présenterons dans cette partie les différentes utilisations possibles du biogaz.

4.1. La Cogénération

4.1.1. Principe et avantages de la cogénération

Le principe de la cogénération est de brûler le biogaz pour produire à la fois de la chaleur et de l'électricité. La chaleur produite peut être valorisée en chauffant des installations par exemple, ce qui permet d'améliorer le rendement total par rapport à une simple production d'électricité. En effet, pour produire de l'électricité à partir de chaleur, il est nécessaire d'avoir à disposition une source chaude et une source froide. Dans le cas d'une installation sans cogénération, la chaleur produite est perdue car absorbée par la source froide et non réutilisée (typiquement : cours d'eau, air atmosphérique).

Au contraire, pour une installation de cogénération, la source froide qui absorbe la chaleur produite est un fluide caloporteur et va donc pouvoir être utilisée. Ainsi, le rendement moyen d'une centrale thermique est de 36% alors que le rendement total pour la cogénération varie de 65 à 90%.

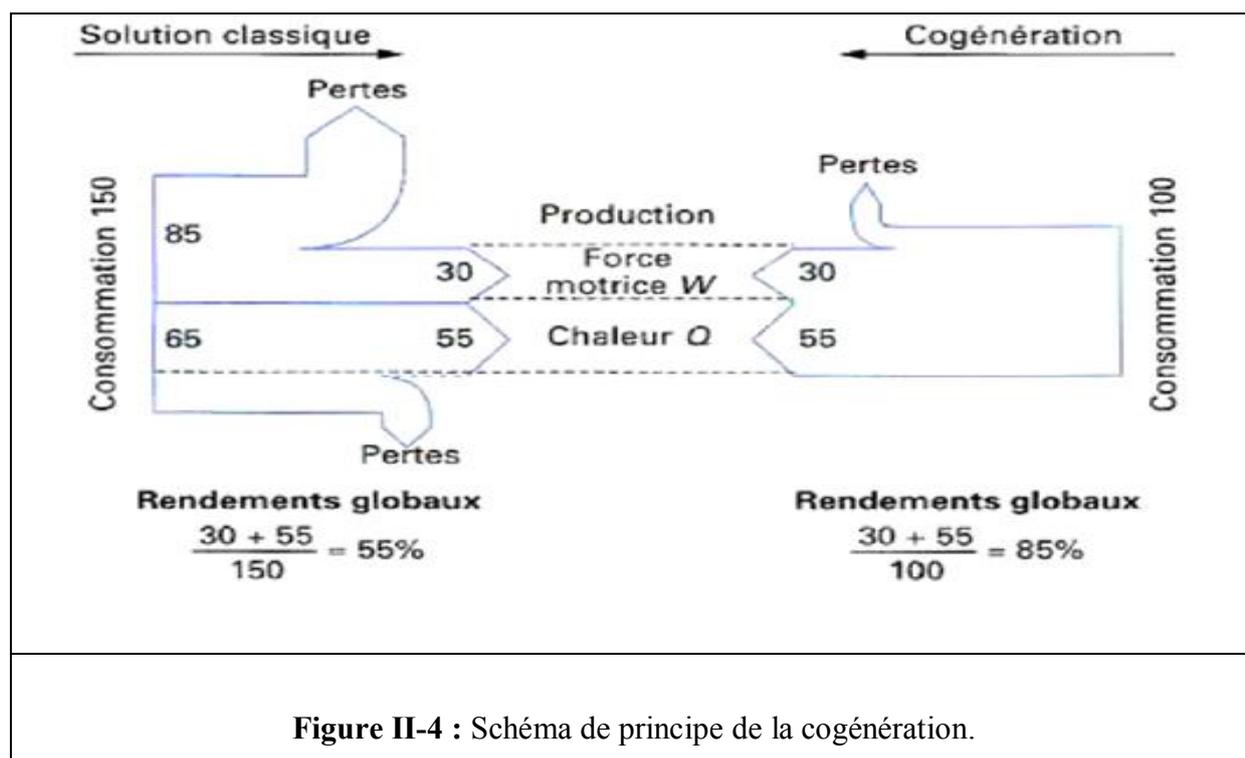


Figure II-4 : Schéma de principe de la cogénération.

Il existe différentes solutions technologiques pour mettre en place un système de Cogénération : moteur à gaz (uniquement avec du biogaz), moteur dual fuel, les micro-turbines, ... La comparaison entre ces différentes technologies est donnée en annexe A4. Outre une augmentation du rendement total des installations, les avantages et inconvénients de la cogénération sont résumés dans le tableau (II-1).

Tableau II-1 : Récapitulatif des avantages et inconvénients de la cogénération.

Avantages	Inconvénients
Limitation des émissions de gaz à effet de serre si utilisée à la place de l'énergie fossile.	Nécessite un raccordement au réseau
Forte valorisation possible en hiver	Nécessite d'utiliser toute la chaleur produite pour augmenter le rendement
Dans le cas du biogaz d'origine agricole : matière première gratuite	Réduction des émissions de gaz à effet de serre et économie d'énergie conditionnée à un fonctionnement constant
Economie d'énergie fossile	Pas de modulation d'une production par rapport à l'autre possible

4.2. La séparation CH₄/CO₂ pour produire du méthane gazeux

4.2.1. La séparation membranaire

Principe :

La méthode de séparation membranaire repose sur les différences de perméabilité d'une paroi vis-à-vis des gaz à séparer. Elle utilise une membrane polymère à travers laquelle les divers composés du gaz ne diffusent pas à la même vitesse. Tout le processus s'effectue en phase gazeuse. Dans le cas de l'épuration du biogaz, les composés à séparer sont principalement CH₄, CO₂, H₂O, O₂, H₂O.

Les membranes utilisées sont perméables au CO₂ et à l'eau, tandis que le CH₄ se retrouve dans le retentât. Ce mécanisme est contrôlé par les différences de pression partielle des composés de chaque cote de la membrane – il s'agit de la force motrice du processus. Par conséquent, il est important d'évacuer le perméat au cours du processus, pour éviter un équilibre des pressions partielles en CO₂ de chaque cote de la membrane, et donc un arrêt de diffusion du CO₂ au travers de celle-ci. L'annexe A5 donne plus de détails sur le fonctionnement de cette technologie. Plusieurs types de membranes sont disponibles : planes, enroulées ou à fibres creuses. Cette dernière géométrie est la plus utilisée car elle permet la circulation de Biométhane purifié, ainsi que l'évacuation aisée des off gaz (CO₂, H₂O, etc.) vers l'extérieur de l'installation comme le montre la figure (II-5).

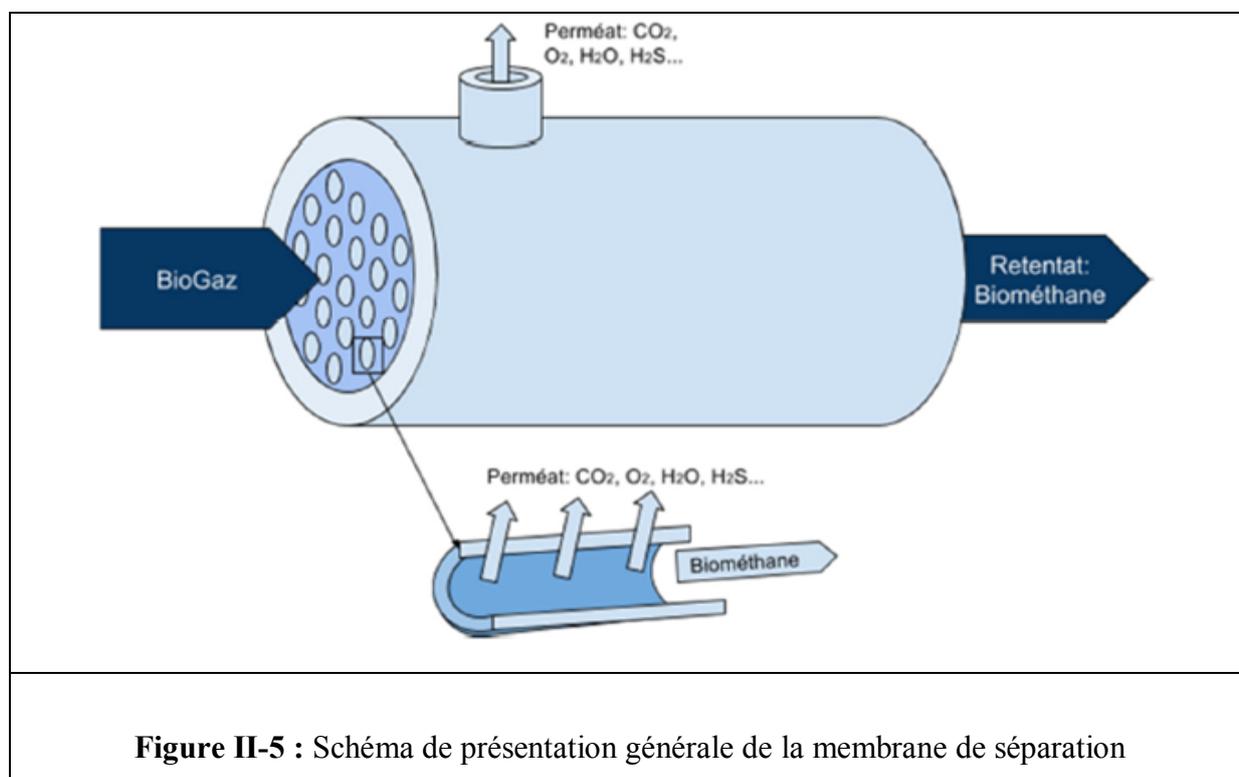


Figure II-5 : Schéma de présentation générale de la membrane de séparation

La membrane est caractérisée par deux paramètres : la perméabilité et la sélectivité : la perméabilité de la membrane vis-à-vis d'un gaz désigne sa capacité à se laisser traverser par le gaz d'étude, sous l'effet d'un gradient de pression. La sélectivité d'une membrane est le quotient des sélectivités des espèces à séparer. L'objectif de l'industriel sera alors de trouver une membrane présentant un compromis idéal entre perméabilité et sélectivité.

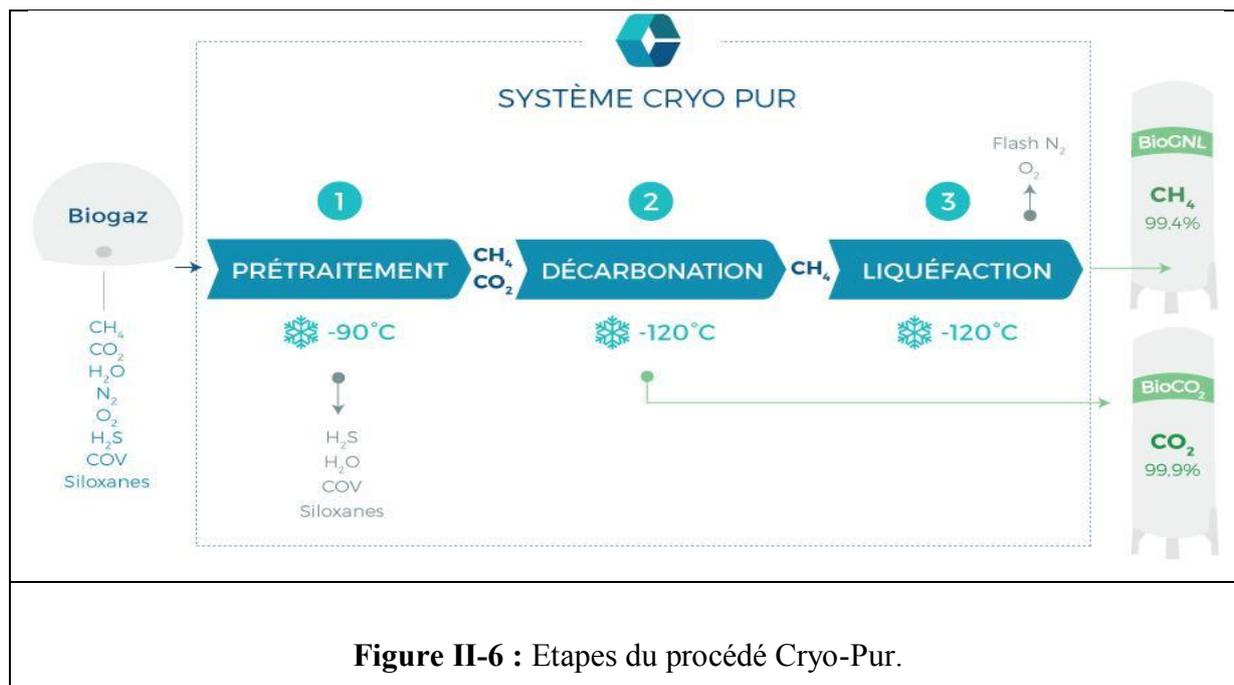
Intérêt et limites :

La méthode de séparation membranaire s'adapte bien à l'épuration du biogaz, puisque les membranes présentent une bonne sélectivité CO_2/CH_4 . Cependant, la pureté du biogaz en sortie est limitée (de l'ordre de 97%), mais garantit tout de même la conformité aux normes GrDF pour l'injection dans le réseau de gaz naturel. De plus, le processus s'effectuant à haute pression (pression relative de 14 bars), l'injection dans le réseau est possible, sans étape de surpression supplémentaire.

Ce procédé est également celui qui propose la meilleure flexibilité et adaptabilité. Cependant, la membrane possède une espérance de vie limitée à 10 ans (temps relativement semblable à celui du retour sur investissement), et est sensible à l'eau et H_2S , ce qui rend les prétraitements obligatoires en amont. Enfin, aucune valorisation du CO_2 n'est prévue en interne, donc les off-gas sont relâchés directement dans l'atmosphère.

4.3. La séparation par cryogénie : production de méthane liquéfié**Principe :**

La plupart des méthodes de séparation présentées s'effectuent à température quasi constante et nécessitent des surpressions importantes. Cory Pur, une jeune start-up, a breveté une méthode novatrice utilisant les propriétés exceptionnelles du CO_2 – sous forme de carboglace à pression ambiante, selon la température, et permettant ainsi d'épurer le biogaz à la pression atmosphérique. Cette méthode innovante de séparation cryogénique à pression atmosphérique (figure II-6) repose sur un processus de givrage/dégivrage du CO_2 (ou condensation/évaporation).

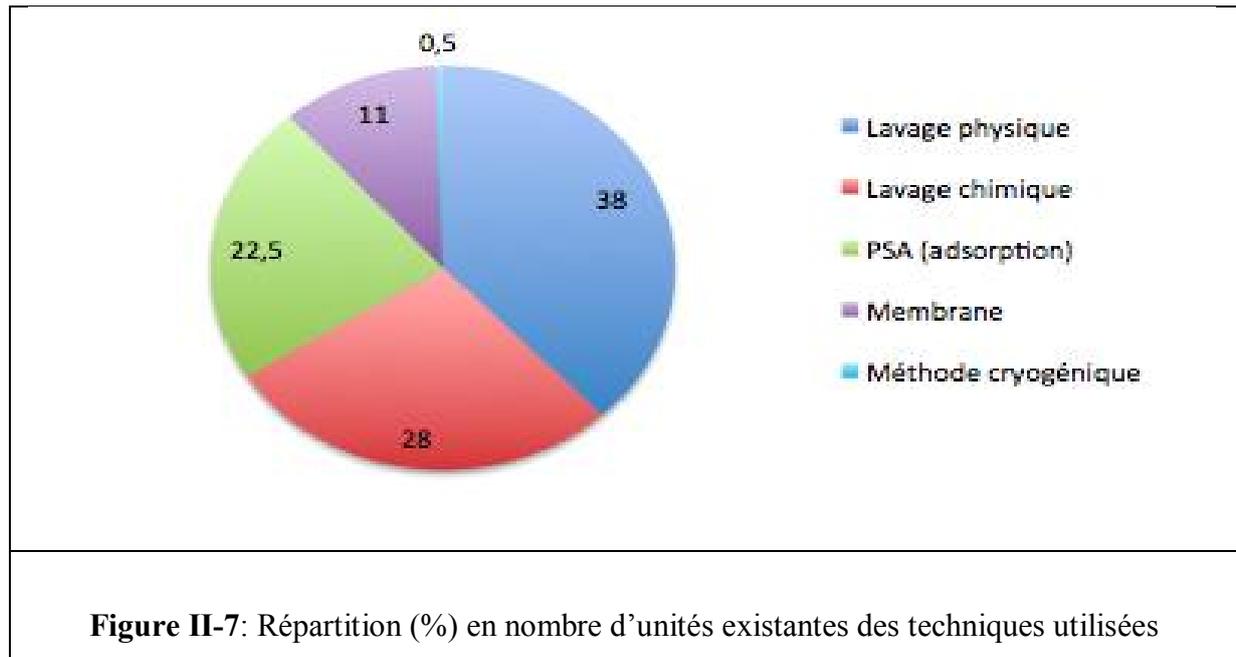


4.4. Comparatif des méthodes de séparation CH_4/CO_2

La plupart des technologies présentées aboutissent à la production de biométhane gazeux, utilisable en cogénération ou pour l'injection directe au réseau de distribution ou de transport. Cependant, les raccordements au réseau ne sont pas toujours possibles et les besoins en chauffage pas suffisants pour valoriser efficacement toute la chaleur produite par cogénération. Le procédé cryogénique proposé par CryoPur permet de former directement du bio-GNL (Gaz Naturel Liquéfié), facilitant son transport sur de longues distances, ou permettant de le valoriser directement en biocarburant.

Cette méthode, récemment développée, est encore très peu exploitée (seulement dans une seule unité de méthanisation).

Au contraire, le lavage physique à l'eau, l'adsorption et la séparation membranaire sont des technologies installées en grand nombre, et présentant une maturité plus élevée, comme le montre la figure (II-7).



Le tableau (II-2) compare les différentes méthodes selon les critères de pureté des produits en sortie, du rendement et de la consommation énergétique nécessaire. Tandis que la méthode cryogéniques permet d'obtenir des produits de très haute pureté – c'est d'ailleurs la seule technique qui permet d'obtenir du CO₂ quasi pur - avec de bons rendements, c'est aussi la technique la plus énergivore. En effet, elle nécessite un apport conséquent d'énergie pour le refroidissement lors de l'étape de décarbonations.

Par ailleurs les technologies membranaires et de lavage aux amines permettent d'obtenir un haut niveau de pureté, tout en limitant les apports d'énergie extérieure

Tableau II-2 : Comparatif des différentes techniques de séparation CH₄/CO₂ [24].

Technologie	Bio-méthane	Coproduit	Rendement en bio- méthane (en%)	Consommation énergétique
	Pureté en (%)	Composition		kWh/Nm ³ de CH ₄
Membrane	96,5 à 99	CO ₂ impur (méthane, H ₂ S...)	80 à 99,5	0,25 -0,4
PSA	98	CO ₂ impur (méthane, H ₂ S...)	98	0,45
Lavage à l'eau	95 à 99	CO ₂ impur (méthane, H ₂ S)	98	0,46
Lavage aux amines primaire	99	Solvant +CO ₂ +COV +méthane	99,96	0,27
Lavage aux amines secondaire	99	Solvant +CO ₂ +COV +méthane	99,96	0,27
Lavage aux amines tertiaire	99	CO ₂ pur (99,9%)	99	0,27
Cryogénie	Plus de 99	CO ₂ pur (99,9)	99	0,5-1,15

5. La valorisation des co-produits

5.1. Valoriser le digestat

En plus de la production de gaz, le digesteur produit un résidu appelé le digestat. Il représente les restes des déchets compostés, et possède encore aujourd'hui dans certains pays un statut de déchets. Selon le contexte de production, ce digestat peut être utilisé de différentes manières.

Dans un contexte agricole, le digeste équivaut à du fumier ayant subi une méthanisation. Il est alors pour plusieurs raisons intéressant d'utiliser ce digeste en temps qu'engrais. Tout d'abord, au même titre que le fumier, il devrait permettre de couvrir certains besoins en azote, phosphore et potassium. Il faut savoir que l'épandage du fumier permet en moyenne de couvrir 2/3 des besoins en azote des cultures et de 75 – 85% des besoins en

phosphore et potassium. D'autre part, la teneur en azote organique du fumier baisse de 42% suite à la méthanisation. Or l'azote organique n'est pas très accessible pour les plantes, il a donc été transformé sous d'autres formes minéralisées comme NO_3 qui est une des formes de l'azote les plus accessibles pour les plantes. L'apport d'azote grâce au digestat, peut alors être contrôlé de manière plus fine que dans le fumier, ce qui peut permettre de mieux ajuster l'utilisation d'intrants extérieurs [A4].

Le rapport C/N du digestat est en moyenne quasiment divisé par deux par rapport à celui du fumier qui est d'environ 20. Pour rappel, le rapport C/N aussi appelé rapport carbone sur azote permet de mesurer l'aptitude d'un produit à se décomposer plus ou moins rapidement dans le sol. Plus il est élevé, plus le produit se décompose lentement dans le sol.

Pour finir on a une légère réduction du volume entre le digestat et le fumier de l'ordre de 5 à 10% qui peut permettre de diminuer les coûts d'épandage qui sont environ de 1,8 €/m³ épandu.

5.2. Valoriser le CO₂

- Le marché du CO₂

Valoriser le CO₂ pourrait permettre de réduire son émission dans le cadre d'une économie circulaire. Les critères de choix du mode de valorisation du CO₂ sont les suivants: La rentabilité, le bilan carbone et les autres impacts environnementaux ou encore le marché du CO₂. Avant toute réflexion sur une éventuelle valorisation du CO₂, il est nécessaire d'étudier cette marche dans sa globalité.

Aujourd'hui, 18,2Gt de CO₂ rejetées par an sont potentiellement valorisables alors que les besoins actuels en CO₂ représentent seulement 150 Mt.

Actuellement la consommation de CO₂ et sa valorisation peut se faire avec ou sans transformation. Sans transformation, le CO₂ peut être utilisé pour les extincteurs, le traitement de l'eau, les boissons ou les hydrocarbures. Cette consommation représente 18Mt/an. Le CO₂ peut aussi être utilisé transformé : pour la synthèse de l'urée (120Mt/an) (ce procédé produit cependant plus de CO₂ qu'il n'en consomme), pour la production de polycarbonate 65kt/an, les synthèses cycliques 150kt/an et les carbonates inorganiques 44Mt/an. La transformation idéale serait de reproduire la réaction de photosynthèse. Le problème ici est de trouver les bons catalyseurs (peu chers, non toxiques, abondants).

Pour ce qui est des fournisseurs ce sont principalement les usines de synthèse de l'ammoniac par la production de H₂ à partir de CH₄. Cette source représente la moitié des besoins marchands en Europe et 70% des besoins de la chimie. La production de bioéthanol

représente 20% de la part de la marche européenne de production de CO₂. Cette filiale risque cependant de disparaître pour des raisons de compétitions entre la production énergétique et alimentaire.

L'extraction du CO₂ des fumées industrielles est par ailleurs une filière en développement. Pour maximiser l'efficacité de captage, les fumées à valoriser doivent être de préférence riches en CO₂ (+90%), avec le moins de contaminants possible, de production fiable, avec une logistique favorable, le tout avec des volumes importants. Il existe plusieurs méthodes de captage du CO₂ : la précombustion, l'oxycombustion et la post combustion.

La consommation de tels traitements peut représenter entre 10 et 40 % de consommation énergétique en plus et une augmentation de 30 à 60 % du coût économique. Les trois principales entreprises qui investissent dans la marche du CO₂ sont Air liquide, Yarra et Messer.

Le biogaz peut s'inscrire dans ce cycle de valorisation du CO₂, car après épuration du CH₄, ce dernier possède une forte teneur en CO₂. Plusieurs voies de valorisation sont à étudier

- **L'alimentaire**

Dans ce cas, le CO₂ doit avoir une pureté de 99,9 % avec une absence de métaux lourds. Si l'on prend l'exemple de l'usine Coca-cola, les quantités nécessaires sont très importantes (100-130 tonnes de CO₂/semaine), et ne peuvent subir aucun retard de livraison, car un jour d'arrêt de l'usine représente un manque à gagner de 300 000 €. Il semble difficile dans ce contexte de revendre directement le CO₂ purifié des unités de biogaz à des entreprises agroalimentaires les productions n'étant pas assez régulière, fiable et quantitative.

Cependant si l'on imagine une collecte globale du CO₂ avec une centralisation des différentes productions, à long terme la commercialisation alimentaire deviendra peut être possible dans le futur.

- **Micros algues**

Une autre solution semble être de fournir du CO₂ à des micros algues, facilement valorisable en pharmacie, cosmétique ou encore pour la production alimentaire ou de carburant. En effet, 1kg de CO₂ permettrait d'obtenir 0,4kg de biomasse. Un exemple concret a été inauguré le 28 août 2008 à Hambourg, permettant de valoriser 400 tonnes de CO₂ en produisant 160 tonnes de biomasse par an sur une surface de un hectare.

Cependant, le rendement faible de 0,2g de matière sèche par litre, les problèmes d'acceptation sociétale, ainsi que le besoin d'intrants (soleil, azote, phosphate..) peuvent freiner le développement de cette filière [A9].

- Les serres

La valorisation la plus simple est l'injection du CO₂ sous serres. En effet, pour faciliter la Photosynthèse, les serres ont besoin d'être enrichies en CO₂.

En pratique, les agriculteurs réutilisent parfois le CO₂ émis par leurs chaudières en hiver. Mais, pour ne pas endommager les cultures, le CO₂ doit être suffisamment pur : une teneur en soufre des combustibles inférieur à 0,02% en poids, des chaudières homologuées CSA ou l'équivalent pour limiter les rejets en monoxyde de carbone (inférieurs à 6 – 10 ppm) et peu ou pas d'oxyde d'azote ou d'éthylène.

Il faut en général un apport de 0,5 à 0,6kg de CO₂ par heure et par 100m² de surface dans une serre vitrée standard pour maintenir la concentration à 1 300 ppm, concentration idéale pour les plantes. Bien que le dosage soit moins précis (à cause des impuretés) qu'avec du CO₂ pur, cela permet des économies considérables [A9].

- Autres

D'autres techniques d'utilisation peuvent être aussi envisagées : les voitures réfrigérées, la valorisation chimique ou l'extraction des hydrocarbures. Cependant on rencontre le même problème de quantité que pour l'agroalimentaire. Pour ce qui est de l'injection sous terre, on ne peut pas vraiment considérer cela comme une valorisation, elle n'est de plus pas envisageable pour des raisons de prix 70 € la tonne (captage et stockage).

Introduction

Cette étude porte sur l'évaluation de l'énergie que peut consommer un digesteur de bio-méthanisation pour son bon fonctionnement.

Les éléments importants pour une bonne marche du digesteur sont :

- Le maintien d'une température homogène aux environs de 40°C dans le digesteur ;
- Le brassage régulier ;
- L'introduction de la matière dans le digesteur à la pression nécessaire ;
- Le maintien du pH à une valeur proche de 7.

1. Etude des déperditions thermiques

L'objectif de cette étude est de modéliser les transferts thermiques entre le digesteur et l'environnement extérieur afin d'obtenir l'équation d'état des déperditions thermiques au sein de la matière en digestion.

L'étude porte donc sur :

- la modélisation des transferts thermiques entre le digesteur et l'environnement extérieur (étude en régime permanent) ;
- l'obtention de l'équation d'état des déperditions thermiques (étude en régime variable).

1.1. Etude en régime permanent

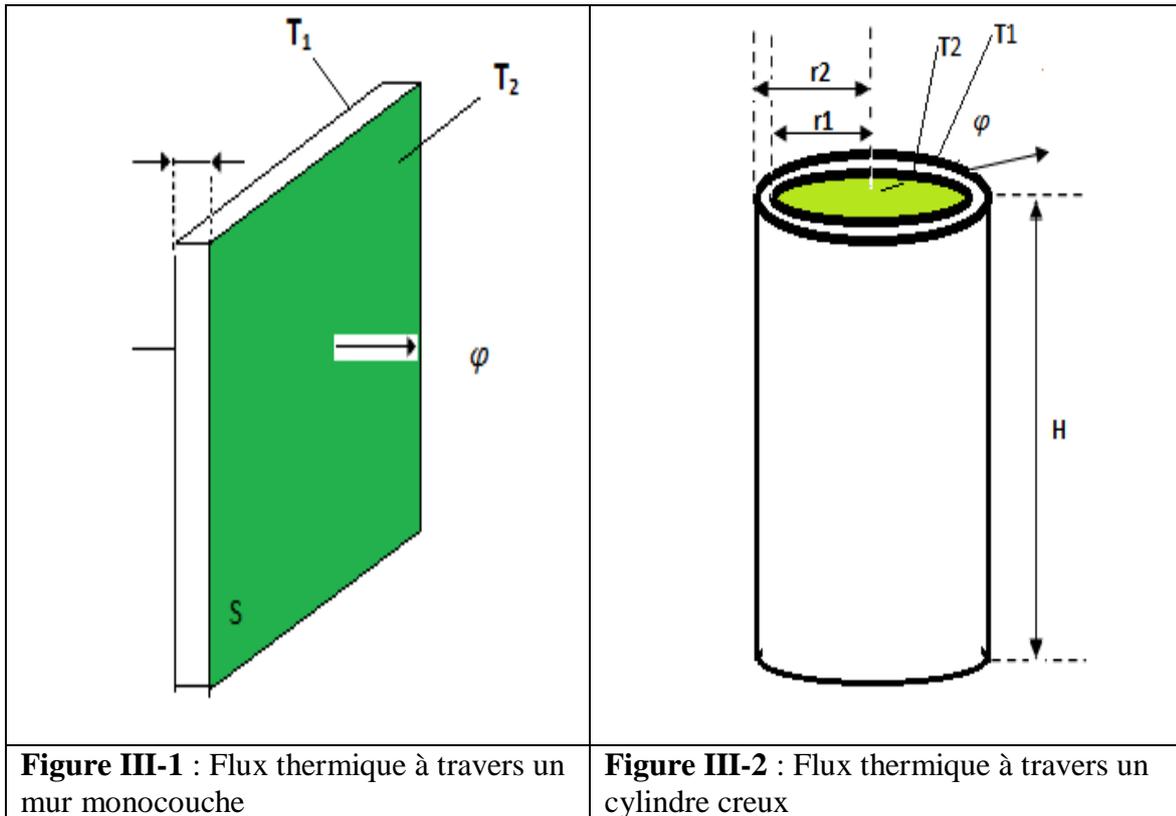
L'enceinte du digesteur étant cylindrique, il est possible d'établir un modèle équivalent de type mur multicouche afin de simplifier le modèle.

Dans cette partie, de par les faibles gradients de température rencontrés a priori, on se placera en régime de conduction permanent (flux thermique constant).

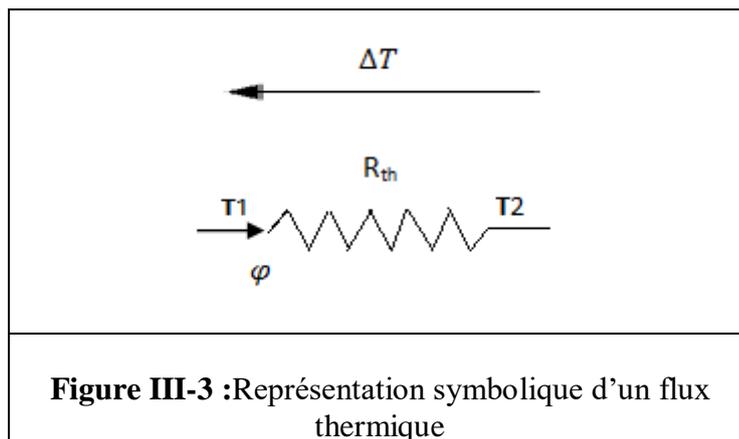
Le flux thermique φ (en W) à travers un mur monocouche de surface latérale S (en m²), d'épaisseur e (en m) et de conductivité thermique λ (en W·m⁻¹·K⁻¹) est donné par la relation suivante :

$$\varphi = \frac{\lambda \cdot S}{e} (T_1 - T_2) \quad (1)$$

Où T_1 et T_2 sont les températures (en K) aux interfaces de la paroi (voir figure III-1).



Cette même équation peut se symboliser par sa résistance thermique R_{th} , par analogie avec une résistance électrique :



L'expression de la résistance thermique, d'un mur plan, R_{th} (en K/W) en fonction de e , λ et S et donnée par la relation:

$$R_{th} = e / \lambda \cdot S \quad (2)$$

1.1.1. Simplification de la géométrie

Le flux thermique radial traversant un cylindre creux en régime permanent est donné par la relation suivante :

$$\varphi = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot H}{\ln \frac{r_2}{r_1}} (T_1 - T_2) \quad (3)$$

r_1 et r_2 sont respectivement les diamètres internes et externes du cylindre, en m (voir figure 16).

Dans le cas du digesteur, en ne considérant dans un premier temps que l'épaisseur de paroi sans isolant, et au vu de ses dimensions, l'équation (2) peut se simplifier et se mettre sous la forme de l'équation (1), avec comme surface équivalente « S_p » la surface intérieure du cylindre et « e » l'épaisseur de paroi. [Rappel : pour $x \ll 1$, $\ln(1+x) = x$]

$$r_1 = D / 2 \quad (4)$$

$$r_2 = r_1 + e = D/2 + e \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{\lambda \cdot S_p}{e} (T_1 - T_2) \quad (6)$$

$$\text{Avec } S_p = \frac{2\pi \cdot H \cdot e}{\ln\left(\frac{D/2 + e}{D/2}\right)} = \frac{2\pi \cdot H \cdot e}{\ln\left(1 + \frac{2 \cdot e}{D}\right)}$$

Et $2e \ll D$ 1 mm \ll 0,003 mm

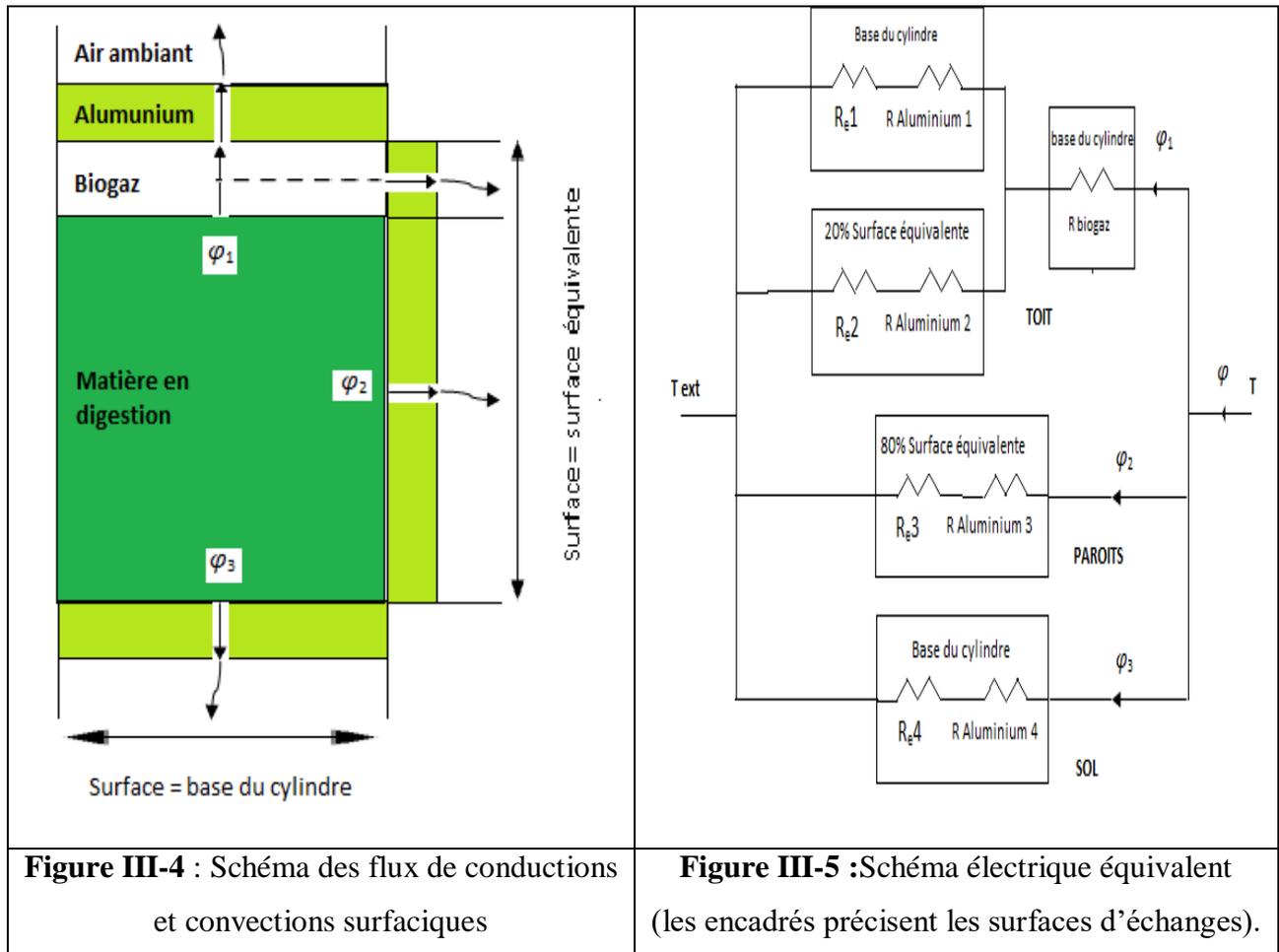
$$S_p = \frac{2\pi \cdot H \cdot e}{\ln\left(\frac{2 \cdot e}{D}\right)}$$

Soit finalement

$$S_p = \pi \cdot D \cdot H \quad (7)$$

Ce qui correspond bien à la surface intérieur du cylindre.

Au vu de ce résultat, et en considérant que cette approche est valable tant pour un mur monocouche que multicouche (la simplification est toujours valable en considérant maintenant l'épaisseur cumulée de paroi), on obtient les schémas équivalents suivants, où tous les flux sont dirigés parallèlement au plan de coupe :



Où :

- **la matière en digestion** intervient en tant que capacité, caractérisée par sa masse m_{dig} , sa capacité calorifique massique C_{dig} et sa température interne T ;
- **le biogaz** est vu comme un matériau purement conductor, de conductivité thermique λ_{biogaz} , échangeant par conduction avec la matière en digestion à travers la surface de base du cylindre. Les échanges par conduction avec la paroi s'effectuent à travers 2 surfaces : par le

toit (base du cylindre) et par les parois (20 % de la surface équivalente aux parois S_p , puisque le volume de biogaz occupe 20 % du cylindre) ;

- **les parois** sont le siège de transferts par conduction thermique (conductivités thermiques λ_{alum}) à travers les différentes surfaces rencontrées;
- **l'air extérieur** génère des phénomènes de convection surfacique sur la paroi extérieure, équivalents à une résistance thermique surfacique externe R_{SE} , et possède une température T_{ext} constante.

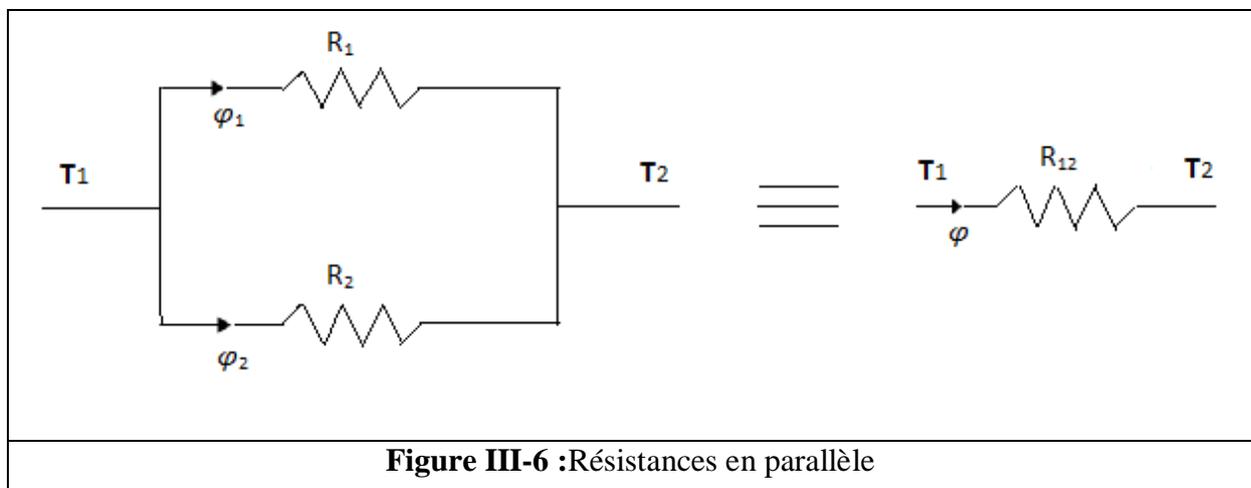
Avec les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le même flux ϕ_1 traverse des surfaces différentes entre l'entrée dans le biogaz et sa sortie dans la paroi métallique.
- La température est homogène dans toute la matière en digestion.
- les mouvements de convection dans le digesteur sont négligés car la pression et la température sont quasi constantes.
- On considère une épaisseur e_{biogaz} égale à la hauteur du volume de biogaz dans le cylindre.
- On considère la matière en digestion directement en contact avec la paroi métallique : aucun mouvement de convection surfacique interne

On appellera par la suite S_d la surface du disque constituée par la base du cylindre.

1.1.2.Simplification du schéma électrique équivalent

Soit deux résistances thermiques R_1 et R_2 d'un même matériau, de mêmes épaisseurs, traversées respectivement par 2 flux ϕ_1 et ϕ_2 à travers 2 surfaces S_1 et S_2 (voir figure III-6).



$$\varphi_1 = \frac{\lambda.S_1}{e} (T_1-T_2) \tag{8}$$

$$\varphi_2 = \frac{\lambda.S_2}{e} (T_1-T_2) \tag{9}$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{\lambda.(S_1+S_2)}{e} (T_1-T_2) = \frac{\lambda.S}{e} (T_1-T_2) \tag{10}$$

Avec $S = S_1 + S_2$

Ce schéma est équivalent à une résistance thermique de ce même matériau, de même épaisseur, à travers une surface $S = S_1 + S_2$.

En utilisant ce résultat, le schéma électrique équivalent peut se simplifier en ne faisant plus apparaître que 2 branches (voir figure III-7).

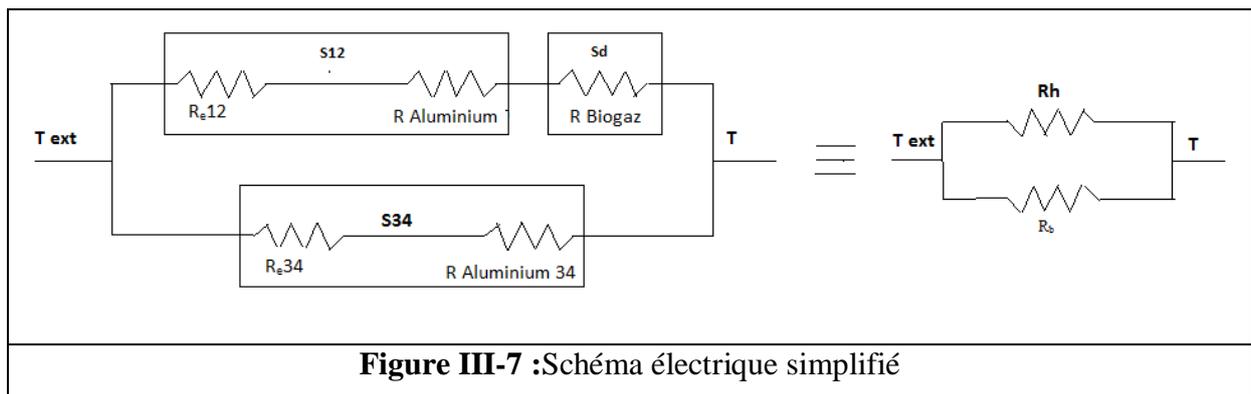


Figure III-7 :Schéma électrique simplifié

Les expressions littérales des surfaces équivalentes S_{12} et S_{34} , en fonction de S_d et S_p sont donc :

$$S_{12} = S_d + 0,2.S_p \tag{11}$$

$$S_{34} = S_d + 0,8.S_p \tag{12}$$

1.1.3. Expression littérale des résistances thermiques R_h et R_b

R_h et R_b sont respectivement les résistances séries équivalentes de la branche du haut et du bas.

Expression littérale des résistances thermiques R_h et R_b

$$R_h = R_{e12} + R_{alum12} + R_{biogaz} \quad (13)$$

$$R_h = \frac{1}{S_{12}} \left(R_{SE} + \frac{e_{alum}}{\lambda_{alum}} \right) + \frac{e_{biogaz}}{\lambda_{biogaz}} \quad (14)$$

$$R_h = \left(R_{se} + \frac{e_{alum}}{\lambda_{alum}} \right) + \frac{e_{biogaz}}{\lambda_{biogaz}} \quad (15)$$

$$R_b = R_{e34} + R_{alum34} \quad (16)$$

$$R_b = \frac{1}{S_{34}} \left(R_{se} + \frac{e_{alum}}{\lambda_{alum}} \right) \quad (17)$$

$$R_b = \frac{1}{(sd + 0.8sp)} \left(R_{se} + \frac{e_{alum}}{\lambda_{alum}} \right) \quad (18)$$

1.1.4. Calcul des résistances thermiques R_h et R_b

Les différentes conductivités thermiques nécessaires, ainsi que la résistance thermique surfacique des phénomènes de convection avec l'air extérieur sur les parois, sont données ci-dessous :

$$\lambda_{alum} = 230 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\lambda_{biogaz} = 0.0304 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$R_{se} = 0.04 \text{ m}^2.\text{k}.\text{W}^{-1}$$

Application numérique : $R_h = 0.989 \text{ K}.\text{W}^{-1}$ et $R_b = 0.013 \text{ K}.\text{W}^{-1}$

1.1.5. Interprétation des résultats

La résistance R_h est la résistance équivalente à tous les transferts thermiques de la matière en digestion à travers le biogaz, puis à travers les parois hautes et le toit.

La résistance R_b est celle équivalente à tous les transferts thermiques de la matière en digestion à travers les parois et le sol.

Les déperditions thermiques se situent principalement vers les parois et le sol puisque R_b est très faible (donc grande conductivité), et dans un facteur supérieur à 75 par rapport à R_h

1.1.6. Calcul de la résistance thermique de l'ensemble Biogaz + digesteur

Biogaz + digesteur est équivalent à une résistance thermique R_{tot} , son expression littérale en fonction de R_h et R_b est comme suit : L'ensemble

$$R_{tot} = R_b \parallel R_h = \frac{R_b \cdot R_h}{R_b + R_h} \quad (19)$$

Au vu des valeurs de R_h et R_b , ($R_h \gg R_b$) l'expression de R_{tot} se simplifie pour donner :

$$R_{tot} = R_b \quad (19)$$

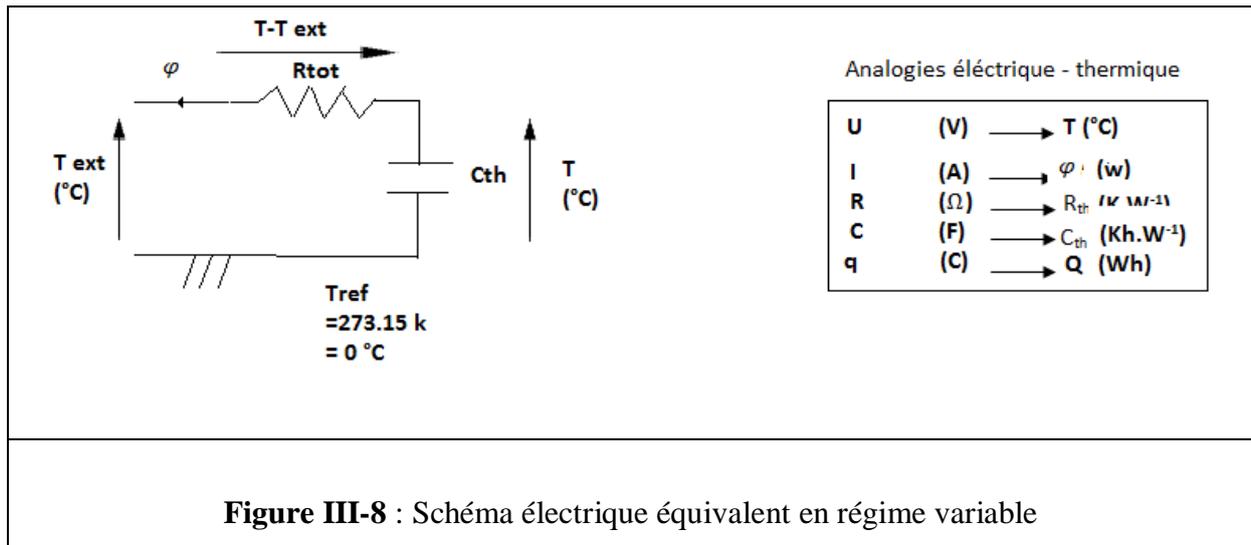
Application numérique :

$$R_{tot} = R_b = 0.013 \text{ K.W}^{-1}$$

1.2 Étude en régime variable

L'objectif est de compléter le modèle afin d'obtenir l'équation d'état de la température au sein de la matière en digestion, et par la suite l'équation d'état de ses déperditions thermiques.

La matière étant caractérisée par sa capacité thermique, nous pouvons maintenant modéliser l'ensemble digesteur plus matière en digestion par son équivalent électrique



Dans ce modèle, toutes les températures sont maintenant exprimées en °C (car la référence de température est prise à 0 °C = 273,15 K) et où C_{th} symbolise la capacité thermique de la matière en digestion.

Ce réseau se résout comme un réseau électrique classique en considérant les analogies électriques représentées sur le schéma (Figure III-8).

1.2.1 Equation de température

Les équations temporelles de ce réseau sont comme suit :

$$\text{Sur } R_{tot} : T - T_{ext} = R_{tot} \cdot \phi \quad (\text{Convention récepteur}) \quad (20)$$

$$\text{Sur } C_{th} : \phi = -C_{th} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (\text{Convention récepteur}) \quad (21)$$

Soit finalement :

$$T - T_{ext} = -R_{tot} \cdot C_{th} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (22)$$

$$T + R_{tot} \cdot C_{th} \cdot \frac{dT}{dt} = T_{ext} \quad (23)$$

La température T vérifie l'équation suivante :

$$T + \tau \frac{dT}{dt} = T_{\text{ext}} \quad (24)$$

L'expression littérale de τ en fonction de R_{tot} et C_{th} est :

$$\tau = R_{\text{tot}} \cdot C_{\text{th}} \quad (25)$$

La solution de l'équation (24) est donnée par :

$$T + \tau \cdot T' = T_{\text{ext}}$$

$$T' + (1/\tau) \cdot T = T_{\text{ext}} / \tau$$

$$T' = (-1/\tau) \cdot T + T_{\text{ext}} / \tau$$

Equation de la forme $y' = ay + b$ et dont les solutions sont de la forme $y = Ke^{at} - b/a$

$$\text{D'où } T = Ke^{at} - (-T_{\text{ext}})$$

$$T = Ke^{at} + T_{\text{ext}}$$

$$\text{Pour } T(0) = T_0$$

$$\text{On a } Ke^0 + T_{\text{ext}} = T_0 \quad \implies \quad K = T_0 - T_{\text{ext}}$$

$$\text{Donc } T = (T_0 - T_{\text{ext}}) e^{-t/\tau} + T_{\text{ext}}$$

La courbe de la fonction $T(t)$ a une forme d'exponentielle régressive, elle représente la courbe des déperditions.

1.2.2. Détermination de l'équation de T ($^{\circ}\text{C}$) en fonction de t (en h), τ , T_0 et T_{ext} .

Sachant que les déperditions sont compensées régulièrement chaque jour, il est possible d'approximer la courbe des déperditions par la droite tangente à l'origine.

$$T(t) = A \cdot t + B \quad (26)$$

$$\text{Avec } T(0) = T_0 \text{ et } T(\tau) = T_{\text{ext}} \quad (27)$$

$$\text{Soit } B=T_0 \text{ et } A.\tau + T_0 = T_{\text{ext}} \quad (28)$$

$$A = \frac{T_{\text{ext}} - T_0}{\tau} \quad (29)$$

Soit finalement :

$$T(t) = \frac{T_{\text{ext}} - T_0}{\tau} . t + T_0 \quad (30)$$

1.2.3 Expression de l'énergie perdue $\Delta Q(t)$ par la matière en digestion

L'énergie thermique Q (en Wh) emmagasinée par la matière en digestion, en fonction de C_{th} et de T est donnée par :

$$Q = C_{th}.T \quad (31)$$

L'énergie perdue $\Delta Q(t)$, différence d'énergie entre les températures $T(0)$ et $T(t)$, en fonction de C_{th} , T_0 et $T(t)$ est donnée par :

$$Q = C_{th}.T \quad (31)$$

$$\Delta Q(t) = C_{th}.T(0) - C_{th}.T(t) \quad (32)$$

$$\Delta Q(t) = C_{th}.(T(0) - T(t)) \quad (33)$$

L'énergie perdue $\Delta Q(t)$ par la matière en digestion peut se mettre sous la forme :

$$\Delta Q(t) = C_{th}.(T(0) - T(t)) \quad (34)$$

$$\Delta Q(t) = C_{th}.(T(0) - ((T_{\text{ext}} - T_0)\frac{t}{\tau} + T_0)) \quad (35)$$

$$\Delta Q(t) = C_{th}.(T(0) - (T_{\text{ext}} - T_0)\frac{t}{\tau} - T_0) \quad (36)$$

$$\Delta Q(t) = \frac{C_{th}}{\tau} \cdot (T_0 - T_{ext}) \cdot t \quad (37)$$

Finalement

$$\Delta Q(t) = \frac{(T_0 - T_{ext})}{R_{tot}} \cdot t \quad (38)$$

2. Notion de brassage

Le brassage de la matière en digestion peut être manuel dans le cas d'une petite installation ou pneumatique par réinjection de biogaz qui apporte l'énergie nécessaire au maintien en température du digesteur dans le cas d'une grande installation.

3. Dimensionnement de l'installation

Une installation de bio-méthanisation se compose d'un élément principal « le digesteur », des équipements d'épuration, des équipements d'utilisation et des accessoires de raccordement.

Pour dimensionner le bio-digesteur, on commence d'abord par le volume du gazomètre, le volume utile du digesteur et enfin le volume totale du digesteur (volume du réservoir).

3.1. Calcul du volume du gazomètre

Après évaluation des besoins journaliers en biogaz, on utilise le modèle de Hashimoto pour déterminer la production spécifique journalière puis à partir du volume utile V du bio-digesteur, on calcule la production volumique journalière.

La production du biogaz par m^3 du digesteur s'obtient à partir de la relation suivante :

$$Pv = \frac{B_0 \times S}{TRH} \left[1 - \frac{K}{TRH \times \mu m - 1 + K} \right] \quad (39)$$

Avec

$$\mu m = 0.013 \times T - 0.129 \times \left[1 - \frac{K}{TRH \times \mu m - 1 + K} \right] \quad (40)$$

Pour un volume utile V du bio-digesteur, on obtient une production volumique journalière de :

$$G = Pv \times V = \frac{B_0 \times S \times V}{TRH} \left[1 - \frac{K}{TRH \times \mu m - 1 + K} \right] \quad (41)$$

3.2. Calcul du volume du réservoir

Pour simplifier, le volume du réservoir (V_D) n'est autre que le volume du digesteur. C'est aussi le volume de l'ensemble formé par le gazomètre et le volume de l'effluent:

$$V_D = G + V \quad (42)$$

$$\text{Sachant que} \quad (43)$$

$$V = Q \times \text{TRH}$$

Et en introduisant (41) et (43) dans (42), on réussit à exprimer V_D en fonction de Q par l'équation suivante :

$$V_D = Q \left[\text{TRH} + B_0 \cdot S \left(1 - \frac{K}{\text{TRH} \times \mu m - 1 + K} \right) \right] \quad (44)$$

On peut finaliser l'équation (44) en tenant compte de ce que :

Le débit (Q) est non seulement fonction de la masse (m) du substrat à digérer, mais aussi du ratio de son mélange avec de l'eau ($1 : x$) ; le volume qu'occupe cette masse de substrat vaut :

$$v = m / \rho_s ; v \text{ en [m}^3\text{]}, m \text{ en [kg]} \text{ et } \rho_s \text{ [kg/ m}^3\text{]} \quad (45)$$

$$Q = v (1+x) = \frac{m (1+x)}{\rho_s} ; x \text{ en [m}^3\text{]} \quad (46)$$

Et

$$V = \text{TRH} \times Q = \frac{\text{TRH} \times m \times (1+x)}{\rho_s} \quad (47)$$

- la charge volumique (S) s'exprime en fonction de la masse (m), de la concentration (c) et du volume utile (V)

$$S = \frac{m \times c}{V} \quad (48)$$

Après avoir substitué (47) dans (43) et (43) dans (48), on obtient

$$S = \frac{c \times \rho_s}{\text{TRH} \times (1+x)} \quad (49)$$

En substituant (47) et (49) dans (44) l'on obtient l'équation finale (16) de dimensionnement

du projet :

$$V_{eD} = \frac{m(1+x)}{\rho S} \left[TRH + \frac{B0 \times c \times \rho S}{TRH \times (1+x)} \left(1 - \frac{K}{TRH \times \mu m - 1 + K} \right) \right] \quad (50)$$

3.3. Dimensionnement des conduits d'entrée et de sortie

La hauteur de ces conduites est déterminante pour le volume du biogaz à produire. Le fluide (substrat) étant au repos, il n'y a pas de perte de charge. La hauteur (h) du fluide dans les conduites est donc la même que dans le digesteur. En approximant la base du digesteur à un cylindre, on détermine (h) à partir de l'équation

$$V = \pi \times d^2 \times h / 4 \quad (51)$$

Où V est le volume utile du digesteur et (d) son diamètre en mètre

3.4. Dimensionnement de la conduite à gaz

Le diamètre des canalisations est un facteur très important pour le bon fonctionnement des appareils à biogaz. La perte de charge (J) et la distance (L) séparant le site de production et le lieu d'utilisation étant connues, ce diamètre (D) s'obtient grâce à l'équation de la perte des charges utilisée en mécanique des fluides :

$$J = \Delta H = \frac{\lambda \times L \times \rho \times u^2}{D \times g} \quad (52)$$

Avec

$$\lambda = f(Re) \quad (53)$$

et

$$Re = \frac{\rho \times D \times u}{\mu} \quad (54)$$

Introduction :

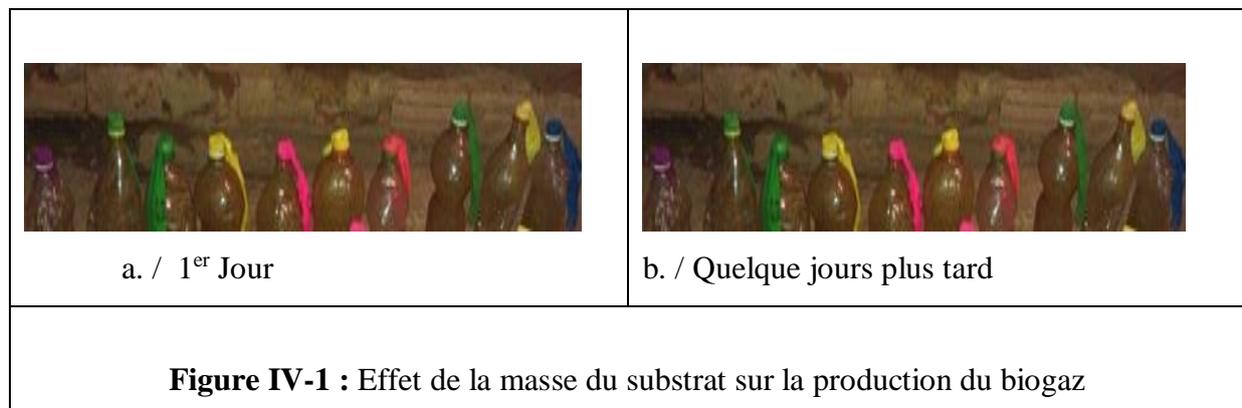
Dans ce chapitre, consacré à l'expérimentation de la digestion anaérobie de déchets organiques, nous nous sommes intéressés à l'étude de quelques paramètres physico-chimiques qui ont un impact sur le processus de la méthanisation afin de la maîtriser. C'est la raison pour laquelle, nous avons suivi l'évolution de la température dans différents milieux, l'évolution du pH de la solution et enfin l'évolution du volume de biogaz produit en fonction du temps.

Partie _ A: Etude en digesteur rudimentaire

Dans cette partie de découverte, nous nous sommes intéressés à l'étude de la production du biogaz dans des bio-digesteurs rudimentaires comme les bouteilles en plastique de 2 litres de capacité. Pour cela nous avons procédé à différents tests de laboratoire afin de voir l'effet de la masse et de la nature du substrat ainsi que l'effet de l'isolation du digesteur sur la production du biogaz.

A - 1 / Matériel et méthodes**A - 1.1 / Dispositif expérimental****Expérience_1 :** Etude de l'effet de la masse du substrat

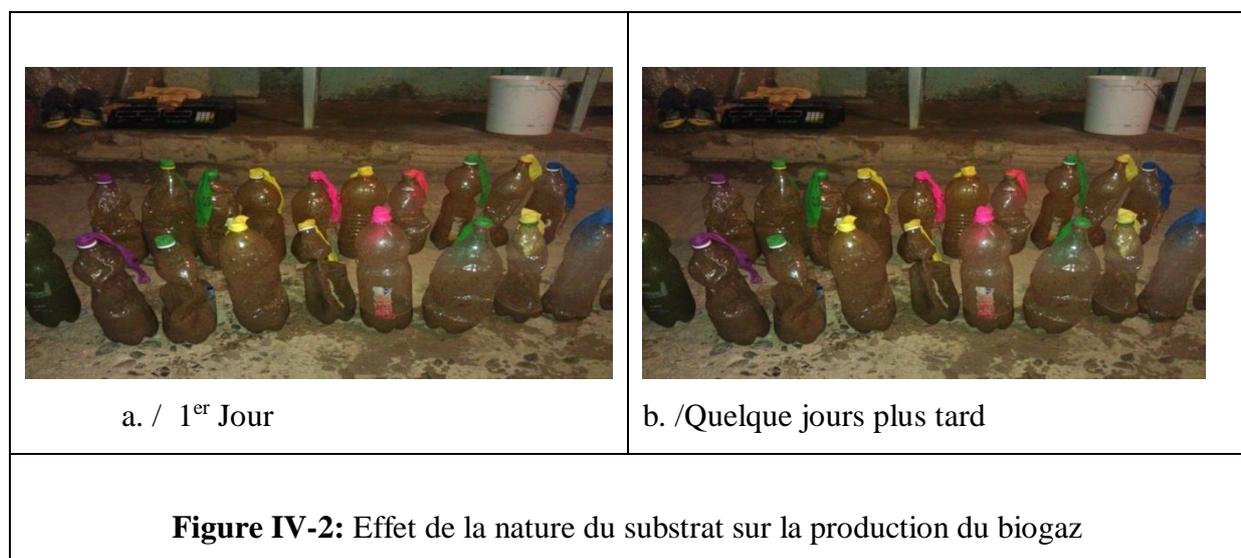
Pour cette expérience, nous avons rempli dans dix bouteilles de plastique des quantités allant de 50 à 500 g de déchets afin d'étudier l'effet de la masse sur la production de biogaz. Ce dernier étant récupéré dans des ballons placés au-dessus des bouteilles comme le montre la figure (IV-1).



Les bouteilles de plastique remplies de substrat ont été déposées dans un local à température ambiante et ont été surveillées quotidiennement pour voir leur évolution dans le temps.

Expérience_2: Etude de l'effet de la nature du substrat

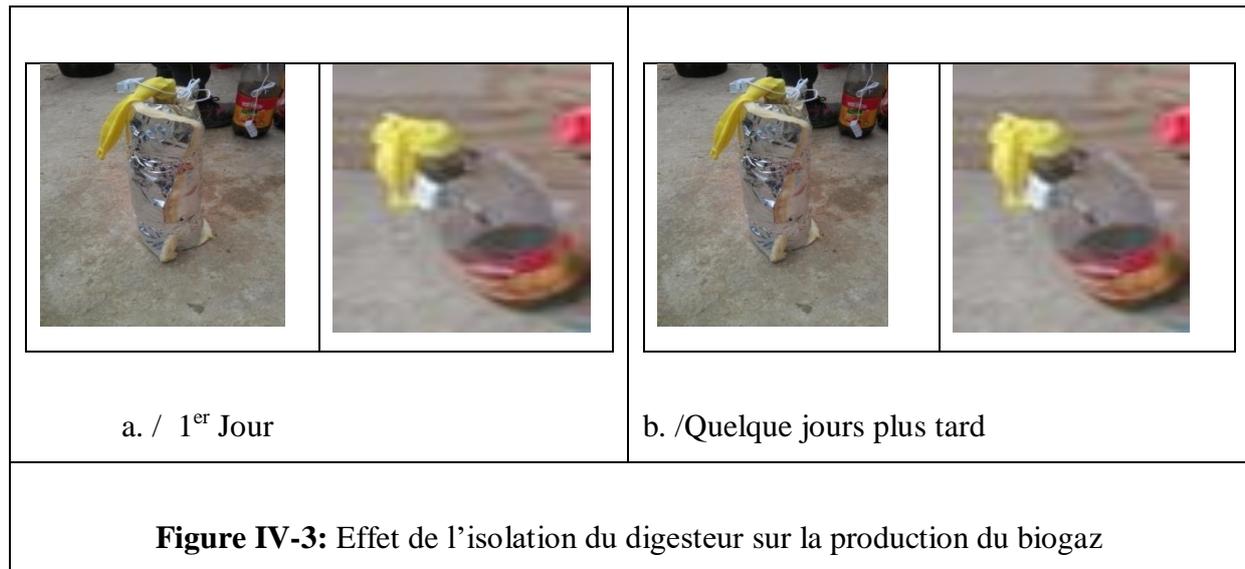
Pour étudier l'effet de la nature du substrat sur la production du biogaz, nous avons refait la première expérience avec quatre substrats différents tels que les déchets d'abattoir, les fientes de poulet, les bouses de vache et enfin leurs mélanges, comme le montre la figure (IV-2). Les déchets ont été récupérés dans la ville d'Ain-Defla.



Quarante bouteilles de plastique ont été subdivisées en quatre groupes pour recevoir quatre substrats différents, puis déposées dans un local à température ambiante. Les bouteilles ont été ensuite surveillées quotidiennement pour voir leur évolution.

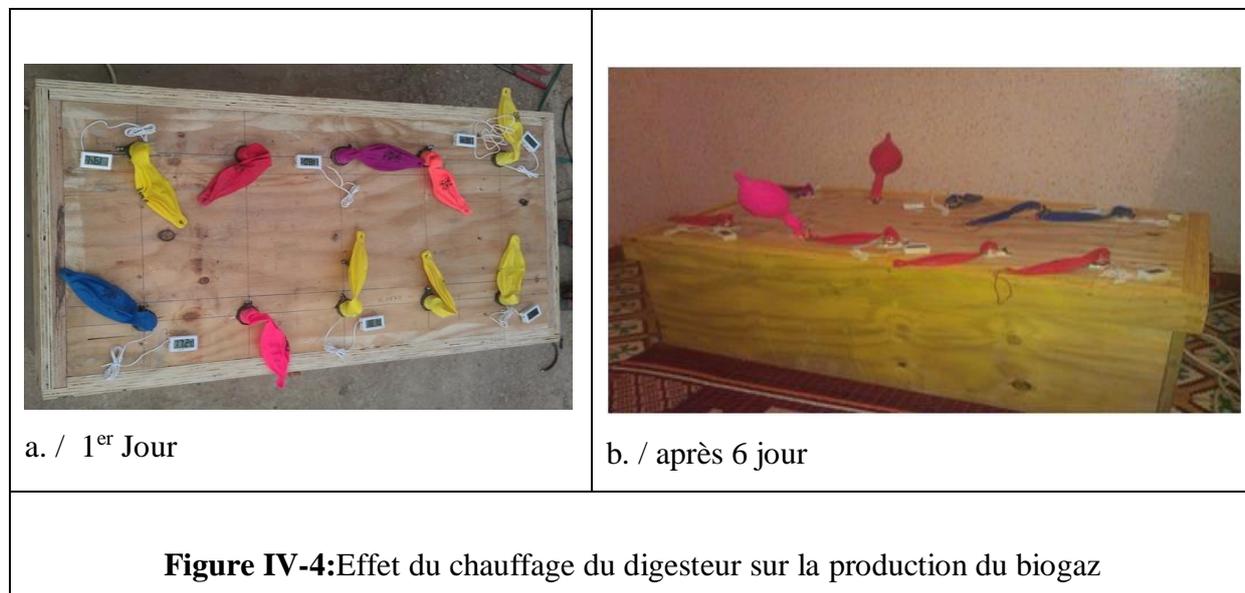
Expérience_3: Etude l'effet de l'isolation du digesteur

Pour étudier l'effet de l'isolation du digesteur sur la production du biogaz, nous avons rempli des quantités allant de 300 à 700 g d'un mélange de déchets dans cinq bouteilles de plastique non isolées et cinq autres isolées comme le montre la figure (IV-3).



Expérience_4: Etude de l'effet du chauffage du digesteur

Pour étudier l'effet du chauffage du digesteur sur la production du biogaz, nous avons rempli des quantités allant de 300 à 700 g d'un mélange de déchets dans cinq bouteilles de plastique non isolées et cinq autres isolées que nous avons placées dans un caisson chauffé à l'aide d'une résistance thermostatique comme le montre la figure (IV-4).



A - 1.2 / Paramètres de la fermentation

Pour sa bonne évolution, la fermentation méthanogène exige un suivi régulier des différents paramètres de la digestion anaérobie.

A - 1.2.1 / L'anaérobiose

L'étanchéité du digesteur est une condition impérative au développement de la flore méthanogène, d'où l'intérêt de sa vérification dès le départ. C'est ce que nous avons fait avec nos bio-digesteurs rudimentaires.

A - 1.2.2 / La dilution

Le taux de dilution est important à déterminer, car il influe sur le temps de rétention (temps de séjour) de la matière organique, sur la taille du digesteur et la quantité de chaleur à apporter. En général, il faut diluer la plupart des déchets dans leur poids d'eau, pour avoir une consistance 'crémeuse' et non épaisse car elle ralentit la digestion.

A - 1.2.3 / Le pH

Le pH optimal pour la méthanisation se situe autour de 7. Il doit donc être mesuré régulièrement pour empêcher le blocage de la fermentation, quand il baisse en dessous de 6.7. On peut ajouter de la chaux, pour garder un pH autour de la valeur 7.

A - 1.2.4 / La température

L'activité des micro-organismes, dont dépend la production du méthane est fonction de la température du milieu. Son intensité est négligeable à 0 °C et devient exploitable dès 15 °C. Elle est maximale de 37 °C à 40 °C. D'où l'intérêt de stabiliser la température du digesteur dans cette fourchette, (fonctionnement en mésophile). Comme la fermentation anaérobie n'est que faiblement exothermique, les conditions nécessaires au développement des bactéries mésophiles ou thermophiles, doivent être créées artificiellement par un apport de chaleur externe.

A - 1.2.5 / L'isolation thermique

Un digesteur expérimental de faible taille nécessite une bonne isolation avec une couche de laine de verre par exemple pour limiter les apports de chaleur nécessaires à son bon fonctionnement.

A - 2 / Résultats et discussion

A – 2.1 / Effet de la masse du substrat sur l'évolution de la température

a. / Cas des déchets d'abattoir

Sur la figure (IV-5), nous avons représenté l'évolution de la température du milieu ambiant et l'évolution de la température dans deux digesteurs rempli respectivement de 400 et 500g de déchets d'abattoir que nous avons, au préalable, pesé et dilué avec autant d'eau. Nous remarquons que les allures de la température, en fonction du temps, dans les digesteurs suivent celle de la température ambiante. Nous remarquons aussi que pour une date précise la température dans les digesteurs est plus élevée que la température ambiante. Ceci peut s'expliquer par le fait que la fermentation anaérobie est exothermique.

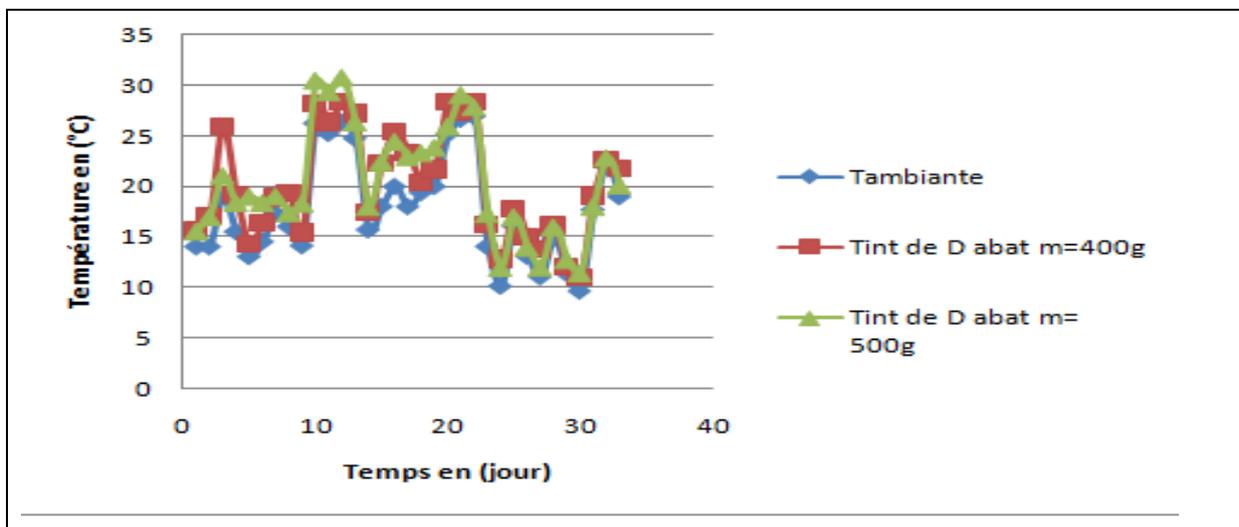


Figure IV-5 : Effet de la masse des déchets d'abattoir sur l'évolution de la température

b. / Cas d'un mélange de déchets

Sur la figure (IV-6), nous avons représenté l'évolution de la température du milieu ambiant et l'évolution de la température dans deux digesteurs rempli respectivement de 400 et 500 g de mélange de déchets que nous avons, au préalable, pesé et dilué avec autant d'eau.

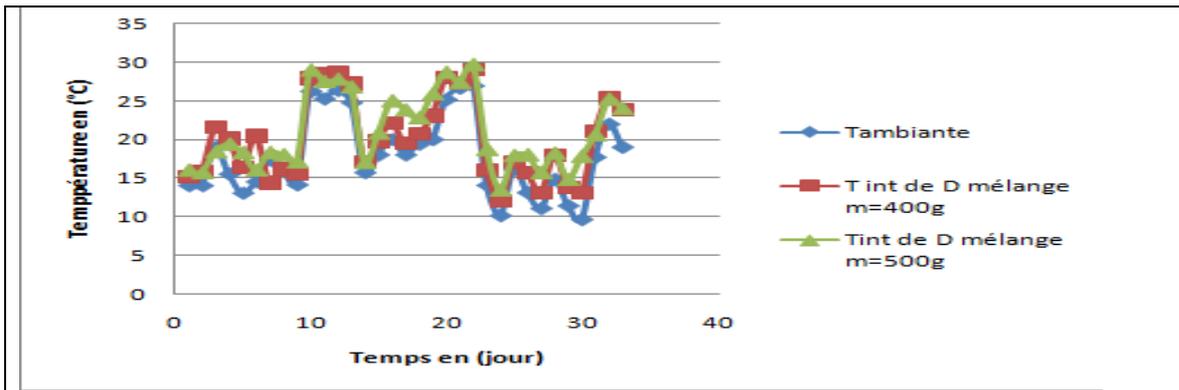


Figure IV-6 : Effet de la masse d'un mélange de déchets sur l'évolution de la température

A – 2.2 / Effet de la nature du substrat sur l'évolution de la température

Sur la figure (IV- 7), nous avons représenté l'évolution de la température du milieu ambiant et l'évolution de la température dans deux digesteurs rempli de 500 g respectivement de déchets d'abattoir et d'un mélange de déchets que nous avons, au préalable, pesé et dilué avec autant d'eau. Nous remarquons que les allures de la température, en fonction du temps, dans les digesteurs suivent celle de la température ambiante. Nous remarquons aussi que pour une date précise la température dans les digesteurs est plus élevée que la température ambiante. Ceci peut s'expliquer par le fait que la fermentation anaérobie est exothermique.

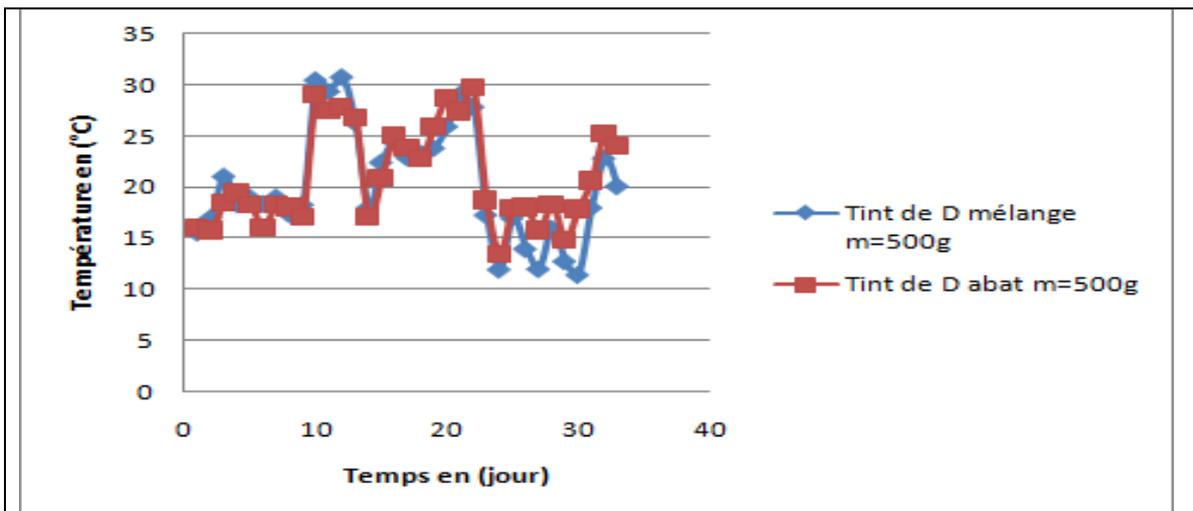
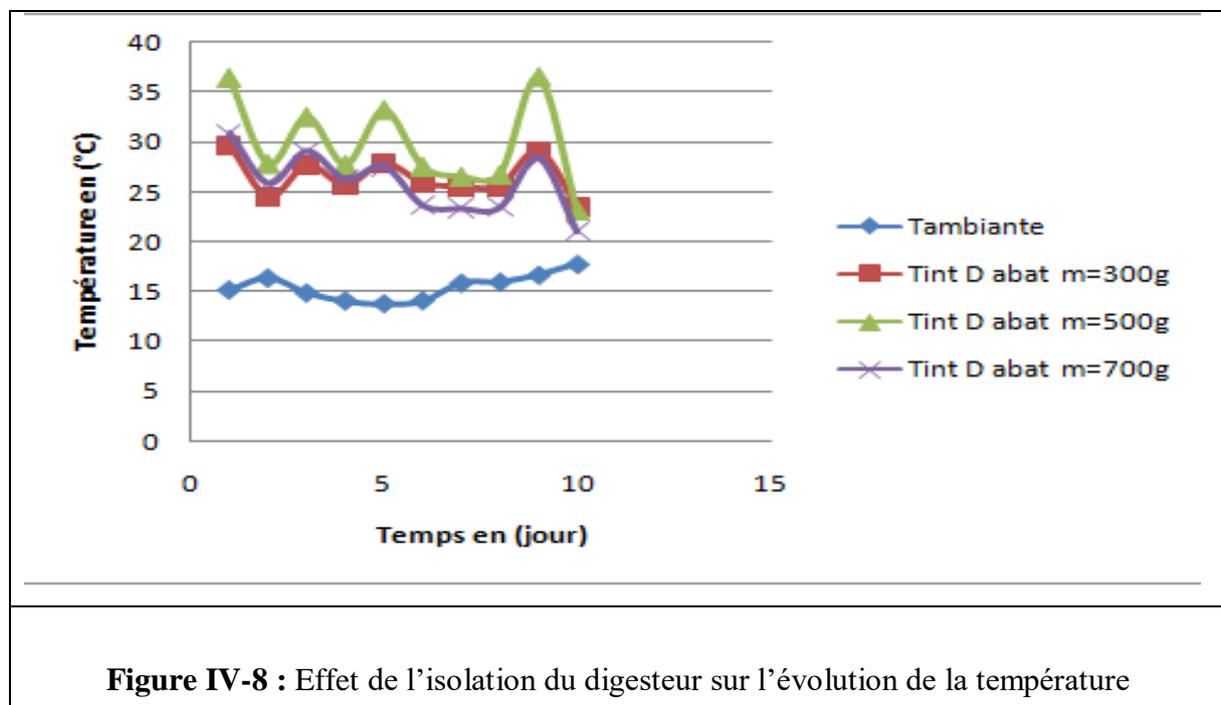


Figure IV- 7: Effet de la nature du substrat sur l'évolution de la température

A – 2.3 / Effet de l'isolation du digesteur sur l'évolution de la température**a. / Cas de digesteur non isolé**

Pour cette expérience, nous disposons de trois digesteurs non isolés, équipés de thermomètre et remplis respectivement de 300, 500 et 700 g d'un mélange de déchets d'abattoir, de fientes de poulet, et de bouses de vache que nous avons, au préalable, pesé et dilué avec autant d'eau. Les trois digesteurs font partie d'un lot de dix digesteurs dont cinq sont isolés et cinq autres non isolés et placés dans un caisson chauffé à l'aide d'une résistance électrique. Le vide dans les digesteurs est réalisé à l'aide de la vapeur d'eau produite avec une cocotte-minute.

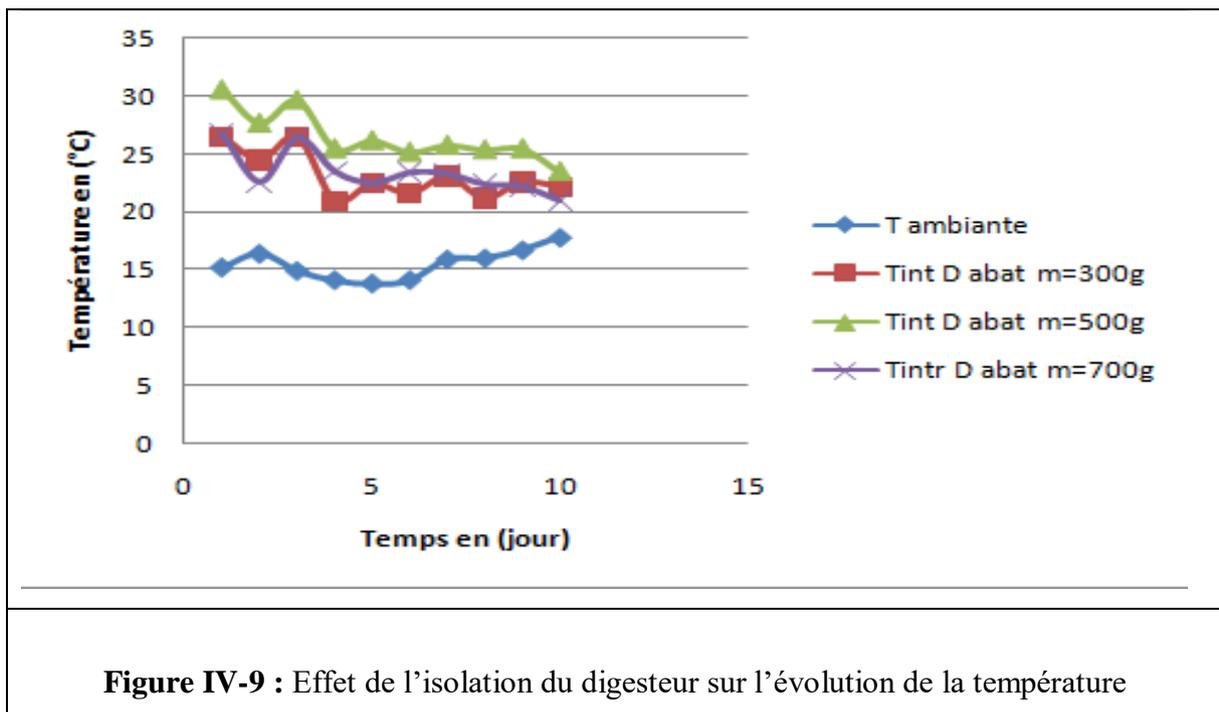
Sur la figure (IV-8), nous avons représenté l'évolution de la température du milieu ambiant et l'évolution de la température, dans les trois digesteurs non isolés, relevée du 11/02/2017 au 20/02/2017. Nous remarquons que les allures de la température, en fonction du temps, dans les digesteurs suivent celle de la température ambiante. Nous remarquons aussi que pour une date précise la température dans les digesteurs est plus élevée que la température ambiante. Ceci peut s'expliquer par le fait que la fermentation anaérobie est exothermique.



b. / Cas de digesteur isolé

Pour cette expérience, nous disposons comme dans le cas précédant de trois digesteurs isolés, équipés de thermomètre et remplis respectivement de 300, 500 et 700 g d'un mélange de déchets d'abattoir, de fientes de poulet, et de bouses de vache que nous avons, au préalable, pesé et dilué avec autant d'eau. Les trois digesteurs font aussi partie du lot des dix digesteurs placés dans le caisson chauffé à l'aide d'une résistance électrique et la température est réglée par un thermostat mécanique.

Sur la figure (IV-9), nous avons représenté l'évolution de la température du milieu ambiant et l'évolution de la température, dans les trois digesteurs isolés, relevée du 11/02/2017 au 20/02/2017. Nous remarquons que les allures de la température, en fonction du temps, dans les digesteurs suivent celle de la température ambiante. Nous remarquons aussi que pour une date précise la température dans les digesteurs est plus élevée que la température ambiante. Ceci peut s'expliquer par le fait que la fermentation anaérobie est exothermique.



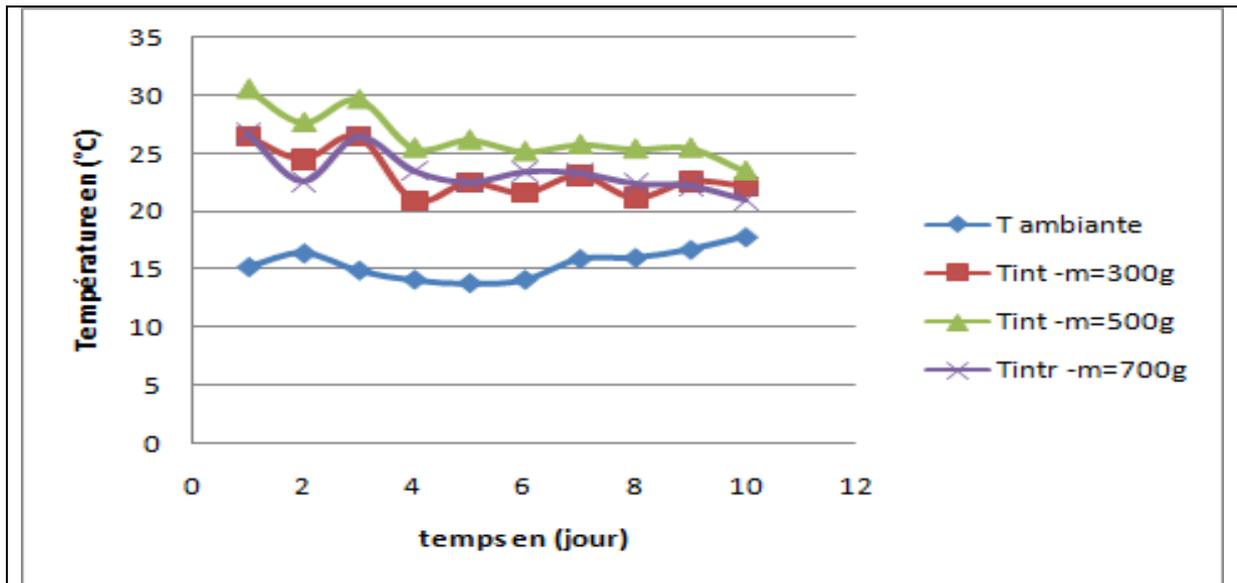


Figure IV-10 : Relevé des températures des bouteilles isolées

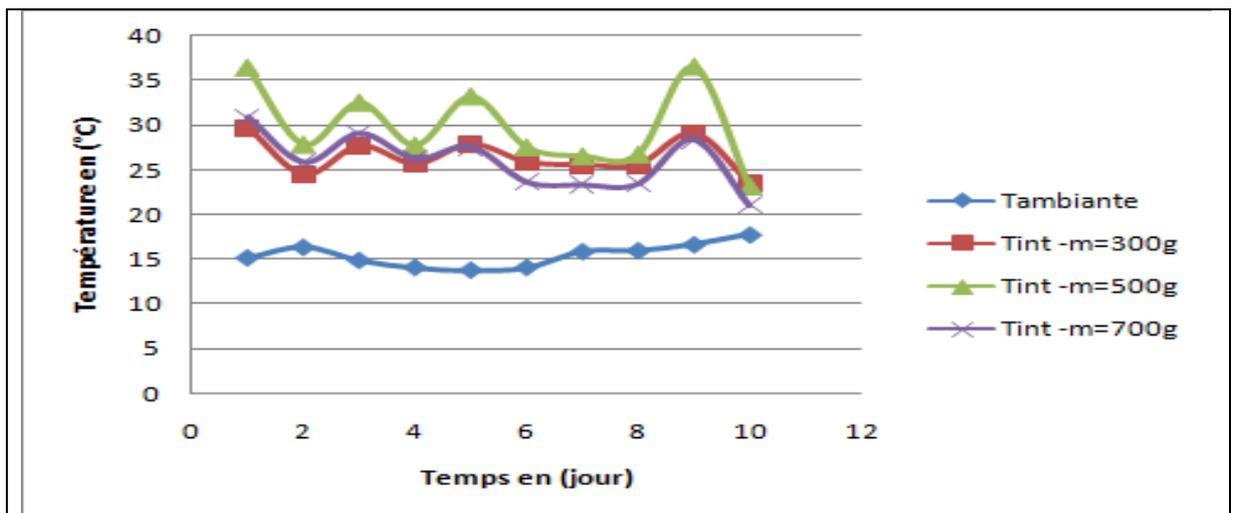


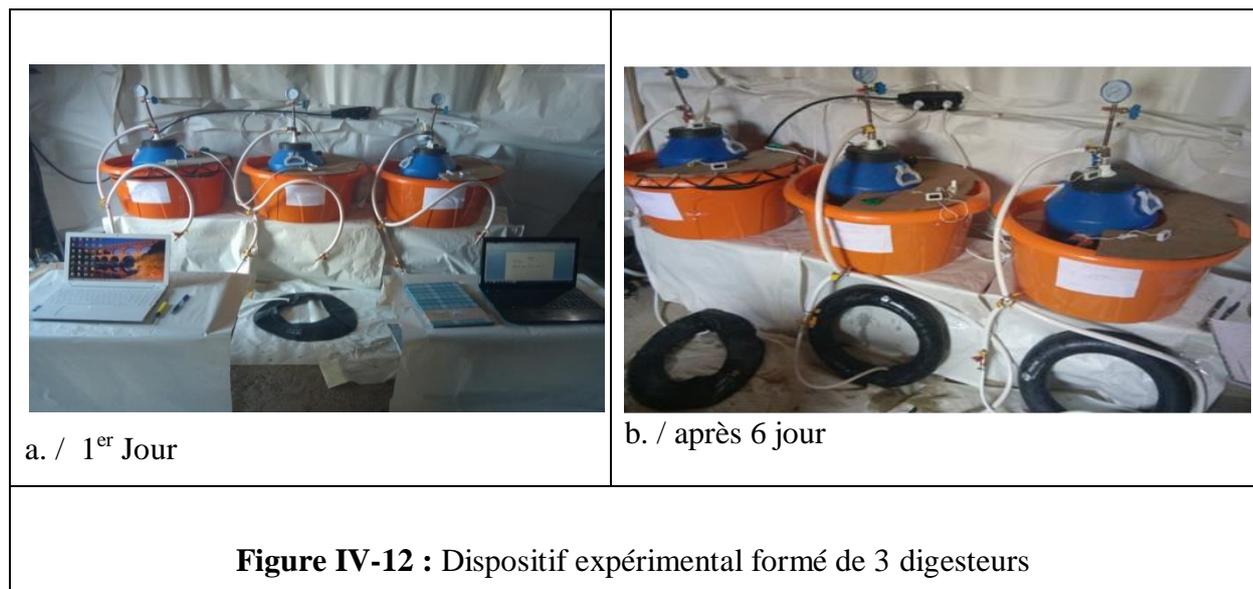
Figure IV-11 : Relevé des températures des bouteilles non isolées

Partie_B: Etude en digesteur plus évolué

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à l'étude de la production du biogaz dans des bio-digesteurs plus évolués d'une capacité de 30 litres et plus. Pour cela nous avons procédé à différents tests de laboratoire afin de voir l'effet de la masse du substrat et de la température du digesteur sur la production du biogaz.

B - 1 / Matériel et méthodes**B - 1.1 / Dispositif expérimental****Expérience_1** : Etude de l'effet du chauffage sur la production du biogaz

Pour cette expérience, nous avons rempli, de 12 kg de maïs moulu et humidifié, dans 3 digesteurs, en plastique et d'une capacité de 30 litres chacun. Ces trois digesteurs sont équipés de manomètre pour la mesure de la pression et de thermomètre pour la mesure de la température, comme le montre la figure (IV-12). Pour chauffer et uniformiser les températures, chaque digesteur est placé dans un bain marie équipé d'une résistance électrique et régulé par un thermostat mécanique. Le biogaz produit dans les digesteurs est stocké dans une chambre à air qui joue le rôle de gazomètre. Afin de faire des prélèvements de solution pour mesurer le pH, chaque digesteur est équipé d'un robinet placé sur le côté. Le vide dans les digesteurs est réalisé à l'aide d'une pompe à vide classique.

**Expérience_2** : Etude qualitative de la production du biogaz

Pour cette expérience, nous avons conçu un digesteur plus évolué et d'une capacité plus importante. Il est équipé de tous les éléments nécessaires à la production du biogaz, à sa purification, à son stockage et à son utilisation comme le montre la figure (IV-13).



Figure IV-13 : Dispositif expérimental plus évolué

B - 1.2 / Paramètres de la fermentation

En plus des paramètres cités dans la partie (A), nous nous sommes intéressés à deux autres paramètres importants, de la digestion anaérobie, et que nous n'avons pas testé dans la première partie.

Ces deux paramètres sont :

1. L'agitation qui permet entre autres d'homogénéiser les conditions du milieu, de prévenir contre l'acidification complète du milieu, de maîtriser le transfert de matières, et de multiplier les contacts entre les substrats à digérer et la flore fixée.
2. L'épuration du biogaz car ce dernier est un mélange corrosif pour certaines utilisations. Une des techniques d'épuration utilisées est l'épuration par passage du biogaz à travers la chaux, en vue d'une déshydratation et d'une élimination du CO₂.

B - 2 / Résultats et discussion**B – 2.1 / Volume de biogaz produit en fonction du temps**

Sur la figure (IV-14), nous avons représenté le volume de biogaz produit en fonction du temps dans un digesteur dont la température du substrat est maintenue à 30 °C. Ces relevés ont été réalisés du 25/03/2017 au 01/04/2017.

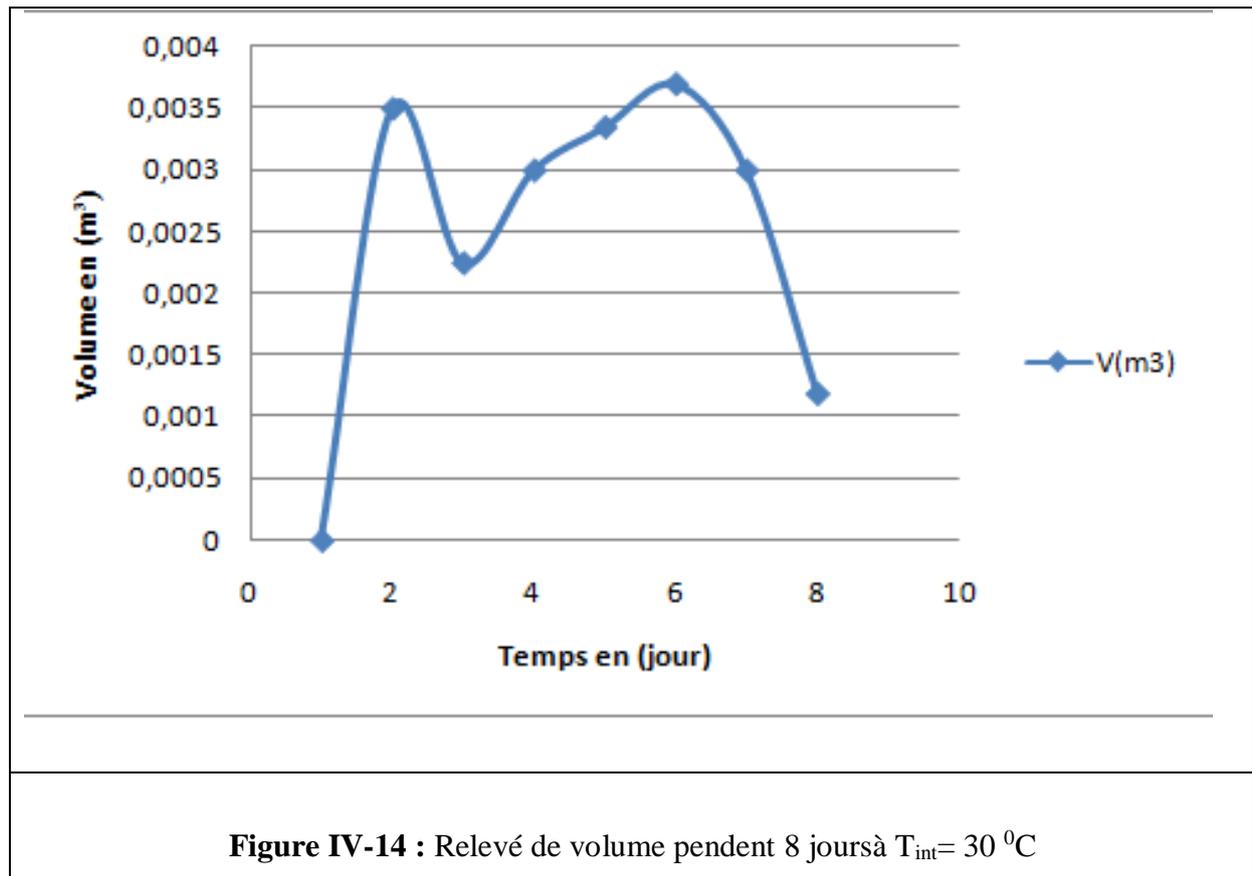


Figure IV-14 : Relevé de volume pendant 8 jours à $T_{int}= 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

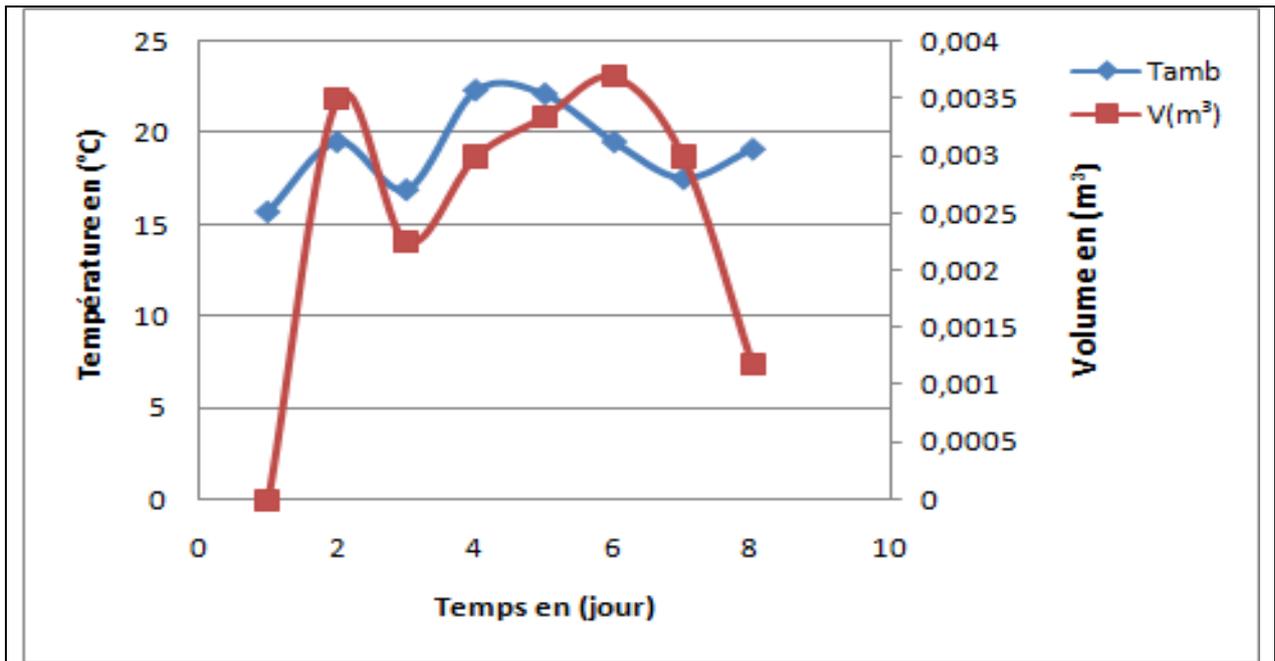


Figure IV-15 : Relevé de température et de volume pendant 8 jours à $T_{int} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

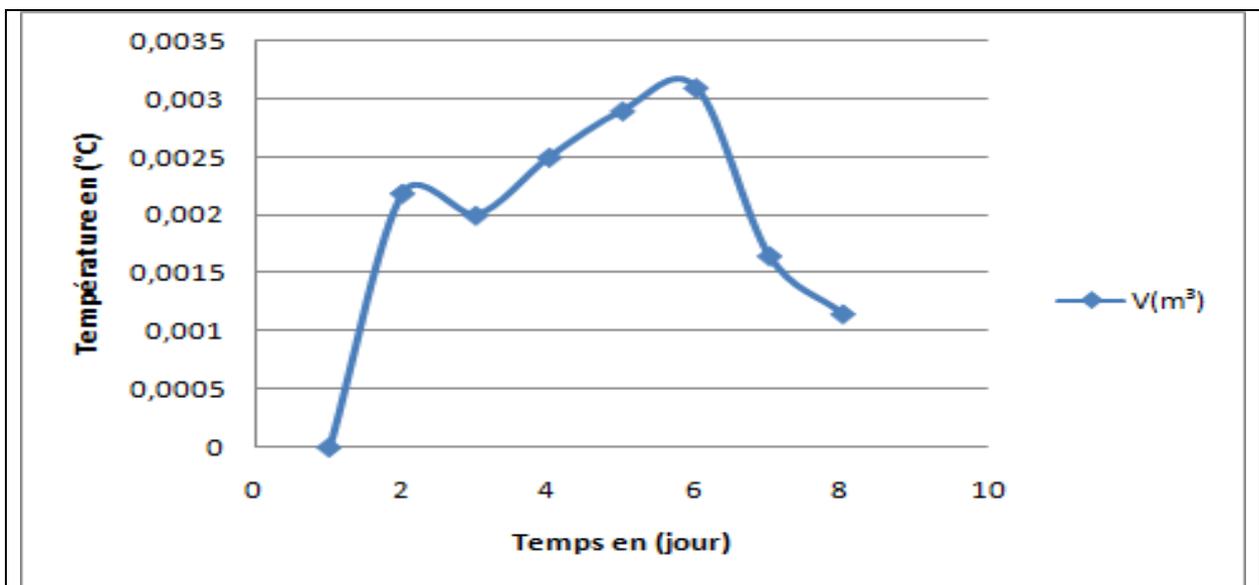


Figure IV-16 : Relevé de volume pendant 8 jours à $T_{int} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$

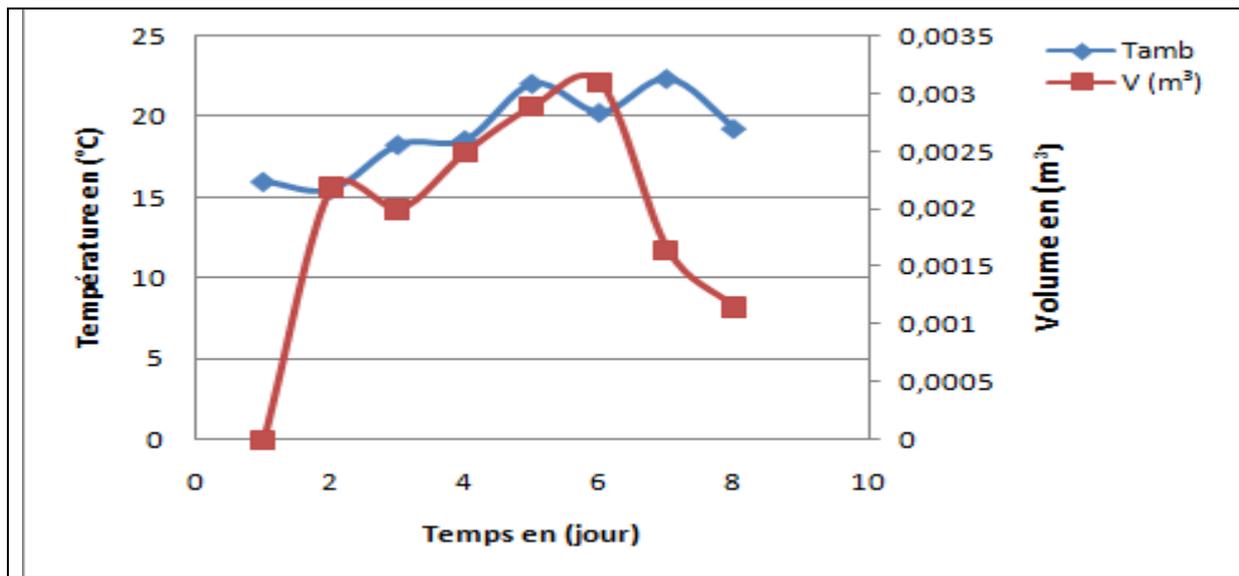


Figure IV-17 : Relevé de température et de volume pendant 8 jours à $T_{int}= 35\text{ }^{\circ}\text{C}$

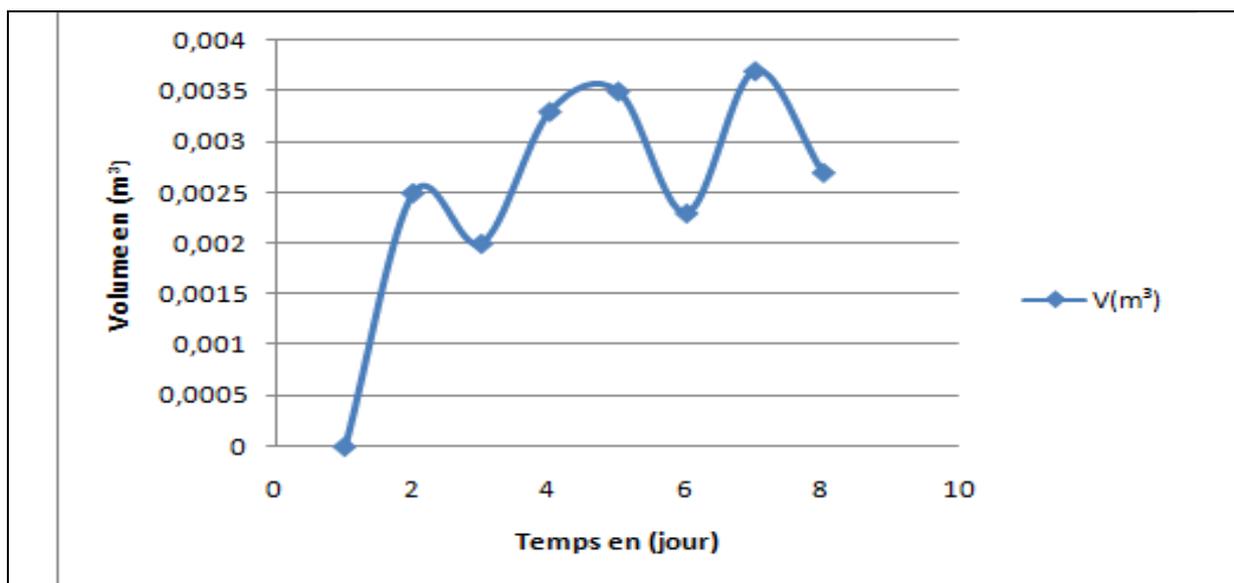


Figure IV-18 : Relevé de volume pendant 8 jours à $T_{int}= 40^{\circ}\text{C}$.

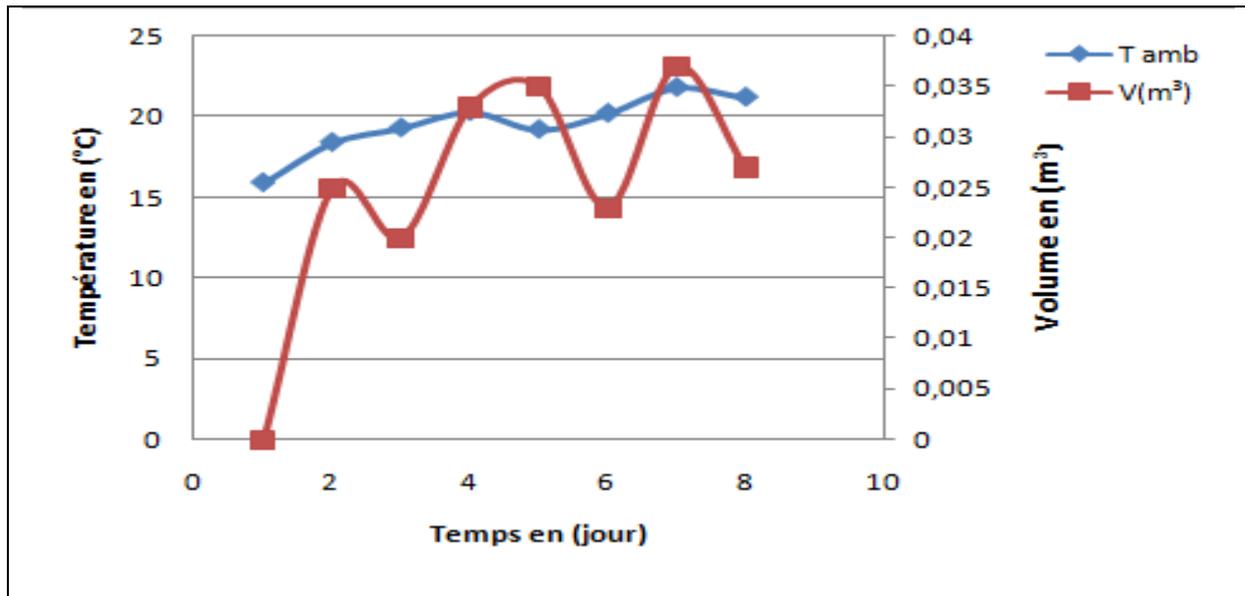


Figure IV-19 : Relevé de température et de volume pendant 8 jours à $T_{int}= 40^{\circ}C$

B – 2.2 / Volume de biogaz produit en fonction du temps et de la température

Sur la figure (IV-20), nous avons représenté le volume de biogaz produit en fonction du temps dans deux digesteurs dont la température du substrat est maintenue respectivement à 30 °C et 35 °C. Ces relevés ont été réalisés du 25/03/2017 au 01/04/2017.

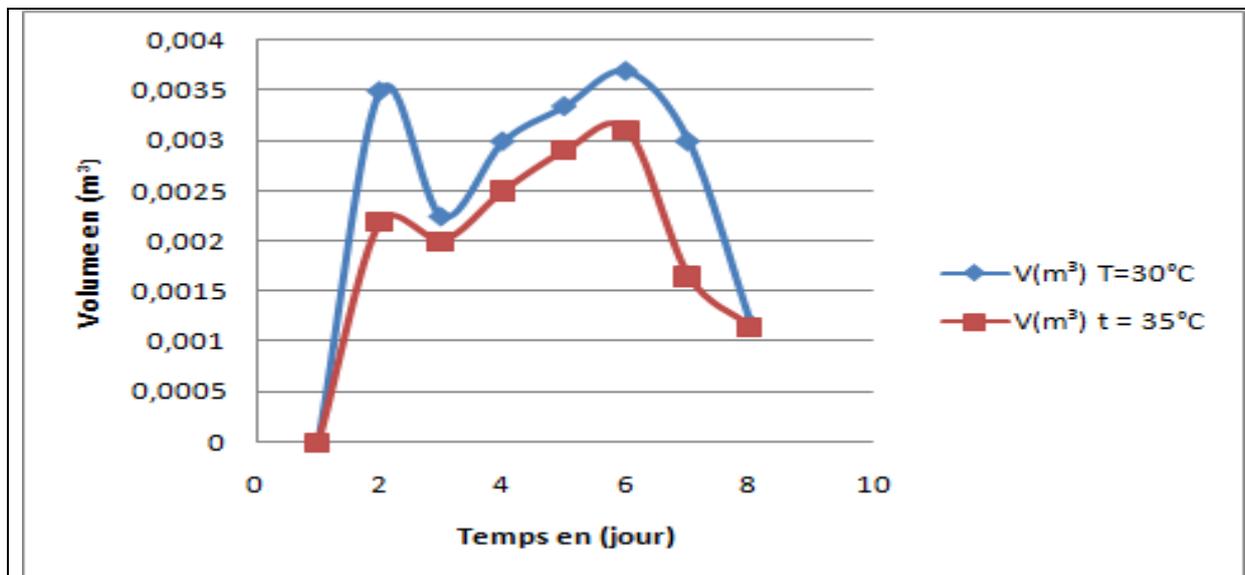


Figure IV-20 : Volume de biogaz produit en fonction du temps

B – 2.3 / Mesure de la proportion de CH₄ dans le biogaz produit



Figure IV-21 : Remplissage d'une seringue de 30 ml de biogaz est 30 ml d'eau de chaux



Figure IV-22 : Agitation de l'ensemble des deux produits

B – 2.4 / Estimation du pH



Figure IV-23 : Prélèvement d'un échantillon de solution



Figure IV-24 : Mesure du pH dans l'échantillon de la solution

B – 2.5 / Evolution des températures et de l'humidité

Sur la figure (IV-25), nous avons représenté les relevés au niveau de notre prototype de bio-digesteur ainsi que l'humidité en fonction du temps. Ces relevés ont été réalisés du 07/05/2017 au 14/05/2017.

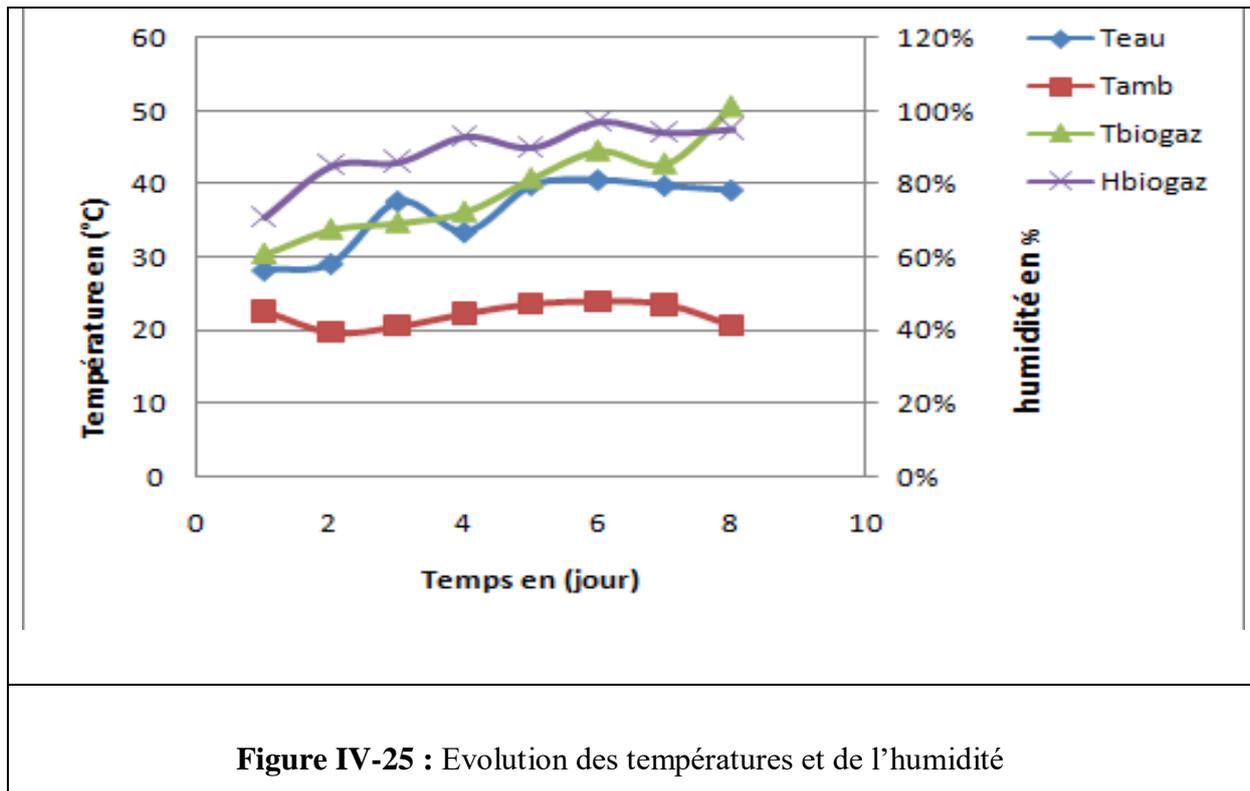


Figure IV-25 : Evolution des températures et de l'humidité

Conclusion

Notre pays est confronté actuellement à une obligation stratégique de la diversification de ses sources d'énergie dont l'objectif est d'économiser ses réserves énergétiques. L'introduction, dans notre pays, des énergies renouvelables telles que la production du biogaz, permettrait d'instaurer une société qui sera basée sur le recyclage et non le gaspillage. Il est connu que les énergies fossiles ne sont pas éternelles et que tôt ou tard l'exploitation démesurée épuisera les gisements existants.

Cette étude montre que l'intérêt de la valorisation des déchets organiques par fermentation méthanique n'est plus à démontrer. D'une part ils génèrent une source d'énergie renouvelable et d'autre part le résidu de fermentation constitue un apport important pour la fertilisation du sol.

Pour optimiser la bio-méthanisation des déchets organiques il est nécessaire de maîtriser plusieurs facteurs, dont la teneur en eau, l'agitation, le pH, la température, etc.... En décharge conventionnelle, ces facteurs ne sont pas maîtrisables. Par contre, la gestion de la dégradation anaérobie dans un digesteur permet de maîtriser la plupart de ces facteurs.

Le biogaz est le résultat de la digestion anaérobie des matières organiques. Dans ce travail, nous avons entrepris une série d'expériences, pour fermenter différents substrats et produire du biogaz inflammable.

Nous espérons que cette étude contribuera à ouvrir de nouveaux horizons pour une meilleure valorisation des déchets organiques et donc éviter la mise en décharges publiques qui sont nuisibles.

Références bibliographiques

- [1] ADEME, Fiche technique : Méthanisation., 2014.
- [2] COSEI Energies Renouvelables, Propositions d'actions pour la filière biogaz, 2008
- [3] IFIP, TechniPorc, Vol 32, N°4 - La revue technique de l'IFIP, 2009.
- [4] Devauchelle, Elen. Intérêt environnemental et bilan gaz à effet de serre des unités de méthanisation agricoles. S.l. : Solagro, 2013.
- [5] La méthanisation autour de nous. 2013.
- [6] Le biogaz au service du Ghana. AMCC, 2015.
- [7] ROBERT, N. Le Cameroun veut carburer au biogaz, 2015.
- [8] L.AMROUCHE Division Bioénergie et Environnement, bulletin des énergies renouvelables, CDER. Alger
- [9] BASTIDE, G. Benchmark des stratégies européennes des filières de production et de valorisation de biogaz. Angers : ADEME, 2014.
- [10] Direction générale de l'Energie et du Climat. Plan national d'action en faveur des EnR, 2010.
- [11] Bretagne Environnement. Bretagne Environnement. Consommation d'énergie finale par secteur et intensité énergétique des pays en Bretagne, 2010.
- [12] Direction régionale de l'Alimentation, de l'agriculture et de la Forêt. Agreste Bretagne, mémento. Rennes : Média Graphics, 1962-9486, 2015.
- [13] COUTURIER, Ch. Technique de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse – Rapport final,r 2009.
- [14] BOULINGUIEZ, Be. et LE CLOIREC, Pi. Purification de biogaz – élimination des COV et des siloxanes Technique de l'Ingénieur, 2011.
- [15] BOZEC, An. LE. Evaluations des technologies propres et durables de gestion de déchets.s.l. : Agence Nationale de la Recherche : Projet ANR-08-ECOT-004, Clean West, 2011.
- [16] Sa BOYER, Di. LABRUNIE, El. SEGARD. Projet Scientifique en Laboratoire : Fabrication de biogaz, 2009.
- [17] MARCHAIM, Ur. Bulletin des services agricoles de la FAO. Les procédés de production de biogaz pour le développement de technologies durables. 95. ISSN 1014-4218, 1994.
- [18] Gourdon, R. Traitement biologique des déchets - Méthanisation. G2060, 2001
- [19] Moletta, R. " Méthanisation de la biomasse – Méthanisation de la matière organique" BIO5100, 2008
- [20] NENUFAR. Référence projet Nénufar.

Références bibliographiques

Sites internet

- [1] ATEE. [En ligne] [Citation : 03 12 2015.] <http://atee.fr/biogaz/fiches-exemples-de-cites-de-m%C3%A9thanisation>.
- [2] l'Ecologie, Ministère de. Rapport sur les installations de cogénération sous obligation d'achat. 2007.
- [3] RECORD. Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse. 2009.
- [4] [http://www.bretagne-environnement.org/Media/Atlas/Cartes/Consommation-d-energie-](http://www.bretagne-environnement.org/Media/Atlas/Cartes/Consommation-d-energie-final-epar-secteur-et-par-pays-breton)
- [5] final épar-secteur-et-par-pays-breton.
- [6] <http://nenufar-biogaz.fr/temoignages/>.
- [7] <http://www.transition-energie.com/allemagneconversion-de-co2-en-biomasse-par-des-micro-algues/>.
- [8] <http://www.actuenvironnement.com/ae/dossiers/méthanisation /digestats-statut-dechets.php>.
- [9] <http://www.grdf.fr/documents/10184/1226738/Doc+3+--+Cataloguedes-prestations-GrDF-2014.pdf/0e33c84b-1858-432e-a1d3-62165ac6b4b3>.
- [10] <http://chercheurs.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Innovation/theses/These>.
- [11] <http://atee.fr/biogaz/fiches-exemples-de-sitesde-m%C3%A9thanisation>.
- [12] <http://www.pardessuslahaie.net/uploads/sites/9d9bbd0d4a9015c179802880bfed4ec2374783.pdf>
- [13] <http://nenufar-biogaz.fr/temoignages/>.
- [14] <http://www.20minutes.fr/magazine/cop21/les-projets/le-camerounveut-carburer-au-biogaz-9962/>.
- [15] <http://www.gcca.eu/fr/news-andevents/reportages-de-lamcc/le-biogaz-au-service-du-progrès-au-Ghana>.
- [16] <http://www.mtaterre.fr/dossier-mois/chap/1265/La-methanisation-autour-de-nous>.
- [17] <http://www.bio-energie-promotion.fr>.
- [18] <http://www.france-biogaz.fr/>.
- [19] http://www.biogaz-energie-renouvelable.info/biogaz_ressources.html#class2.

Annexes

Annexe 1 :

Tableau A1-1 : Tableau récapitulatif de différentes impuretés présentées dans le biogaz brut, leurs origines et leurs conséquences

Impureté	Origine	Conséquence(s)
O ₂	<ul style="list-style-type: none"> - Défaut d'étanchéité dans ledigesteur ou lors du procédé d'extraction. - Oxygénation dans le digesteur lors de l'élimination d'H₂O 	Diminue le pouvoir calorifique du biométhane produit
CO ₂ (25 à 50% en volume)	Processus de méthanisation	<ul style="list-style-type: none"> - Diminue le pouvoir calorifique du biométhane produit - source de corrosion en présence d'eau
Composés azotés (NH ₃ ...) (0 à 3% en volume)	Processus de méthanisation	<ul style="list-style-type: none"> - Accélère et amplifie-la combustion : contraintesthermiques importantes - Si oxydation en NO_x lors de la combustion : pollution des fumées - Si passage dans les huiles : Corrosion
Eau (1 à 5% en volume)	Processus de méthanisation	<ul style="list-style-type: none"> - Réaction avec H₂S : formation d'acides sulfureux (corrosion) - Baisse rendement moteur - Source indirecte de corrosion (en présence de CO₂ parexemple) - Entraîne condensation dans les parties froides du système

Annexes

<p>Les composés soufrés (H₂S allant jusque 20 000ppm) (0 à 1% en volume)</p>	<p>Processus de méthanisation</p>	<ul style="list-style-type: none"> - corrosion des conduites, des différentes installations (en milieu humide, H₂S corrode l'acier rapidement : jusque 1mm par an) - acidification de l'huile du moteur : augmente-la fréquence des vidanges nécessaires - pollution - détérioration des catalyseurs
<p>Les composés organiques volatils (COV) (majoritairement alcanes et composés aromatiques comme le toluène mais aussi composés halogénés, alcools...)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Fermentation de la matière organique _ formation par dégradation - déjà présents dans les déchets (ménagers, pharmaceutiques...) _ émission directe 	<ul style="list-style-type: none"> - Diminue le pouvoir calorifique du biométhane produit - Si combustion en présence d'eau : dégradation des équipements (corrosion) et acidification des huiles de moteur et des fumées
<p>Siloxanes (0 à 100mg.m-3)</p>	<p>Processus de méthanisation</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dépôt et accumulation de silice dans les conduits et encombrement/obstruction de ceux-ci - Endommage-les moteurs/micro turbines etc. et diminue leur performance - Augmentation de la maintenance des installations et donc diminution de la disponibilité des installations.
<p>Azote N₂ (0 à 5% en volume)</p>	<p>Processus de méthanisation</p>	<p>Présent dans l'eau</p> <p>Diminue le pouvoir calorifique du biométhane produit</p>

Annexes

Poussières		- Obstruction des équipements - Réduit l'efficacité des Catalyseurs
------------	--	--

Tableau A1-2 : Proportion de H₂S dans le biogaz en fonction de sa provenance

Lisiers + déchets de culture	2000 ppm -peuvent aller jusqu'à 4000 ppm - peut descendre jusqu'à 220 ppm avec l'aération
Boue	1666 ppm
Ordures ménagères triées	333 ppm
Décharge	23.8 ppm

Tableau A1-3 : Composition molaire d'un biogaz en fonction de sa provenance

	CH ₄	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O
Lisiers + déchets de culture	62	33.5	0.25	0.6	4
Boue	67.5	26	0.5	0.25	6
Ordures ménagères triées	55	36	2.5	0.5	6
Décharge	42	35	15.5	4.5	4
Incertitudes	10 %	7 %	±1 %	±1 %	±2%

Annexes

Tableau A1-4 : Proportions de gaz et de métaux dans le biogaz et le digestat en fonction de la provenance

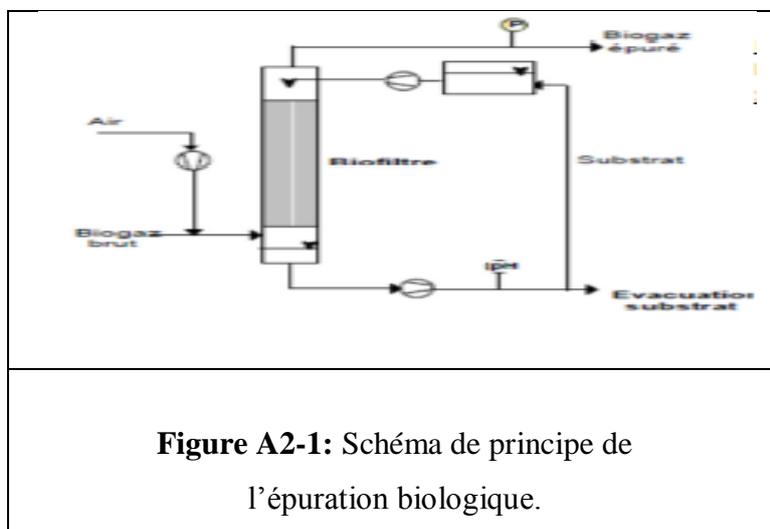
	CO (ppm)	Cuivre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Chrome ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fluore (mg/m^3)	Chlores (mg/m^3)	SO ₂ (mg/m^3)	NH ₃ : (mg/m^3)
Lisiers + culture	28	1.3	80.1	22.5	25	0.16	0.53
Boues	25.5	4	71	30	10 à 80	0.009	15
Ordures ménagères	10	1.4	25	< 20	40	ND	ND
Décharge	5	1.9	12.3	20	45	1.802	ND

On remarque que les boues et les déchets agricoles sont les plus intéressants au niveau de pouvoir méthanogène. Cependant, ce sont les installations avec les taux les plus élevés en H₂O (le taux en H₂S peut néanmoins être diminué jusqu'à 150 ou 200 ppm selon les installations) CO et composants fluores. Il est donc nécessaire de bien veiller à ce que les quantités ne dépassent pas les normes législatives, et implanter des méthodes pour éliminer ces composants dangereux pour la santé et l'environnement, quitte à baisser le rendement en méthane. Les boues contiennent de plus des métaux lourds et des composés chlorés à ne pas ignorer. Les inconvénients des décharges, d'ordures triées ou non, mise à part la teneur en méthane plus faible, sont la présence de métaux lourds et composés chlorés mais aussi de siloxanes, préjudiciables pour les tuyaux, moteurs et systèmes d'épuration. Il faut néanmoins noter une importante proportion de CO₂, qui peut devenir intéressante dans l'optique de le valoriser.

Annexes

Annexe 2. Autres méthodes de purification

Filtre biologique :



On pourra consulter pour plus de détails (30), (31), (32), (33) et (34).

Annexe 3.

Solutions technologiques pour la cogénération :

Tableau A3-1 : Tableau de différentes technologies disponibles

	Moteurs	Turbines à gaz	Micro-turbines
Gamme de Puissance	30kW a 6.3MW	1.2 a 15MW	30 à 250kW
Développement de la technologie	Important I	Important	En cours
Rendement électrique (diminue avec la puissance électrique)	A Gaz : de 27 a 37% Dual fuel : de 35 a 45%	De 25 a 34%	

Evolution du rendement d'un moteur en fonction de la puissance électrique.

Annexes

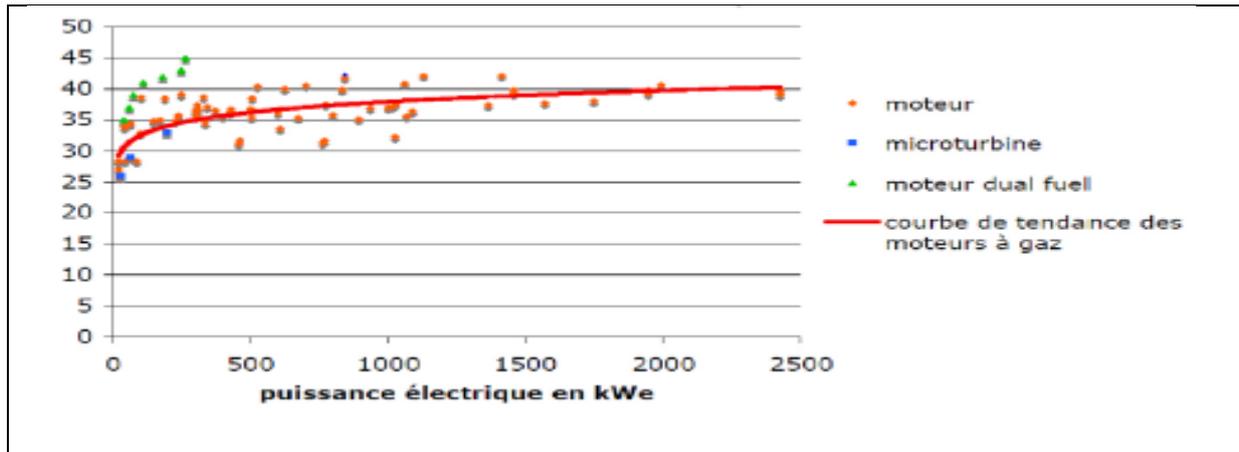


Figure A3-1: Rendement en fonction de puissance

En zoomant sur une gamme plus restreinte de puissance :

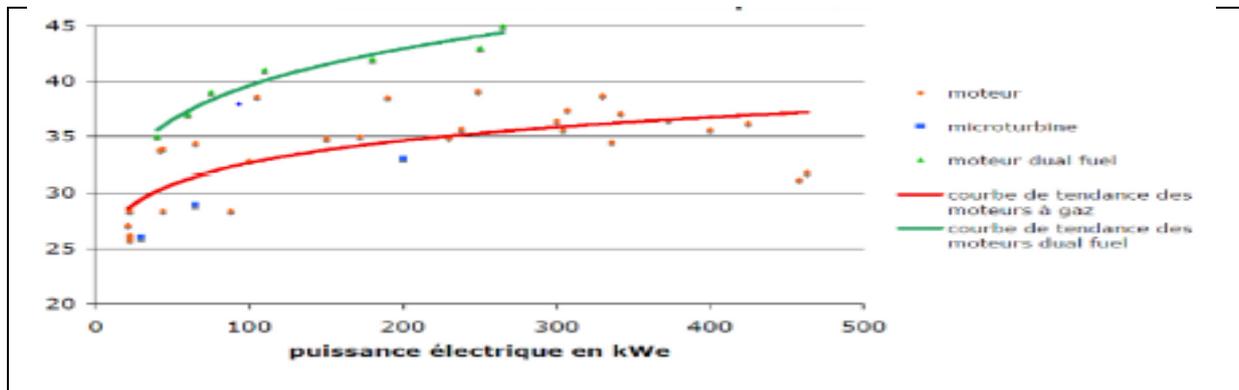


Figure A3-2: Rendement en fonction de puissance

Le rendement thermique est inversement proportionnel au rendement électrique comme le montre ce graphique :

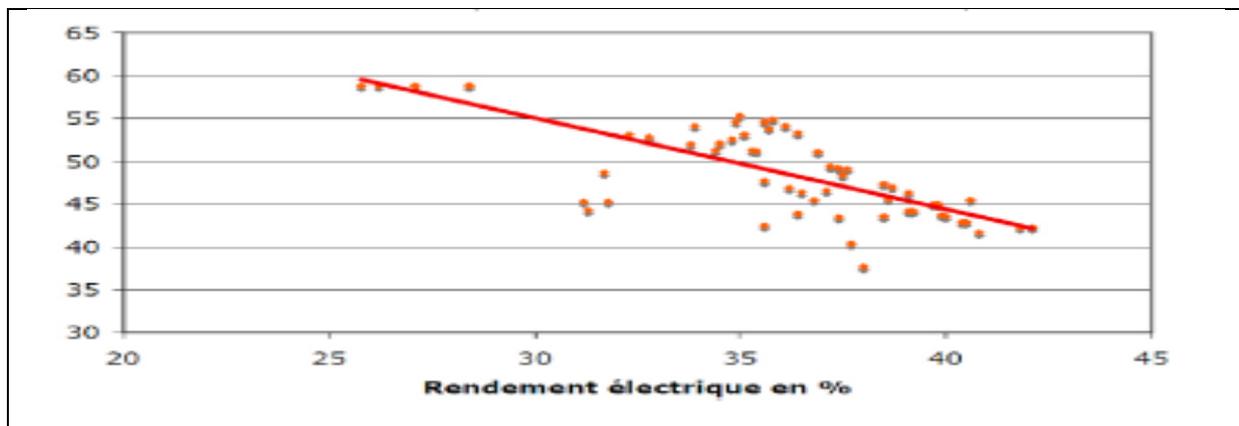


Figure A3-3: Rendements thermique en fonction du rendement électrique

Annexes

Une comparaison plus précise des micro-turbines et des moteurs peut également être réalisée.

Tableau A3-2: Comparatif des différentes technologies disponibles

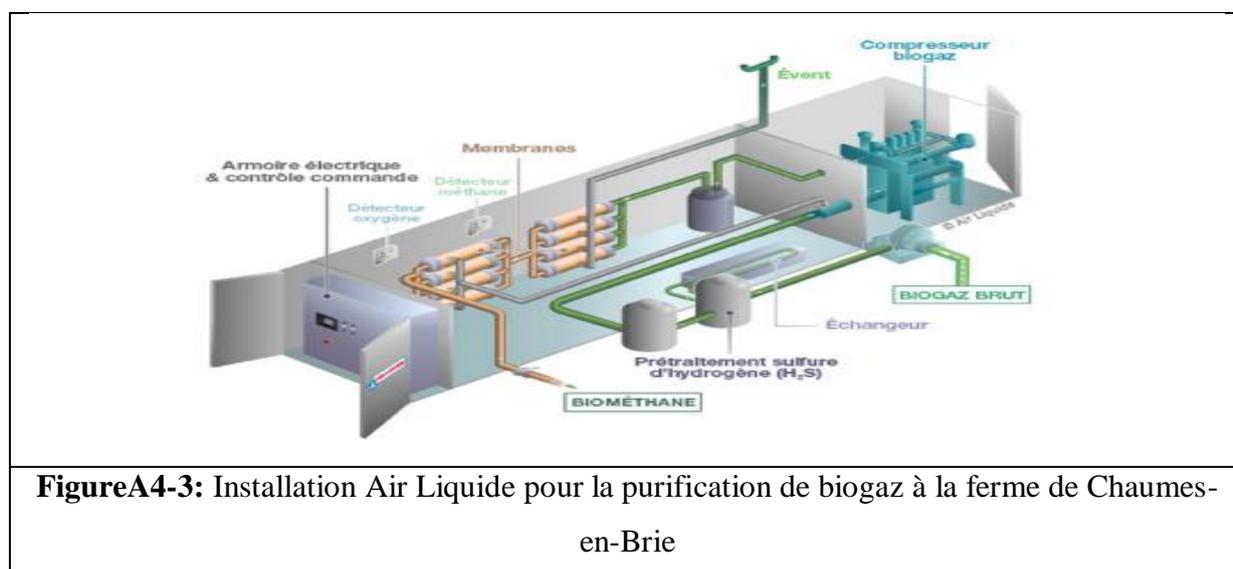
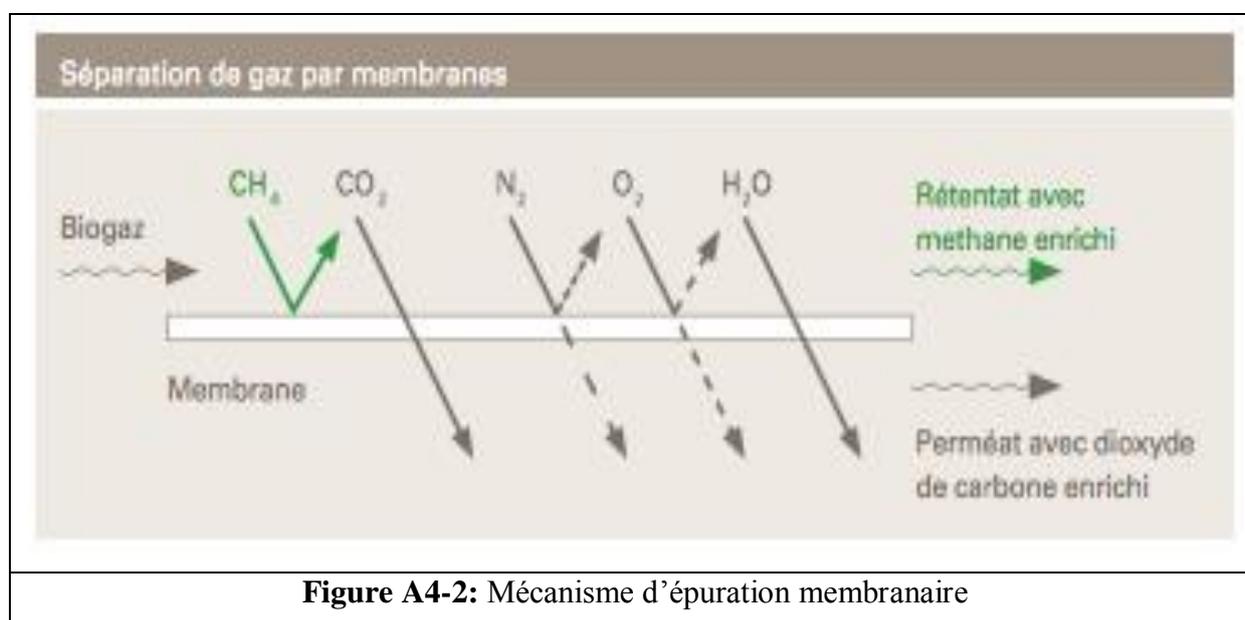
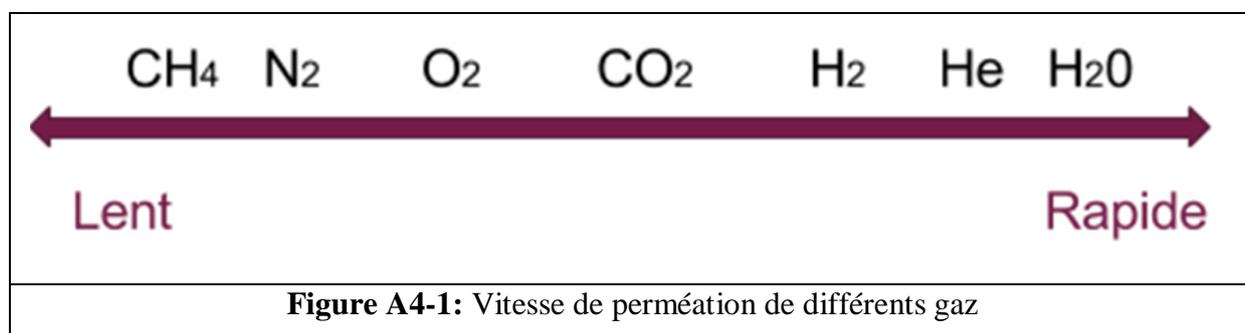
	Moteur	Micro-turbine	Turbine a combustion
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Bon rendement électrique (de 35 à 45%) - Ne nécessite pas de prétraitement particulier : fonctionnement possible avec des impuretés mais implique maintenance plus régulière et spécifique - Gamme étendue de puissance (de 40kW a 3MW) - Technologie connue et Répandue 	<ul style="list-style-type: none"> - Disponibilité : 94 a 98% Maintenance réduite car une seule pièce motrice et pas d'utilisation d'huile - Valorisation des gaz pauvres : teneur minimum en méthane nécessaire : 35% - Peu de pollution NOx et CO (10 fois moins que les moteurs) 	<ul style="list-style-type: none"> - Gamme de puissance allant de quelques dizaines de kW a 100MW - Bon rendement (entre 25 et 45% en fonction de la puissance) - Disponibilité : 94 a 98% - Maintenance réduite car une seule pièce motrice et pas d'utilisation d'huile
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Disponibilités : 75 a 90% - Faible valorisation des gaz pauvres : taux de méthane minimum compris entre 40 et 45% - Forte pollution (NOx,CO) - Beaucoup d'utilites (huiles, bougies...) Maintenance importante 	<ul style="list-style-type: none"> -Faible rendement électrique : 26 a 33% - Sensibilité aux siloxanes : prétraitement obligatoire (la plupart du temps adsorption sur charbons actifs) 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible rendement électrique : 26 a 33% - Sensibilité aux siloxanes : prétraitement obligatoire (la plupart du temps adsorption sur

Annexes

	<ul style="list-style-type: none">- Arrêt nécessaire si taux de charge < 50% de la charge nominale	<ul style="list-style-type: none">- Gamme restreinte (quelques dizaines de kW)- Coût d'investissement peu élevé	charbons actifs)
Solution adaptée pour/si...	<ul style="list-style-type: none">- Petite installation et utilisation locale- Taux de biogaz > 40%Débit stable	<ul style="list-style-type: none">- Teneur en méthane faible- Centre de stockage des déchets (car plus de flexibilité)	

Annexes

Annexe 4.



Annexe 5.

Décarbonations

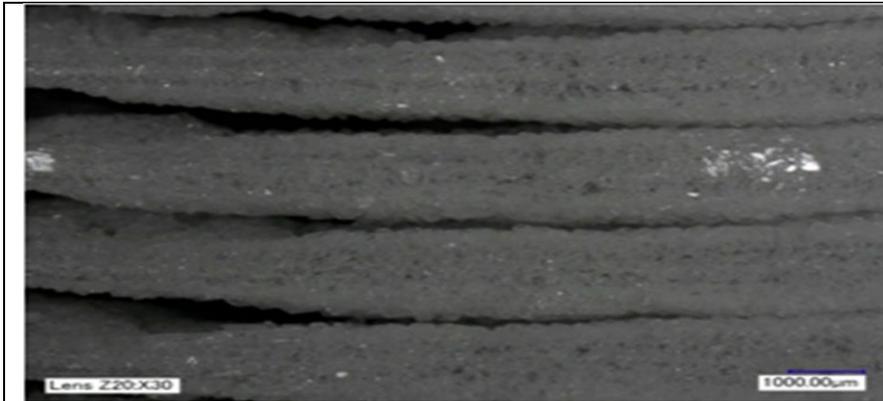


Figure A5-1: Croissance du CO₂ solide sur un échangeur de chaleur à basse température

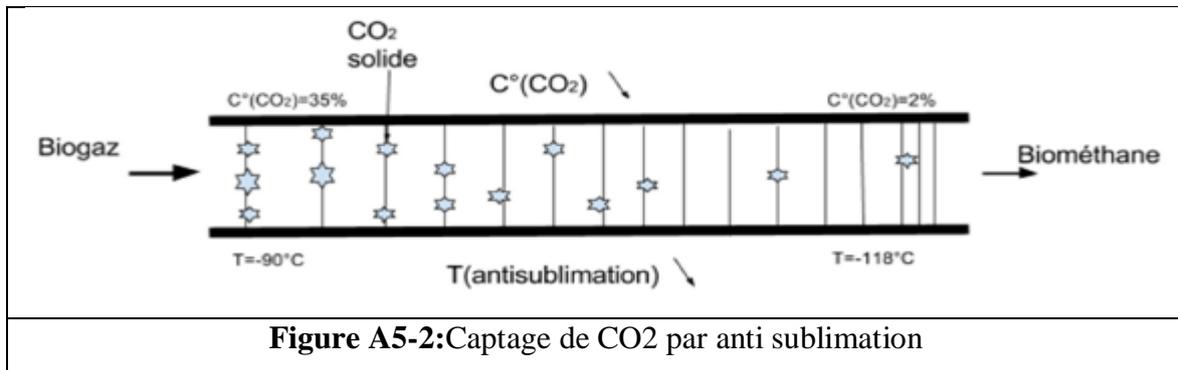


Figure A5-2: Capture de CO₂ par anti sublimation

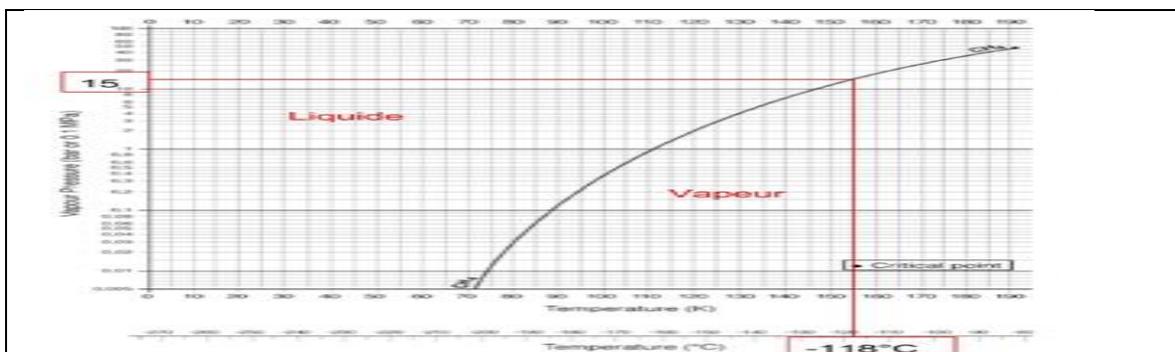


Figure A5-3: Diagramme d'équilibre liquide-vapeur du CH₄

Annexes

Annexe 6.

Dépendance de la température d'antisublimation du CO_2 en fonction de sa fraction molaire dans le biogaz.

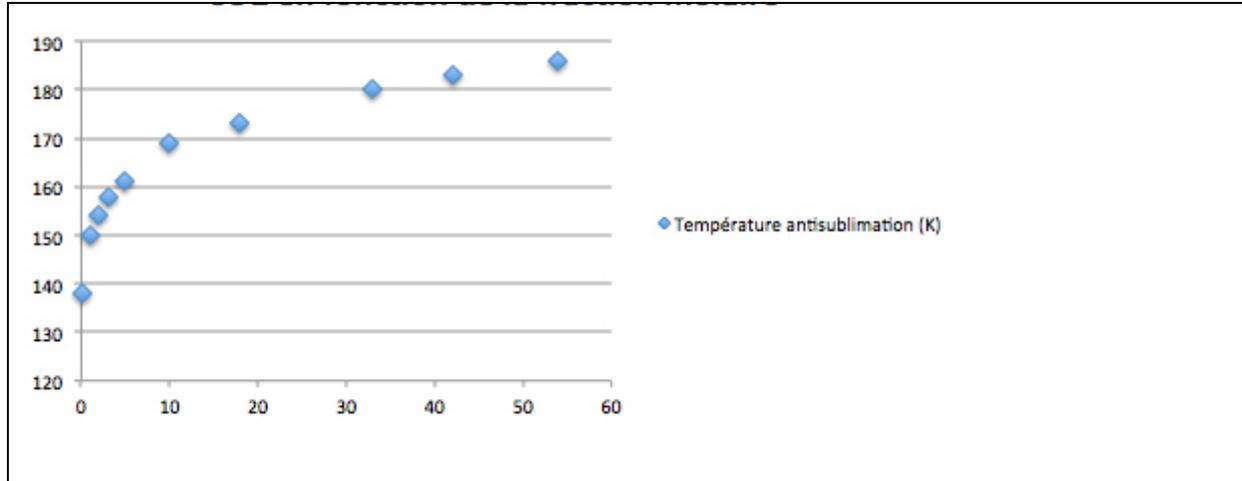


Figure A6-1 : evolution de temperature d'antisublimation du CO_2 en fonction de fraction molaire

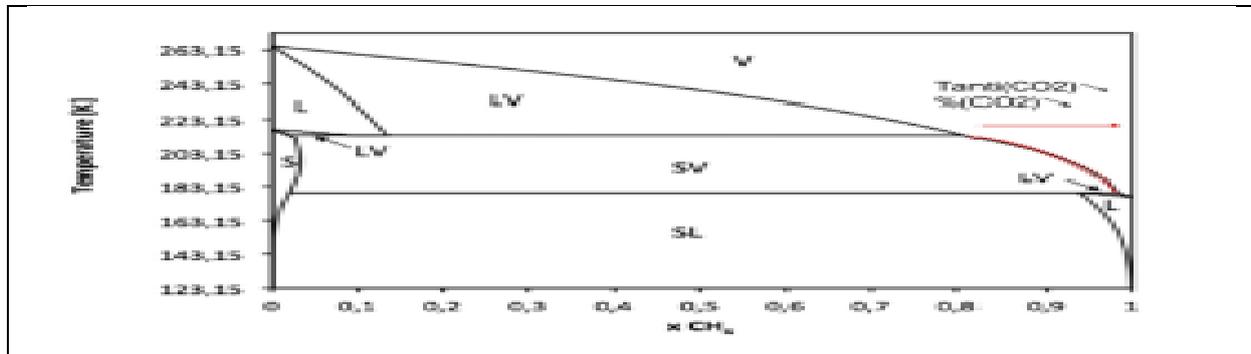


Figure A6-2: Diagramme binaire CH_4/CO_2 à 30bars

Annexes

Annexe 7.

Valorisation du CO₂ par les micros algues

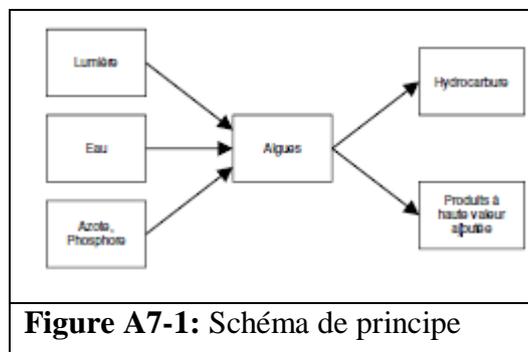


Figure A7-1: Schéma de principe

Annexe 8.

Injection du CO₂ sous terre

Le CO₂ peut être injecté dans des formations géologiques.

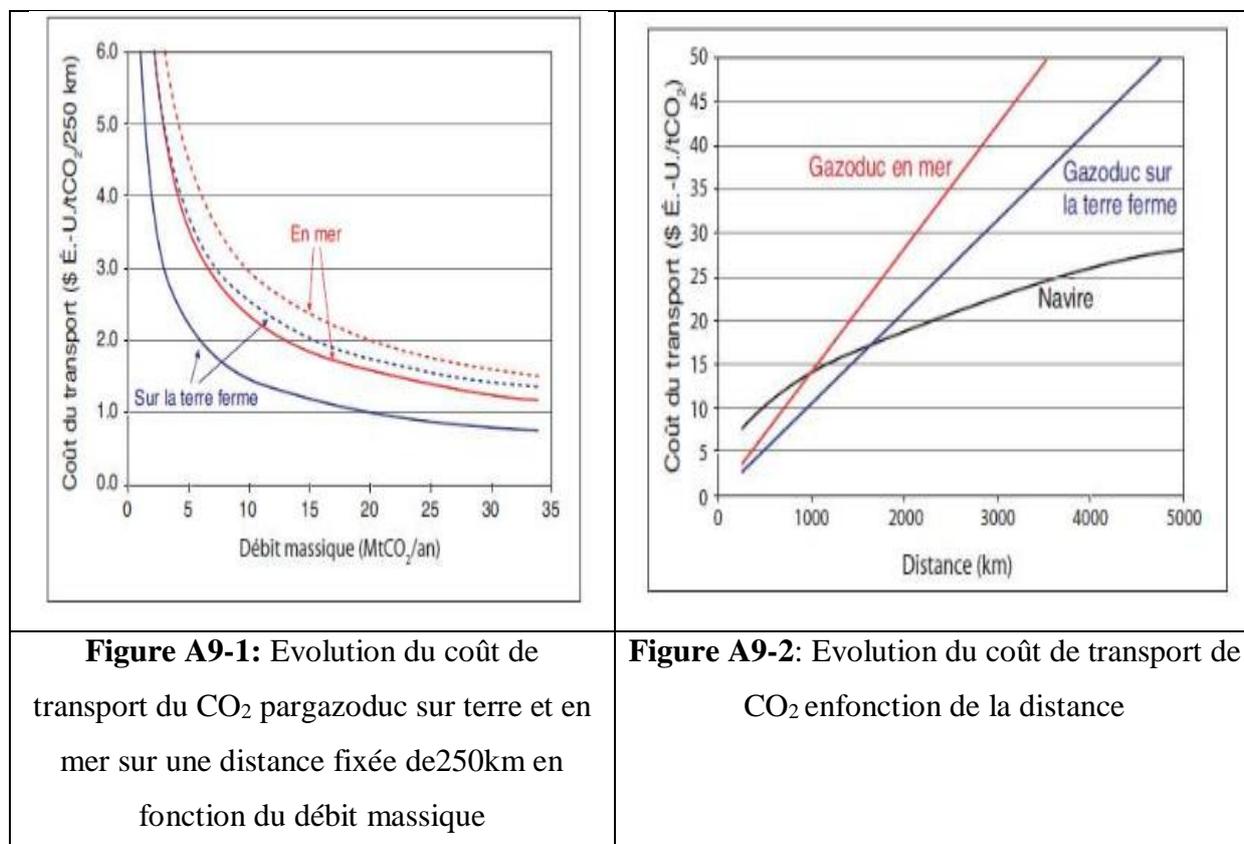
Tableau A8-1: Tableau des potentiels de stockage

Formation géologique	Capacité de stockage	Coût pour une tonne de CO ₂
gisements de pétrole et de gaz	675 à 900Gt	0,5 à 8\$+ 0,1 à 0,3\$ pour la surveillance
formations profondes (grand aquifère, stockages salins ou argileux...)	1 000 à 10 000Gt	
gisements houillers non exploitables	5 à 200Gt	

Annexes

Annexe 9.

Transport du CO₂



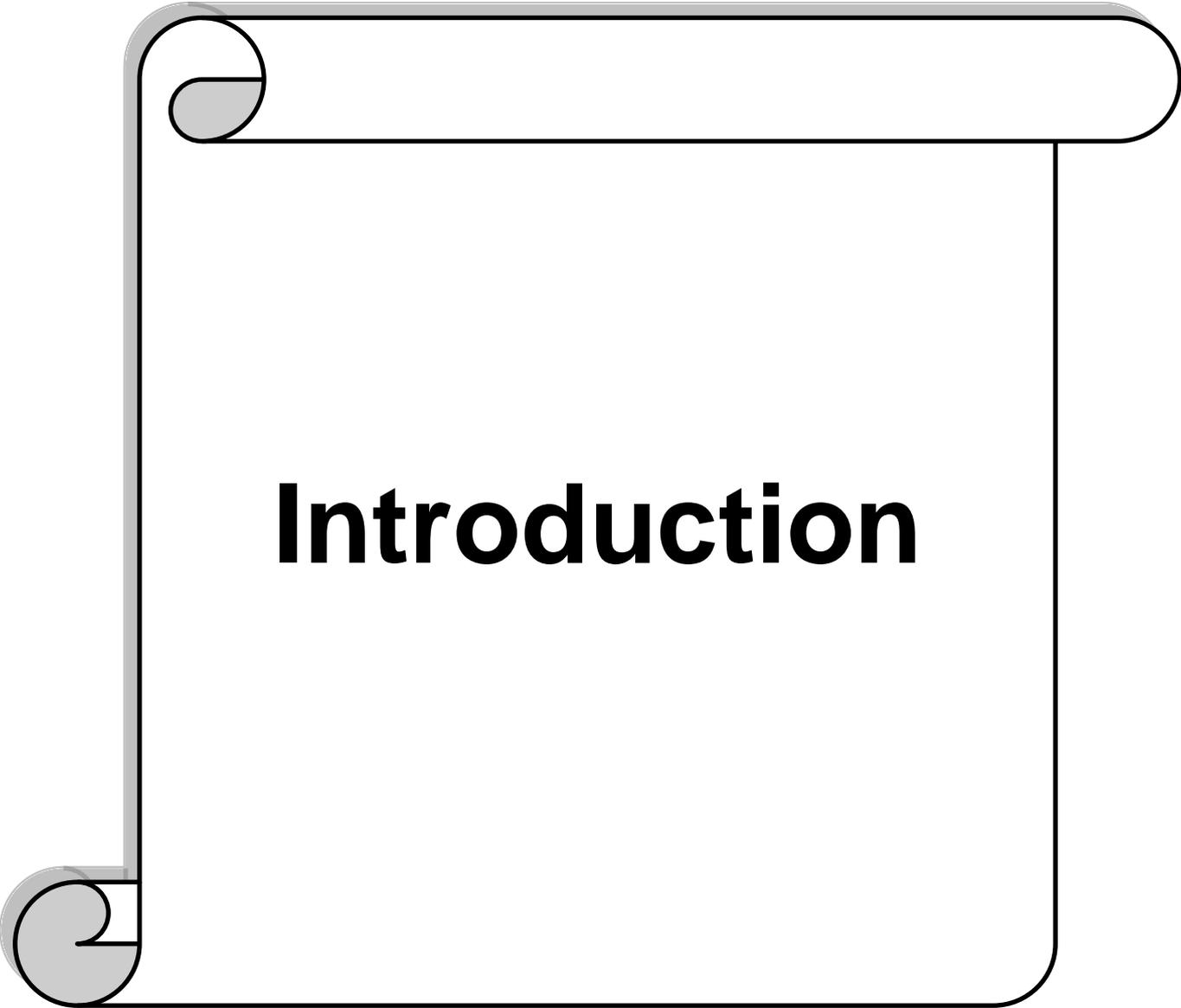
Annexe 10.

Cahier de charge :

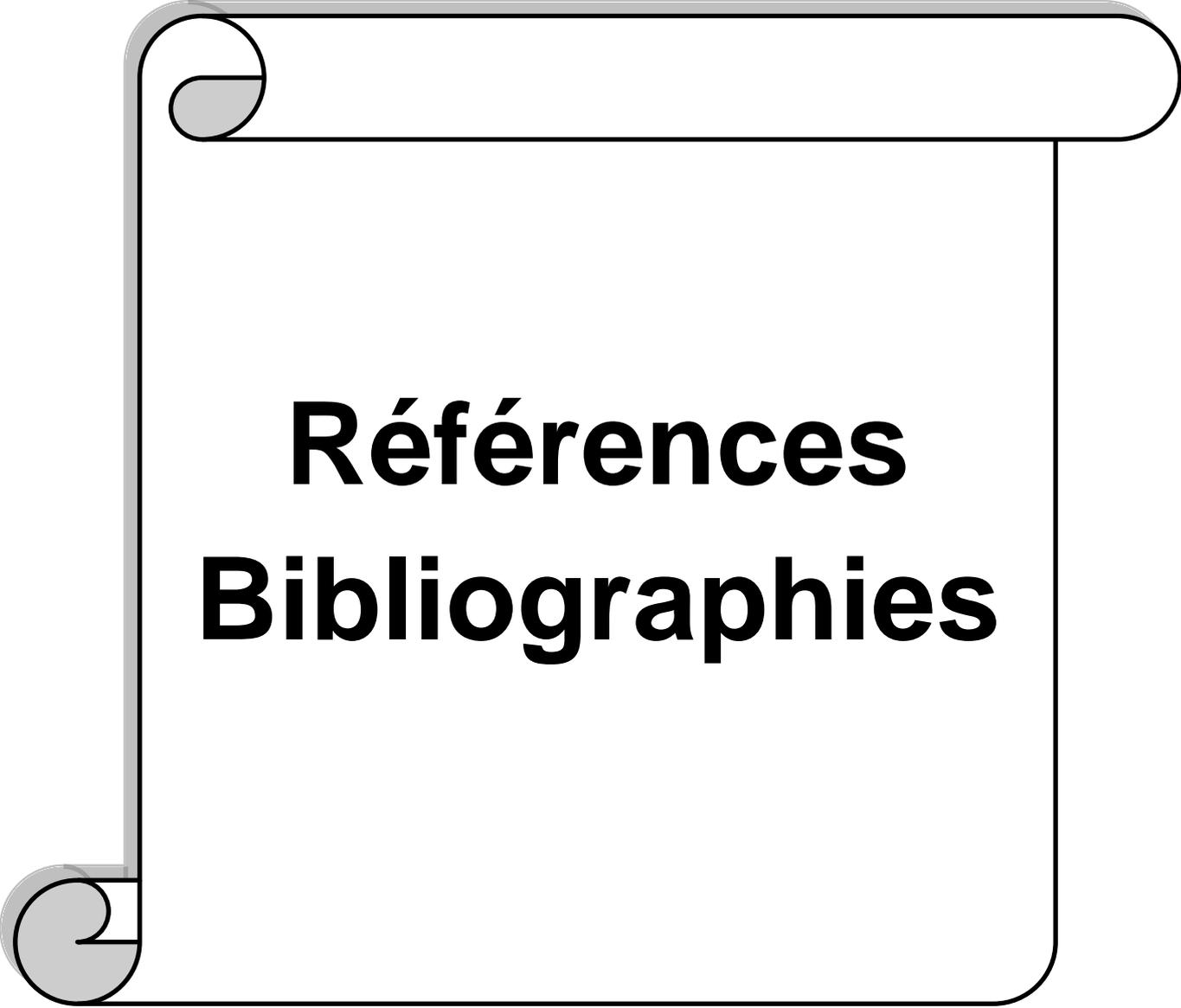
Etude et réalisation d'un bio digesteur expérimental équipé de :

- Gazomètre
- Epurateur de gaz
- Appareil de mesure « T, P »
- une soupape de sécurité

Volume journalier 10L /jour de biogaz produit.



Introduction



Références
Bibliographies



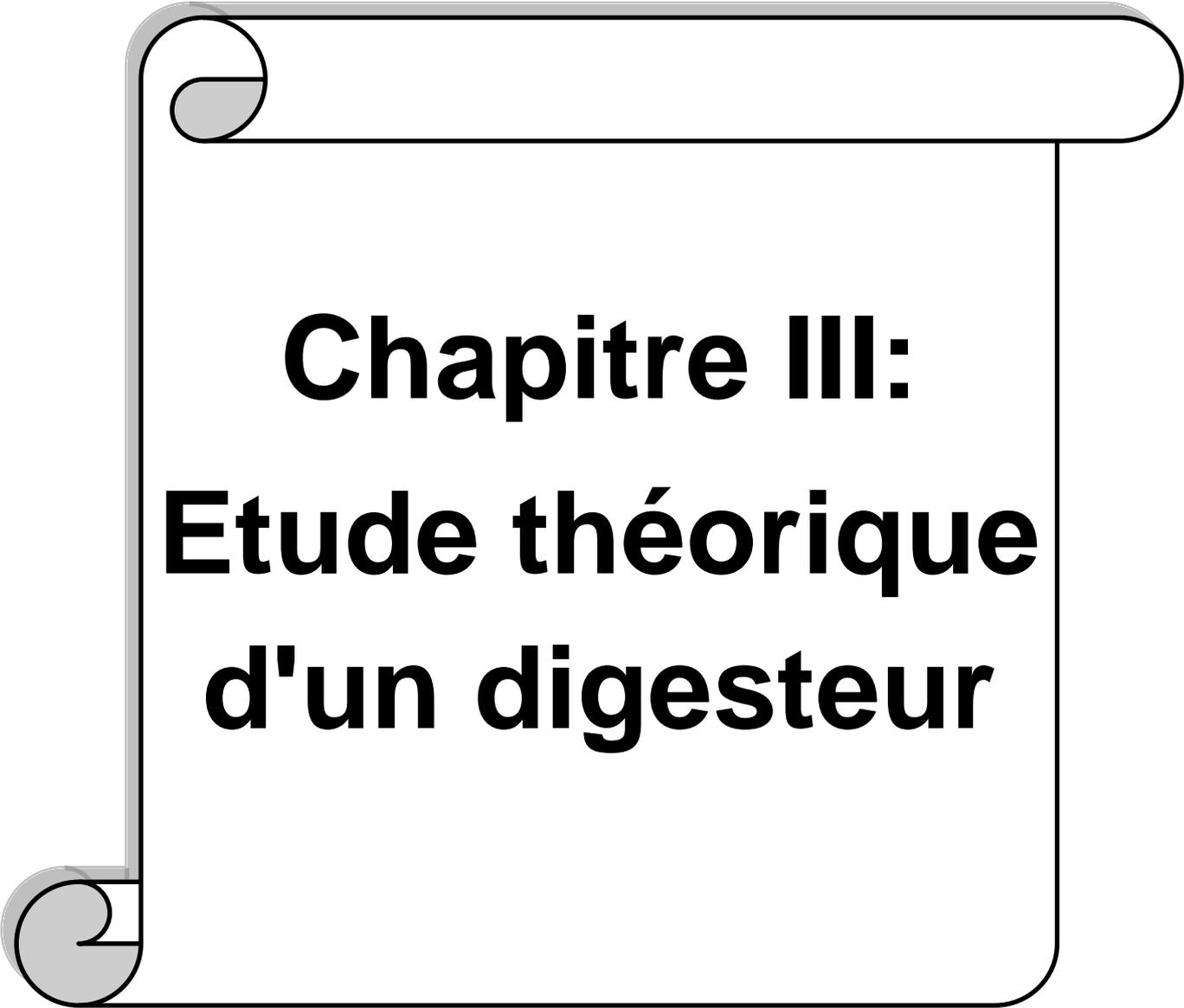
Chapitre I :
Etat de l'art sur
le biogaz



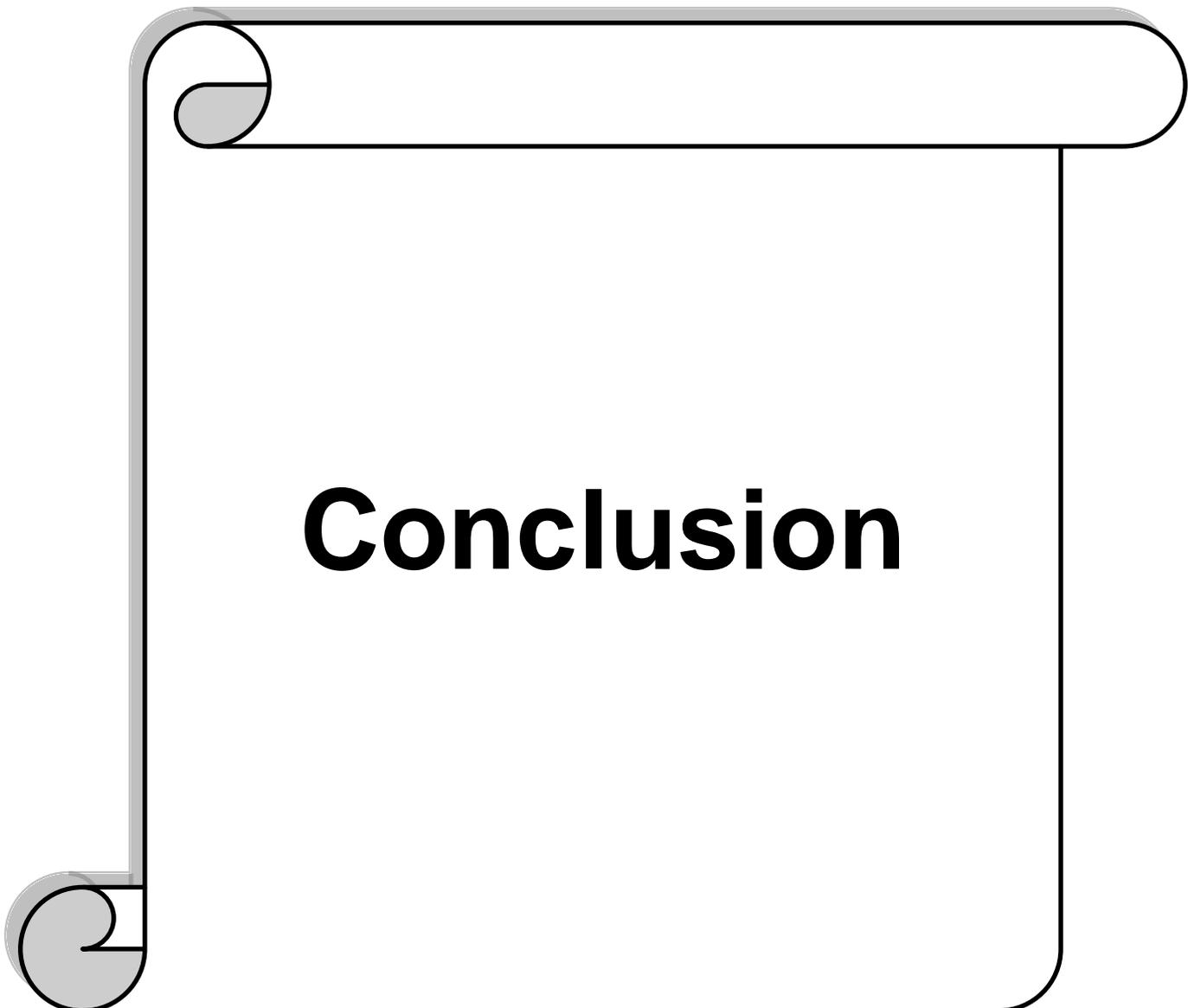
Chapitre II :
La production
de Biogaz



**Chapitre IV:
Résultats
Expérimentaux**



**Chapitre III:
Etude théorique
d'un digesteur**

A graphic of a scroll with a black outline and a light gray shadow. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges curled. The word "Conclusion" is written in the center of the unrolled section in a bold, black, sans-serif font.

Conclusion