

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



UNIVERSITE AHMED DRAIA -ADRAR-  
جامعة أحمد دراية-أدرار

Année/2021

Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département des Sciences de la Matière

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme de Master en

**Chimie**

**Option : Chimie de l'Environnement**

## **Thème**

***Simulation de rendement de méthane des  
différents types des déchets organiques dans  
la région d'adrar***

**Présenté Par :**

***Melle. Ghani Asia***

***Melle. Hamouda Rahma***

**Devant le jury composé de:**

<b>Mr. Nom et Prénom</b>	Président	Grade	Université Ahmed Draia-Adrar
<b>Mr. khalladi M Fadel</b>	Rapporteur	Grade	Université Ahmed Draia-Adrar
<b>Mr. Nom et Prénom</b>	Examineur	Grade	Université Ahmed Draia-Adrar

**Année Universitaire 2020/2021**



## Remerciements

Louange à Dieu, l'Audient, le grand, le Possesseur de la gloire et de la grande grâce, et que les prières et la paix soient sur le Noble Prophète, le Guide, et toute sa famille et ses compagnons.

Nous remercions Dieu Tout-Puissant, qui nous a éclairés sur le chemin de la connaissance et de la connaissance et nous a aidés à mener à bien ce travail.

Nous adressons également nos remerciements et notre gratitude au **Dr.**

**KHALLADI M FADEL** et professeur **TAHRI AHMED** pour avoir accepté la supervision de cette étude, qui n'ont pas réussi à fournir des conseils et des orientations tout au long de la conduite de cette étude grâce à leurs précieux conseils et orientations à toutes les étapes de la recherche.

Nous remercions également tous les professeurs de la Faculté des sciences des matériaux.

Nous remercions ma famille et tous ceux qui nous ont aidés, de près ou de loin, et nous ont aidés à accomplir ce travail avec leur coopération et leurs encouragements.

## DEDICACES

A l'âme du Bien-Aimé ,le Sceau des Prophètes et Messenger du Seigneur des Mondes , l'élu , le Digne de Confiance , que dieu le bénisse à tout moment .

A tous ceux qui m'ont appris une lettre dans ce monde mortel

Je dédie ce fruit de mes efforts à la personne la plus chère et la plus précieuse de ma vie qui a éclairé mon chemin de Ses conseils et était une mer limpide coulant avec une abondance d'amour et de sourire

A celui qui a décoré ma vie de l'éclat de la pleine lune et des bougies de joie, à celui qui m'a donné la force et la détermination de continuer le chemin et a été la raison de poursuivre mes études

A qui ni les mots ne suffisent pour exprimer son amour

A celle qui m'a appris la patience et l'assiduité A m'a chère **Mama**, qui Dieu la protège.

A celui qui a lutté dur pour mes soins, mon éducation et mon éducation Au symbole de la constance et du don Au symbole de la force et de la pureté A mon modèle en matière d'éducation et de morale Le plus cher que j'ai dans l'univers Mon cher **Père**, que Dieu le protège et le protéger.

Aux personnes les plus chères de mon âme, les personnes les plus proches de mon cœur, la lumière de ma vie, et celle qui m'a soutenu dans mon cheminement, mon bien-aimé et mon compagnon, **Mon Cher Mari**, jusqu'à la chaleur et le bonheur de la maison, mes frères, chacun en son nom :**Yousef , Younes , Toufik , Mohamed alghali , Lokman**.

A ma famille et la famille de mon mari A mes oncles et tantes A mes oncles et tantes et leurs enfants.

A ceux avec qui les jours m'ont rapproché et avec eux les liens de savoir et de savoir et de savoir à tous ceux qui ont eu un bel impact dans ma vie.

A qui tu as partagé la douceur et l'amertume de cet acte **Hamouda Rahma**, une miséricorde à tous ceux qui portent le titre **de Ghani et Ben Salah**.

A tous ceux qui m'ont souhaité du succès et m'ont inculqué l'esprit de persévérance.

A tous ceux que j'aime et apprécie

GAHNI Asia

# **Tableaux des métiers**

Liste des figures .....	I
Liste des tableaux .....	II
Liste des photos.....	III
Liste des abréviations.....	V
Liste des unités.....	IV
Résumé.....	VI
Introduction générale.....	1

### **Chapitre I: Valorisation des déchets solides**

I.1. Définition des déchets.....	2.
I.2. les principaux types de déchets .....	2
I.2.1. D'après leur origine.....	2
I.2.1.1. Les déchets ménagers et assimilés.....	2
I.2.1.2. Les déchets industriels .....	2
I.2.1.2.1. Les déchets industriels banals.....	2
I.2.1.2.2. Les déchets industriels dangereux .....	2
I.2.2. D'après leur nature .....	2
I.2.2.1. Déchets dangereux.....	2
I.2.2.2. Déchets inertes.....	3
I.2.2.3. Déchets ultimes.....	3
I.3. Déchets ménagers.....	3
I.3.1. Définition.....	3
I.3.2. La composition des déchets ménagers.....	3
I.3.3. La production des déchets ménagers.....	3
I.3.4. Les modes d'élimination et de traitement des déchets ménagers.....	4
I.3.4.1. La mise en décharge.....	4
I.3.4.2. Le recyclage .....	5
I.3.4.3. Traitement thermique.....	5
I.3.4.3.1. L'incinération .....	5
I.3.4.3.2. Pyrolyse.....	6
I.3.4.3.3. Gazéification.....	7
I.3.3.4. Le traitement biologique.....	7
I.3.3.4.1. Aérobic (le compostage).....	7
I.3.3.4.2. Anaérobic (la méthanisation).....	7

### **Chapitre II: La digestion anaérobique et biogaz**

II.1. Définition de la digestion anaérobique .....	10
II.2. Historique de la méthanisation.....	10
II.3. Mise en œuvre de la méthanisation .....	10
II.4. Les Etapes de la méthanisation.....	11
II.4.1. L'hydrolyse.....	11
II.4.2. L'acidogènes.....	11
II.4.3. L'acétogènèse.....	11
II.4.4. La méthanogènes.....	13
II.5. Les paramètres influençant la méthanisation.....	15
II.5.1. PH.....	15
II.5.2. La température.....	15
II.5.3. L'absence d'oxygène.....	15
II.5.4. Rapport C/N.....	16
II.5.5. Brassage.....	16

II.5.6. Pression partielle en hydrogène.....	16
II.5.7. L'absence des inhibiteurs.....	16
II.5.8. Temps de rétention hydraulique (TRH) .....	17
II.6. Le digesteur.....	18
II.6.1. Définition.....	18
II.6.2. Classifications des différents types de digesteurs.....	19
II.6.2.1. Mode de l'alimentation.....	19
II.6.2.1.1. Les digesteurs discontinus.....	19
II.6.2.1.2. Les digesteurs continus.....	19
II.6.2.2. Classification selon le type de substrat.....	19
II.6.2.3. Classification selon le nombre d'étapes.....	19
II.6.2.3.1 Le procédé en mono-étape .....	19
II.6.2.3.2 Le procédé en bi-étape .....	19
II.7. avantages et les inconvénients de la digestion anaérobie.....	20
II.8. biogaz.....	22
II.8.1. Définition et Composition.....	22
II.8.1. Historique.....	23
II.8.3. Ressources de biogaz.....	23
II.2.4. Valeur énergétique.....	24
II.8.5. Purification du biogaz.....	24
II.8.6. Valorisation de biogaz .....	25
II.8.6.1. Valorisation thermique en chaudière.....	25
II.8.6.2. Valorisation électrique du biogaz.....	25
II.8.6.3. Valorisation en carburant automobile.....	25
II.8.6.4. Valorisation par injection dans le réseau de gaz de ville.....	26
II.9. Substrat.....	26
II.9.1. Les effluents d'élevage.....	26
II.9.2. Les eaux usées urbains.....	26
II.9.3. Les déchets agro-alimentaires.....	26
II.9.4. les ordures ménagères.....	26
II.10 Les méthodes utilisées pour résoudre l'équation différentielle :.....	28
II.10.1 La méthode des différences finies :.....	28
II.10.1.1 Définition.....	28
II.10.1.2 Principe :.....	28
II.10.1.3 Notation indicielle - cas 1D :.....	29
II.10.1.4 Schéma d'ordre supérieur.....	30
II.11 Méthode de Runge – Kutta :.....	30
II.11.1 La méthode Runge Kutta 4 :.....	31
II.11.1.1 La formule de méthode de Runge Kutta 4 :.....	31
II.11.2 La méthode Runge – Kutta – FEHLBERG .....	31
II.11.2.1 La formule de méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG.....	32
II.11.3 La méthode Runge Kutta de sixième ordre explicite .....	32
II.11.3 La méthode Runge Kutta de sixième ordre explicite :.....	32
II.12 Programme :.....	34

### **Chapitre III: Méthode et Matériel:**

III.1:Le substrat utilise.....	36
III.2:Description de digesteur.....	36
III.3:La détermination du PH.....	38
III.4:Les paramètre de détermination du bilan matière.....	38
III.4.1:Détermination de la matière sèche(MS).....	38
III.4.2;Détermination de la teneur en matière organique(MO).....	40
III.5:Détermination du volume de biogaz et CH <sub>4</sub> .....	42
III.5.1:Détermination de la DCO.....	43

### **Chapitre IV: Caractéristiques du substrat**

IV.1:Variation du PH.....	44
IV.1 .1:Variation du PH de déchet ménagères.....	44
IV.1.2: PH de déchet d'abattoir.....	46
IV.2:Volume de biogaz produit.....	47
IV.2.1:Volume de biogaz produit de déchet ménagères.....	47
IV.2.2:Volume de biogaz produit de déchet d'abattoir.....	49
IV.3:Volume de CH <sub>4</sub> (le potentielle biochimique méthanogène).....	51
IV.3.1:Volume de CH <sub>4</sub> de déchet ménager.....	51
IV.3.2:Volume de CH <sub>4</sub> de déchet d'abattoir.....	53
IV.4:Variation de cumulation.....	54
IV.4.1:Variation Cumulation de volume de biogaz.....	54
IV.4.2:Variation de cumulation de CH <sub>4</sub> .....	55
IV.5:Cumulée de volume de biogaz et CH <sub>4</sub> dans chaque déchet.....	56
IV.6:Cumulée de volume de biogaz et CH <sub>4</sub> dans le deux déchets.....	57
IV.7:Explication.....	57
Conclusion generale.....	61
Reference.....	62
Annexes.....	67



## Liste des figures:

**Figure I.1** : Recyclage des déchets organique.

**Figure I.2** : Les différentes étapes d'incinération.

**Figure I.3** : Principe de la Pyrolyse.

**Figure I.4** : Principe de l'étagement réactionnel en gazéification.

**Figure II.1** : Principe général de la méthanisation

**Figure II.2:** Les principales étapes de la méthanisation.

**Figure II.3:** Flux métabolique de la digestion anaérobie.

**Figure II.4** : Différentes formes de digesteurs.

**Figure II.5:** Exemple de schéma de principe du digesteur à cellules (fermentation discontinue).

**Figure II.6** : Stratégies de mise en œuvre de la digestion anaérobie en deux étapes : (1) couplage direct, (2) séparation des liquides et des solides avec recirculation du lixiviat épuré.

**Figure II.7:** Composition du biogaz des déchets des bovins (en % volumique).

**Figure II.8:** Equivalences énergétiques de  $1\text{m}^3$  de méthane.

**Figure III.1** : Dispositif expérimental du digesteur continu à l'échelle du laboratoire.

**Figure III.2:** Schéma représentatif de système de mesure du volume du biogaz et de  $\text{CH}_4$  produit. (Test de potentiel méthanogène ou BMP).

**Figure. IV.1:** La variation de pH en fonction de temps de déche ménage.

**Figure. IV.2** : La Variation de pH en fonction de temps de déche d'abattoir.

**Figure IV.3** : Le Volume de biogaz en fonction de temps de déche ménage.

**Figure IV.4:** Le Volume de biogaz en fonction de temps de déche d'abattoir.

**Figure IV.5:** .Le Volume de  $\text{CH}_4$  en fonction de temps de déche ménage.

**Figure IV.6** : .Le Volume de  $\text{CH}_4$  en fonction de temps de déche d'abattoir.

**Figure IV.7** : Variation de volume de biogaz cumulé en fonction de temps.

**Figure IV.8** : Cumulation de  $\text{CH}_4$  en fonction de temps.

**Figure IV.9** : Production cumulée de volume de biogaz et de  $\text{CH}_4$  dans déchet ménagé.

**Figure IV.10** : Production cumulée de volume de biogaz et de  $\text{CH}_4$  dans déchet battoire.

**Figure IV.11** : Volume de biogaz et  $\text{CH}_4$  en fonction de temps.

## Liste des tableaux:

**Tableau I.1:** Exemples de production des déchets ménagers dans des zones déférent.

**Tableau I.2:** Quelques exemples de production des déchets ménagers dans l

**Tableau II.1:** Effet de l'oxygène sur les différentes phases de la digestion anaérobie

**Tableau II.2:** Concentrations en ions provenant la stimulation ou l'inhibition de la Méthanisation.

**Tableau II.3:** Temps de rétention concernant le lagunage anaérobie.

**Tableau II.4:** Différents exemples de TRH suivant le procédé de digestions

**Tableau II.5 :** Composition caractéristique des biogaz en fonction des substrats et des procédés de OM / STEP / ISDND /

**Tableau II.6 :** Ressources mondiale en biogaz .

**Tableau II.7:** Les différents composés et leurs techniques d'élimination.

**Tableau IV .1 :** La variation de pH en fonction de temps de déche ménage.

**Tableau IV.2 :** La variation de pH en fonction de temps de déche d'abattoir.

**Tableau IV.3:** Le Volume de biogaz en fonction de temps de déche ménage.

**Tableau IV.4:** Le Volume de biogaz en fonction de temps de déche d'abattoir.

**Tableau IV.5:** Le Volume de CH<sub>4</sub> en fonction de temps de déche ménage.

**Tableau IV.6:** Le Volume de CH<sub>4</sub> en fonction de temps de déche d'abattoir.

## Liste des abréviations:

**CO<sub>2</sub>** : dioxyde de carbone,

**CH<sub>4</sub>** : Méthane.

**H<sub>2</sub>O**: eau.

**NH<sub>3</sub>**:ammoniac.

**N<sub>2</sub>**:azote.

**H<sub>2</sub>S** : **Sulfure d'hydrogène.**

**pH** : le potentiel Hydrogène.

**C/N** : Rapport Carbone / Azote.

**Na<sup>+</sup>**: Sodium.

**K<sup>+</sup>**: potassium.

**Ca<sup>++</sup>**: Calcium.

**Mg<sup>++</sup>**: Magnésium.

**DBO<sub>5</sub>**: Demande Biochimique en Oxygène en 5 jours.

**DCO**: La Demande Chimique en Oxygène.

**TRH** : Temps de Rétention Hydraulique.

**O<sub>2</sub>** : oxygène

**H<sub>2</sub>** : hydrogène

**Na Cl** : chlorure de sodium

**NaOH** : Hydroxyde de sodium

**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>** : Acide sulfurique

**Ag<sub>2</sub> SO<sub>4</sub>** :Silver sulfate

**HgSO<sub>4</sub>** : Mercuric sulfate

**K<sub>2</sub> Cr<sub>2</sub> O<sub>7</sub>**: Potassium

dichromate

**DCO<sub>S</sub>** : Demande chimique

en oxygène soluble

**DCO<sub>T</sub>** : Demande chimique en oxygène totale

**AGV**: Les acides gras volatiles

**NH<sub>4</sub>**: Ammonium

**MO**: Matière organique

**MS**: Matière sèche

## **Liste des photos**

**Photo III.1** : Déchet ménager .

**Photo III.2** : Le déchet l'abattoir utilise.

**Photo III.3.** Digesteur continu.

**Photo III.4** : Matériels utilisés pour Détermination la matière sèche.

**Photo III .5.**Substrats âpre dessiccateur.

**Photo III. 6** : Four à moufle .

**Photo III.7:** Substrat âpre calcination.

## Liste des unités

**J** : Jours

**Mtep/an** : milliaire de tonne par année

**m<sup>3</sup>** : Mètre cube

**Kcal** : kilocalorie.

**kWh** : Kilowatts par heure

**L** : litre

**g** : Gramme

**kg** : kilogramme

**cm** : Centimètre

**M/l** : Moule par litre

**g/l** : Gramme par litre

**mgO<sub>2</sub>/l** : Milligramme l'oxygène par litre.

**mg/l** : Milligramme par litre

**kg/hab./j** : Kilogrammes d'habitant par jour

**ml** : Millilitre

**V** : volume ;

**%vol** : pourcentage en Volume

**mg/ m<sup>3</sup>**: Milligramme par Mètre cube

## Résumé:

Avec le développement du monde , la propagation des déchets s'est considérablement accrue ,ce qui conduit à l'émergence de problèmes dans l'écosystèmes tels que la pollution .Dans notre travail ,nous étudierons un traitement des déchets ménagers et des déjection des animaux de la ville d'Adrar par méthanisation en laboratoire pour produire du biogaz à l'aide d'un digesteur anaérobie de 12Lfonctionnant à une température de 37à2°C .Quatre types d'expérimentations ont été menées afin de préciser l'effet de l'ensemencement et du PH sur le processus de méthanisation .Au niveau de la simulation ,nous avons étudié deux méthode des différences finies et la méthode de Runge –kutta en utilisant un logiciel Matlab Simulink. Mots-clefs:digestion anaérobie ,biogaz ,la ville d'Adrar, méthane ,déchets organiques ,simulation.

## المخلص

إن مع تطور العالم ازداد انتشار النفايات بشكل كبير مما أدى إلى ظهور مشاكل في النظام البيئي مثل التلوث وفي عملنا هذا سنقوم بدراسة علاج للنفايات المنزلية وروث الحيوانات لمدينة إدرار عن طريق الهضم اللاهوائي في المختبرات من أجل إنتاج الغاز الحيوي وذلك باستخدام هضم الهوائي ذات سعة 12 لتر تعمل في درجة حرارة 37 إلى 2 درجة مئوية . في أربعة أنواع من التجارب تم إجراؤها من أجل توضيح تأثير البذر ودرجة الحموضة على عملية الهضم اللاهوائي . وعلى مستوى المحاكاة قمنا بدراسة طريقتين مختلفتين وهما طريقة الفروق المحدودة وطريقة رانجكت

باستخدام برمجية Matlab Simulink الكلمات المفتاحية:الهضم اللاهوائي ,الغاز الحيوي ,مدينة إدرار ,الميثان ,النفايات العضوية ,المحاكاة.

## Abstract:

With the development of the word ,the spread of waste has increased dramatically ,which leads to the emergence of problems in the ecosystem such as pollution .In our work ,we will study a treatment for household waste and the dung of city animals of city Adrar by anaerobic digestion in laboratories in order to produce biogas using a 12-liter aerobic digester operating at a temperature of 37to2°C.Four types of experiments were conducted in order to clarify the effect of seeding and PH on the anaerobic digestion process .At the simulation level , we have studied to different methods ,namely the finite difference method and the Rung –kutta method using soft ware Matlab Simulink.

Key words: anaerobic digestion ,biogas ,methane, city Adrar ,organic waste ,simulated.

# **Introduction générale:**

## Introduction générale

---

### Introduction générale:

La croissance démographique qu'a connue le monde dans le courant du siècle dernier, ainsi que le développement industriel et l'accélération de l'urbanisation, ont été accompagnés d'une demande accrue en énergie, surtout le pétrole, qui est considéré comme la première source d'énergie. Face à cette demande en hausse, les réserves en combustibles fossiles ne dureront pas éternellement, la pénurie du pétrole va progressivement s'installer. [1]

Méthanisation est un processus biologique de dégradation de la matière organique par une flore microbienne qui se déclenche en conditions anaérobies.

Différents consortiums de micro-organismes transforment les substrats organiques complexes en molécules simples (monomères : acides, alcools...), puis en biogaz, gaz majoritairement composé de méthane (CH<sub>4</sub>), de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S). [2]

Le procédé de digestion anaérobie des déchets de matière organique qu'il permet l'obtention une énergie renouvelable c'est le biogaz, c'est un gaz combustible riche en méthane et pouvant être exploité pour le chauffage, l'éclairage et pour la cuisson des aliments.

Aussi, ce procédé permet l'élimination des déchets riche en matière organique, évite les émissions de carbone dans l'atmosphère et la pollution de l'environnement en tant que tel ; et enfin contribue au développement de l'agriculture (production d'engrais) produisant un fertilisant agricole. [3]

Le Sahara algérien est caractérisée par des groupes de population appelé LEKSOR, qui sont caractérisés par :

- Son grand nombre (Plus de 300 uniquement dans la région d'Adrar) .

- Très longue distance entre eux;

- Faible densité de population;

- Dépendance totale de la population à l'agriculture.

Ces caractéristiques rendent la connexion de la population au réseau électrique difficile et coûteux, et parfois impossible avec un terrain désertique difficile. Et Comme objectif de ce travail nous sommes intéressés de produire de l'électricité par la valorisation énergétique des déchets organique (moyens locaux) dans le milieu saharien et en particulier dans la région d'Adrar sud-ouest de l'Algérie. Ceci est fait en utilisant le phénomène de la digestion anaérobie, pour résoudre le problème d'énergie dans ces zones isolées, ainsi qu'une solution au problème environnemental causé par les déchets organiques.

Pour cela, nous avons divisé ce travail en quatre chapitres. Les deux premiers chapitres sont consacrés à la partie théorique reliée à notre travail, en premier chapitre nous avons abordé la bibliographie liée aux déchets solides en général ,le deuxième chapitre a été étudiée la digestion anaérobie, par leur déférentes étapes, et leur paramètres physico-chimiques, et les différent types de bioréacteurs et aussi les différentes méthodes de valorisation du biogaz.

La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale, contenant aussi deux chapitres. Le troisième chapitre, il englobe la présentation du dispositif expérimental, ainsi que le substrat utilisé. Dans le dernier nous avons présenté nos résultats et discussions et on clore par une conclusion générale.



**Chapitre I**  
**Valorisation**  
**des déchets solides**

## I.1. Définition de déchets

Il existe plusieurs définition du terme déchet, qui correspondent, chacune, à un objectif particulier et est fonction des acteurs impliqués ainsi que du contexte auquel on se réfère. Au sens de la loi en France, un déchet est défini comme "Tout résidu d'un processus de production, de transformation, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon et qui sont de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits ou des odeurs, et d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement." [4]

## I.2. Les principaux type de déchets :

Ils sont classés en deux grandes catégories :

### I.2.1.D'après leur origine :

#### I.2.1.1.Les déchets ménagers et assimilés :

Ils sont les déchets produits par l'activité des ménages, les commerçant, les artisans, ce type de déchets ne présente pas des caractères dangereux ou polluants ce sont :

- Les ordures ménagères ;
- Les déchets encombrants ;
- Les ordures des rues et des marches ;
- Les déchets verts ;
- Les boues de décantation et de station d'épuration

#### I.2.1.2. Les déchets industriels :

Ils proviennent de l'industrie, du commerce, de l'artisanat et des transports. Ils regroupent :

##### I.2.1.2.1.Les déchets industriels banal :

Il sont constitués des :

- Emballages des ménades ;
- Emballages des enterises ;
- Papiers et cartons ;
- verres ;
- Bois ;
- Plastique ;
- Inertes (gravis, sable.....) ;
- Métaux ferreux et non ferreux.

##### I.2.1.2.2.Les déchets industriels dangereux :

Il sont constitués des déchets organique, des déchets minéraux liquide ou solide.

Ce type des déchets peut présenter des risques pour la santé et génèrent souvent des nuisances pour l'environnement, pour ces raisons, ils doivent être collectés, transportés, traités, éliminés ou stockés selon des réglés strictes. On distingue les :

- Solvants ;
- Hydrocarbures ;
- Goudrons ;
- Acide ;
- Peintures ;
- Boues de stations de traitement des rejets industriels ;
- Déchets phytosanitaires ;
- Déchets toxiques en quantité dispersées.[5]

### I.2.2.D'après leur nature :

**I.2.2.1 . Déchets dangereux :** Ce sont des déchets dotés de caractéristiques physique, chimiques ou biologiques toxiques et qui imposent des manipulations particulières et des procédés d'élimination de nature à éviter tout risque pour la santé et / ou tout effet nocif sur

l'environnement [6]. Ces déchets peuvent être des déchets industriels spéciaux (DIS) contenant de l'arsenic, du plomb, constitués de boues de peintures, d'hydrocarbures provenant de l'industrie pétrolière ...etc. et peuvent être aussi des déchets ménagers spéciaux (DMS) tel que les détergents, les aérosols, piles, insecticide, détachants, tube néon, produits de nettoyage etc.....[7]

**I.2.2.2. Déchets inertes** : Ce sont des déchets non biodégradables, bruts et qui n'ont pas été modifiés physiquement, chimiquement ou biologiquement. Ils proviennent principalement des chantiers des bâtiments, des travaux publics ou de l'industrie de fabrication de matériaux de construction tel que le béton la céramique, les tuiles, les déchets de verre, les briques .....[8]

**I.2.2.3. Déchets ultimes** : Définis comme tout déchets assimilé ou ménager brut résultant du ramassage parallèle à la collecte séparative, le refus de tri, tout déchet industriel banal produit par les ménagers et les déchetteries et les boues de station d'épuration .[7]

### **I.3. Déchets ménagers :**

**I.3.1. Définition** : Les déchets ménagers ou les déchets municipaux sont les ordures ménagères issues de l'activité domestiques de ménages, et qui sont collectés par les communes.

#### **I.3.2. La composition des déchets ménagers :**

La composition des déchets ménagers est assez diverse et varie en fonction de nombreux facteurs, on cite :

- Le type habital (résidentiel ou urbain) ;
- Les saisons, les fêtes et les week-ends ;
- La géographie : à l'échelle d'une région et d'un pays ;
- La réglementation locale ;
- Les méthodes de gestion des déchets.
- La composition des déchets est déterminée par le tri par classe. Les déchets ménagers sont séparés par le tri manuel en un certain nombre de classes correspondant à une classification en sept classes :

**a-** Matières fermentescible (résidus de jardin, herbes, feuilles, restes alimentaires, épluchures de légumes et de fruits etc....) ;

**b-** Matières plastiques (emballages plastiques, pots de yaourt etc....) ;

**c-** Papiers-cartons (journaux, serviettes, enveloppes etc....) ;

**d-** Textiles (vêtements, draps, serviettes, couvertures etc....) ;

**e-** Métaux (boîtes de conserves, casseroles, lames etc....) ;

**f-** Verre (emballages en verre, lampes, etc....)

**g-** Déchets divers [déchets spéciaux (seringues usagées, piles, thermomètres, médicaments périmés), bois, chaussures, poils, lièges, cuir, etc. ...].[9]

#### **I.3.3. La production des déchets ménagers :**

L'évolution de la production des déchets ménagers est essentiellement liée à deux facteurs :

- L'évolution démographique.
- L'évolution quantitative par habitant.

Les quantités des déchets ménagers générées dans une ville dépendent de :

- 1) L'habitat (milieu rural ou urbain, avec un taux généralement plus faible en milieu rural)
- 2) Le niveau de vie, les habitudes et les mœurs de la population (la production tend à s'accroître avec le niveau de vie ; ex. zones résidentielles par rapport aux autres zones).
- 3) Les conditions climatiques, ainsi que les variations annuelles et saisonnières.
- 4) Les mouvements plus ou moins importants de la population au cours de l'année : foires, pèlerinage, vacances annuelle, etc.

5) Des modes de conditionnement des denrées et des marchandises. [10]

**Tableau I.1:** Exemples de production des déchets ménagers dans des zones déférant [11]

Zones de production	Production(kg/hab./j)
Pays hautement industrialisés	1,1-1,2
Pays moins avancés	0,35
Zone urbaine	0,8-1
Zone rurale	0,6-0,8
Logement ou hôtel	0,6-0,8
Campings	0,3-0,5
Passage	0,1-0,2

La production mondiale de déchet ménager est de 2,4 milliards de tonnes par années, qui donné un moyenne mondiale de 1,095 Kg/habitant/jour .[11]

**Tableau I.2:** Quelques exemples de production des déchets ménagers dans le monde. [12]

Pays	Production(kg/hab./j)
États unis d'Amérique	2
Royaume-Uni	1,6
Allemagne	1,7
France	1
Espagne	1,6
Italie	1.4
Belgique	1,2
Pays-Bas	1,6
Chine	0,5
Inde	0,46
Maroc	0,6
Algérie	0,6

Et l'Algérie avec une population de 35 millions d'habitant génère chaque année 8,5 millions de tonne des déchets ménagers, avec une moyenne nationale de 0,6 Kg/habitant/jour [13].

En pratique et en particulier dans les pays en voie de développement, on devra toujours faire la distinction entre les quantités des déchets ménagers générées et les quantités de ces ordures collectée.

#### **I.3.4. Les modes d'élimination et de traitement des déchets ménagers :**

L'accumulation de déchets provoque des inquiétudes pour la santé et l'environnement, actuellement, on peut distinguer quatre filières principales du traitement des ordures ménagères et assimilés, qui répondent à des problématiques et des évolutions différentes :

- La mise en décharge (le stockage) ;
- Le recyclage ;
- Le traitement thermique (l'incinération, pyrolyse et gazéification) ;
- Le traitement biologique [aérobie et anaérobie (la méthanisation)]. [9]

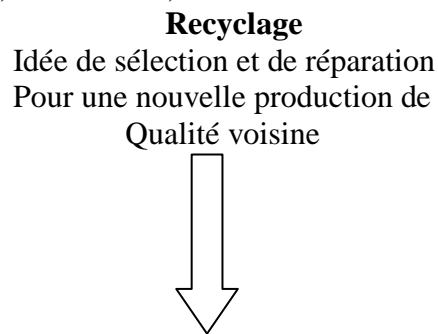
##### **I.3.4.1. La mise en décharge :**

Dans les décharges, appelées centres de stockage des déchets, les ordures compactées sont déposées dans des fosses, dites casiers, puis recouvertes de plusieurs mètres de terre. La fermentation se produit en sous-sol durant vingt-cinq ans. Le biogaz formé est capté en continu par un système de drains horizontaux enterrés et de puits verticaux.

Pour une meilleure maîtrise de la production du biogaz, un nouveau concept de bioréacteur consiste à produire du gaz dans des casiers étanches, avec réinjection du lixiviat, le « jus » issu de la dégradation des déchets. [14]

**I.3.4.2. Le recyclage :**

Le recyclage est la réintroduction directe d'un déchet dans le cycle de production dont il est issu, en remplacement totale ou partiel d'une matière première neuve. Par exemple, prendre une bouteille cassée, les refondre, et en faire des bouteilles neuves. [15]



- rechapage des pneus
- régénération des huiles
- papier, verre,
- métaux...

**Figure I.1** : Recyclage des déchets organique. [15]

**I.3.4.3. Traitement thermique :****I.3.4.3.1. L'incinération :**

L'incinération correspond à un traitement thermique à haute température en présence d'un excès d'air. Les résidus solides générés sont les cendres d'incinération et les résidus d'épuration des fumées.

L'incinération détruit les parasites et détruit les microorganismes. Les matières résiduelles sont essentiellement minérales et doivent être gérées à l'issue de l'incinération.

Elle permet de réduire le volume et la masse de la matière à éliminer. [16]

L'incinération étant un processus très oxydatif, les émissions potentielles d'odeurs sont moindres que dans les filières de dépôt en centre de stockage direct sans prétraitement préalable ou les filières de traitement biologique. De plus, l'incinération permet de réduire, voire de supprimer la production de lixiviats par rapport à la filière de stockage. En revanche l'incinération génère des effluents gazeux qui doivent être épurés avant rejet ainsi que des résidus solide minéraux (figure I.2). [16]

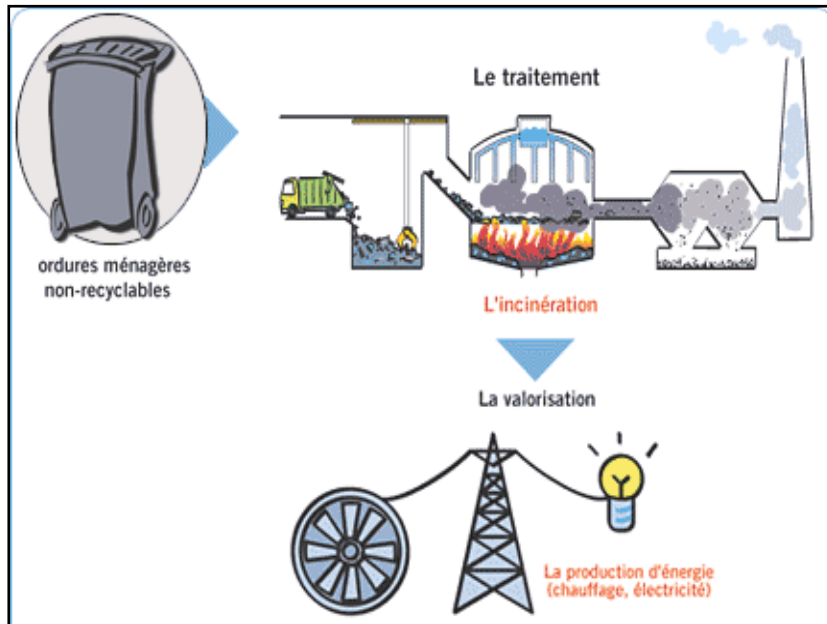


Figure I.2 : Les différentes étapes d’incinération. [17]

**I.3.4.3.2. Pyrolyse :** La pyrolyse des déchets, également désignée par thermolyse (figure I.2), est une décomposition thermique qui se fait sous vide, en l’absence d’oxygène ou d’autres comburants. C’est un ensemble de réarrangements chimiques de processus complexes définis avec peu de précisions jusqu’à nos jours. Les réactions produites sont en grande partie endothermiques et exothermiques à certains stades. La quantité, la composition et les propriétés des produits de pyrolyse varient en fonction des conditions opératoires notamment la température, le temps de séjour et la vitesse de chauffage. [17]

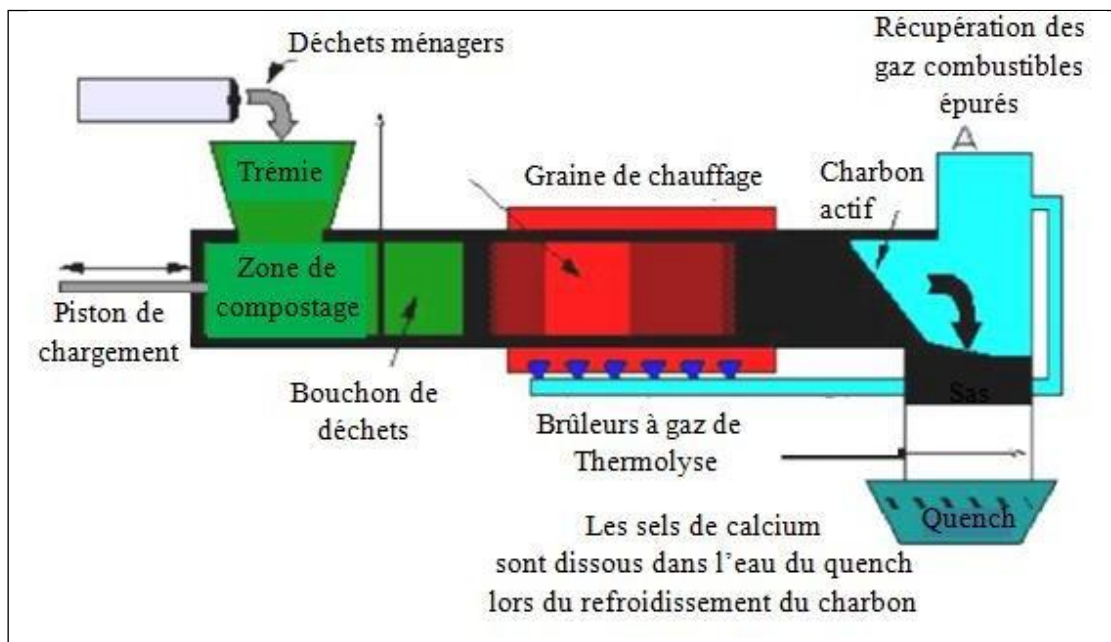


Figure I.3 : Principe de la Pyrolyse. [17]

### I.3.4.3.3. Gazéification :

La gazéification est une réaction thermochimique qui suit la pyrolyse, elle consiste à la transformation d'un combustible solide en un combustible gazeux ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  ...). Après épuración, le gaz peut être utilisé dans un moteur ou dans un brûleur. La gazéification peut se faire sous différents gaz réactants : vapeur d'eau, dioxyde de carbone ou encore hydrogène (figure I.3). C'est une réaction endothermique qui se déroule dans un domaine de température comprise entre 800 et 1500°C. [17]

La valorisation des déchets traités par gazéification a des avantages par rapport à l'incinération, notamment en ce qui concerne le problème des émissions. En effet, puisque lors de la gazéification un gaz combustible est produit, ce dernier doit être nettoyé afin de pouvoir le valoriser dans un moteur sans l'endommager. A l'inverse de l'incinération, ce nettoyage évite des émissions nuisibles. De plus, étant donné que le procédé est effectué en atmosphère pauvre en oxygène, le principal avantage de la gazéification est la quantité de gaz à nettoyer qui est moins importante que celle dégagée lors de l'incinération. Il faut souligner que ce sont ces fines particules qui sont facilement inhalées par l'homme et sont responsables des problèmes respiratoires et des allergies cutanées. [18]

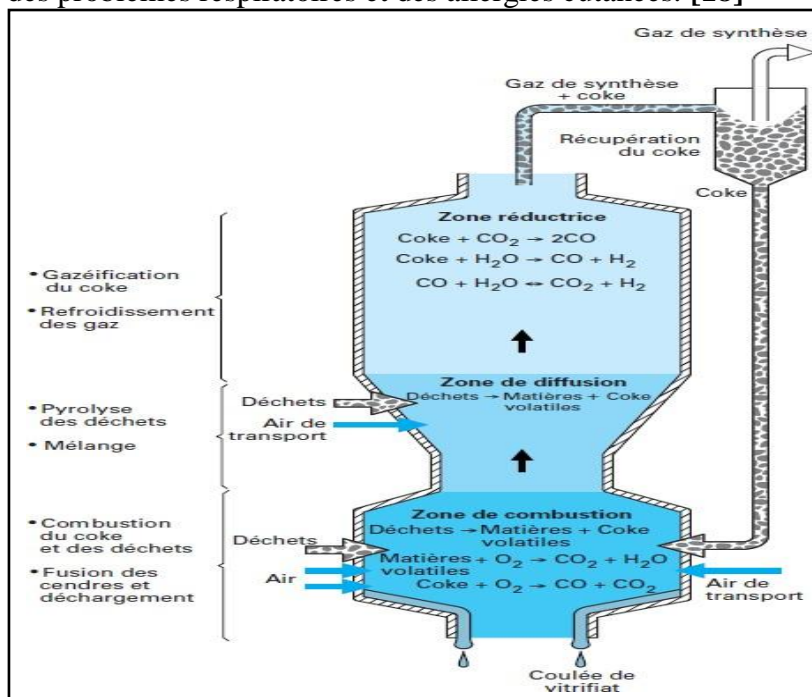


Figure I.4 : Principe de l'étagement réactionnel en gazéification. [17]

### I.3.3.4. Le traitement biologique :

Le traitement biologique utilise des micro-organismes vivants pour décomposer des déchets organiques,  $\text{CO}_2$ , et simples substances inorganiques ou en substances organiques plus simples telles que des aldéhydes et des acides. Il existe plusieurs traitements biologiques utilisés pour le traitement des déchets comme : traitements aérobies, traitements anaérobies,. [18]

#### I.3.3.4.1. Aérobie (le compostage) :

L'une des techniques naturelle de traitement biochimique qui contribue au développement durable, et qui consiste à utiliser l'action de divers organismes aérobies (de micro-organismes, d'insectes et de vers de terre) en présence d'oxygène, pour décomposer sous contrôle (aération, température, humidité), et de façon accélérée, les matières putrescibles. Afin d'avoir un amendement organique en état d'équilibre et riche en humus, le matériel obtenu est appelé compost, de couleur brun foncé, le compost mûr a l'apparence et l'odeur d'un terreau. [19]

#### I.3.3.4.2. Anaérobie (la méthanisation) :

La dégradation anaérobie est l'une des technologies basée sur la dégradation des

déchets organiques sous l'action des micros organismes (méthanogènes) et en absence d'oxygène. Cette dégradation se traduit par la production d'un produit humide riche en matière organique appelé digestat [20] et d'un biogaz composé principalement du méthane (mélange de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>) .[21] Cette transformation naturelle est conduite dans des enceintes confinées appelées 'digesteurs', à l'intérieur desquelles les réactions de fermentation sont optimisées et contrôlées [21].



# **Chapitre II**

## **La digestion anaérobique et biogaz**

### II.1. Définition de la digestion anaérobie :

La méthanisation, ou digestion en anaérobie, est un processus basé sur la dégradation de la matière organique par des micro-organismes en absence d'oxygène et de lumière dans des cuves hermétiques (digesteurs) en milieu sec ou liquide. Cette transformation de la matière à donne les produits résultant de la dégradation et peuvent être classés en deux catégories, le biogaz et le digestat.

Le biogaz composé majoritairement de méthane (CH<sub>4</sub>, 50 à 70%), de dioxyde carbone (CO<sub>2</sub>, 20 à 50%) et d'eau (H<sub>2</sub>O). Quelques gaz en traces peuvent également être présents (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S).

Le digestat, produit liquide ou solide composé de matières organiques non dégradées et de minéraux. La méthanisation est un processus de digestion en anaérobie pouvant répondre à un double objectif de valorisation énergétique par récupération de méthane et de stabilisation des déchets organiques. Le biogaz est utilisé comme combustible et digestat, produit solide de la digestion anaérobique, est utilisable comme amendement sur les terres agricoles. [22]

### II.2. Historique de la méthanisation :

Tout est partie des gaz de marais. La méthanisation a été découverte en 1776 par **Volta**. Pendant une de ses promenades, il remarqua que du gaz se dégageait d'un marais. Il mit en évidence l'inflammabilité de ce gaz. Lavoisier, en 1787 lui donne le nom de «gaz hydrogenium carbonatum », le terme méthane est proposé en 1865 et confirmé en 1892 par un congrès international de nomenclature chimique. Sa formation est attribuée à l'activité microbienne se développant dans des milieux naturels anaérobies. [15]

L'utilisation de la digestion anaérobie pour le traitement des eaux usées et la stabilisation des déchets solides ne sont pas nouvelles du tout; elles sont utilisées depuis le 19ème siècle. Dans les régions rurales de la Chine et de l'Inde, des constructions simples de réacteur (voir figure II.8) ont été longtemps employées pour traiter les déchets animaux et agricoles dans le but principal de récupérer l'énergie pour faire cuire et allumer. [23]

Le processus de méthanisation est un phénomène naturel mais peut être aussi provoqué. Les ruminants et termites sont connus comme de grands producteurs de biogaz. Les premières recherches descriptives sur la digestion anaérobique ont été effectuées à la fin du XIXème siècle. La première unité de production de biogaz a été réalisée en grand Bretagne en 1895. Il a été produit par une unité de méthanisation installée sur le site d'une station d'épuration. Il a été utilisé pour l'éclairage des rues de la ville d'Exeter. Dans les années 1920, l'allemand IMHOFF met au point un système de digestion continu, équipe plusieurs villes allemands quelques années plus tard. Les premiers systèmes de digestion discontinue ont été développés en Algérie à partir de 1939 par ISMAN et DUCCELLIER. Ces techniques ont été oubliées jusqu'aux années soixante (chocs pétroliers) ou il fallait les redécouvrir pour trouver d'autres sources d'énergie. [15]

### II.3. Mise en œuvre de la méthanisation:

- Elle est réalisée dans des réacteurs biologiques fermés : les digesteurs ;
- Température : mésophile (37 °C), Thermophile (55°C) ;
- Alimentation :
  - continue (la matière entre et sort en continu tous les jours) ;
  - discontinue. Le digesteur est chargé puis vidé quand la fermentation est terminée (des dizaines de jours après) ;
- **Digesteurs agité (continue) ou non (discontinue) ;**
- Teneur en eau dans le digesteur :
  - moins de 5% de matière sèche : fermentation "liquide" ;
  - 5 à 20 % : fermentation "humide" ;
  - 20 à 40% : fermentation "sèche". [24]

**II.4. Les Etapes de la méthanisation :**

Les grandes étapes de la méthanisation sont illustrées par la figure I-1. Les détails de chaque étape de la méthanisation (hydrolyse, acidogènes, acétogène, et méthanogènes) sont développés dans les paragraphes qui suivent.

**II.4.1.L' hydrolyse :**

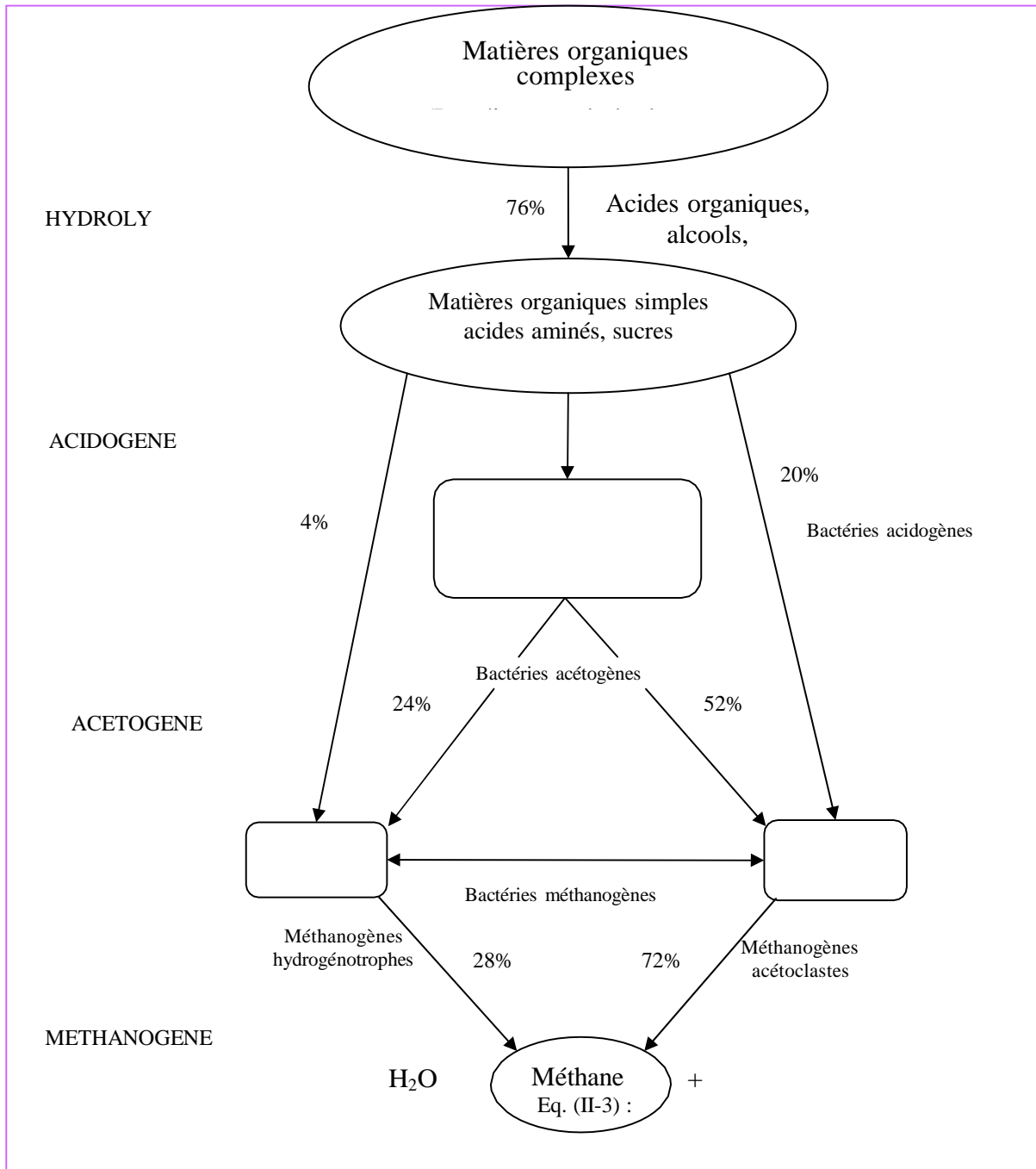
La phase l'hydrolyse correspond à la désintégration des matières organiques complexes. Pendant cette phase, les polymères (polysaccharides, lipides, protéines, acides nucléiques) se transforment en monomères (monosaccharides (glucose), acides gras et acides aminés et bases azotées). Pendant la phase de la désintégration, les micro-organismes secrètent des enzymes extracellulaires qui hydrolysent les polymères solubles, celle-ci est assurée par les enzymes extracellulaires [25] [ 26] . Pour les substrats particuliers, l'hydrolyse des polymères s'effectue en deux étapes, l'étape de la colonisation des surfaces des particules par les micro-organismes et l'étape de la production des enzymes par ces même microorganismes [27]. Les étapes de transformations sont assurées par des bactéries hydrolytiques de la fermentation anaérobie. Ces bactéries ont un métabolisme de type anaérobie strict ou facultatif [28]. De nombreuses variétés des bactéries sont disponibles selon le régime de température (régime mésophile ou thermophile).de travail de la digestion anaérobie.

**II .4.2. L'acidogènes :**

C'est la phase pendant laquelle les monomères sont transformés en acides gras volatils (AGV) tels que les acides formiques, acétique, propénoïque, butyrique, iso-butyrique, valérique et iso-valérique, et en alcool. Le gaz produit pendant la phase de la fermentation est très riche en dioxyde de carbone à 80% (CO<sub>2</sub>) et une partie en hydrogène à 20% (H<sub>2</sub>) [29]. Les bactéries acidogènes (*Clostridium*) sont très souvent anaérobies strictes ou facultatives. Parmi les 4 étapes de la méthanisation, l'acidogènes est l'étape la plus rapide à cause du temps de multiplication des bactéries très court. La surcharge organique d'un réacteur est souvent traduite par une accumulation d'intermédiaires tels que l'hydrogène et l'acétate pendant l'étape de l'acidogènes.

**II.4.3. L'acétogène :**

Sous l'action des bactéries acétogènes, les produits des deux phases précédentes se transforment en acétate, en hydrogène, et en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).



**Figure II -1** : Principe général de la méthanisation [30] [31].

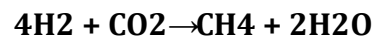
Différents types de bactéries sont responsables de l'acétogenèse. Il s'agit des bactéries dystrophiques : ce sont les bactéries acétogènes productrices obligées d'hydrogène, les bactéries homo-acétogènes qui sont divisées en deux groupes de bactéries selon l'origine de l'acétate produit. Le premier groupe constitue l'acétate provenant d'un substrat carboné, le deuxième groupe l'acétate obtenu par la réduction du CO<sub>2</sub> par le c. Les sulfato-réductrices (BSR) sont aussi regroupées en deux groupes. Le premier groupe utilise le lactate comme source de carbone et l'oxyde de manière incomplète en acétate et CO<sub>2</sub>, tandis que les bactéries du deuxième groupe oxyde de manière complète jusqu'au CO<sub>2</sub> l'acétate ainsi que certains acides à longues chaînes. Du point de vue thermodynamique, les réactions

d'oxydation causées par les bactéries acétogènes obligées d'hydrogène ne sont pas possibles que si  $\Delta G > 0$ , et que la pression partielle en  $H_2$  doit être importante

**II.4.4. La méthanogènes :**

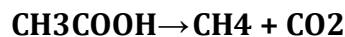
La méthanogènes conduit à la formation de méthane par deux voies distinctes : la voie de l'hydrogène combiné et du dioxyde de carbone ainsi que celle de l'acétate. Cette phase est anaérobie stricte et requiert une faible agitation de l'effluent. Les bactéries qui procèdent à cette phase ont une croissance plus lente que les bactéries acidogènes et sont sensibles à la température de fonctionnement et au pH.

La production de méthane se fait selon les deux réactions suivantes :  
La première, dite hydrogénophile, synthétise du méthane à partir d'hydrogène et de gaz carbonique selon la réaction :

**(1)**

(Environ 30% de méthane produit)

La deuxième, dite acétoclastique où l'acide acétique est transformé en méthane :

**(2)**

(Environ 70% de méthane produit)

On note au cours de cette phase :

- Une augmentation du pH sous le contrôle de la capacité tampon des carbonates.
- Une valeur minimale du potentiel redox.
- Une complexation et précipitation des espèces métalliques.
- Une diminution de la charge organique avec l'augmentation de la production du biogaz . [32]

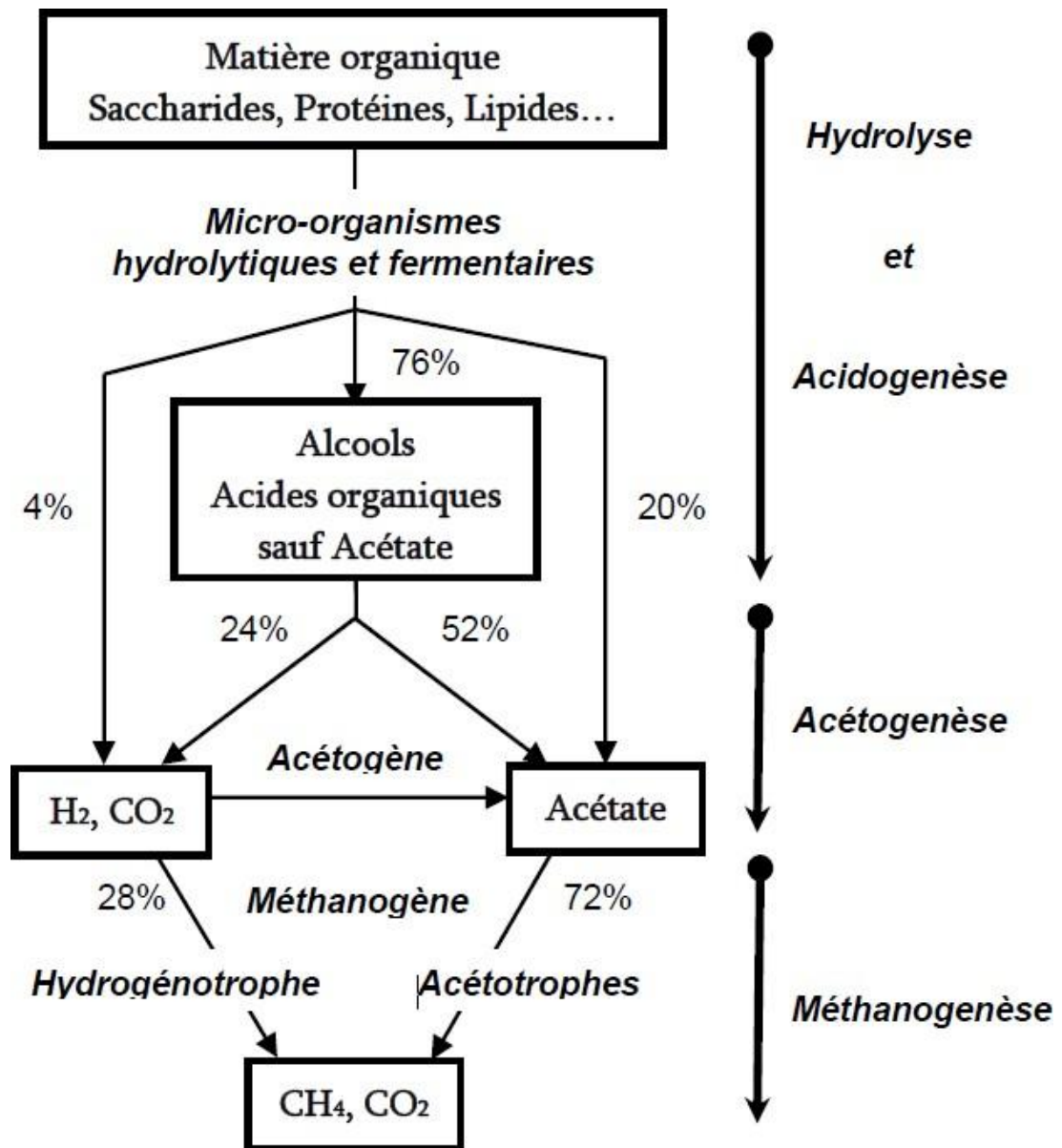


Figure II.2: les principales étapes de la méthanisation. [33]

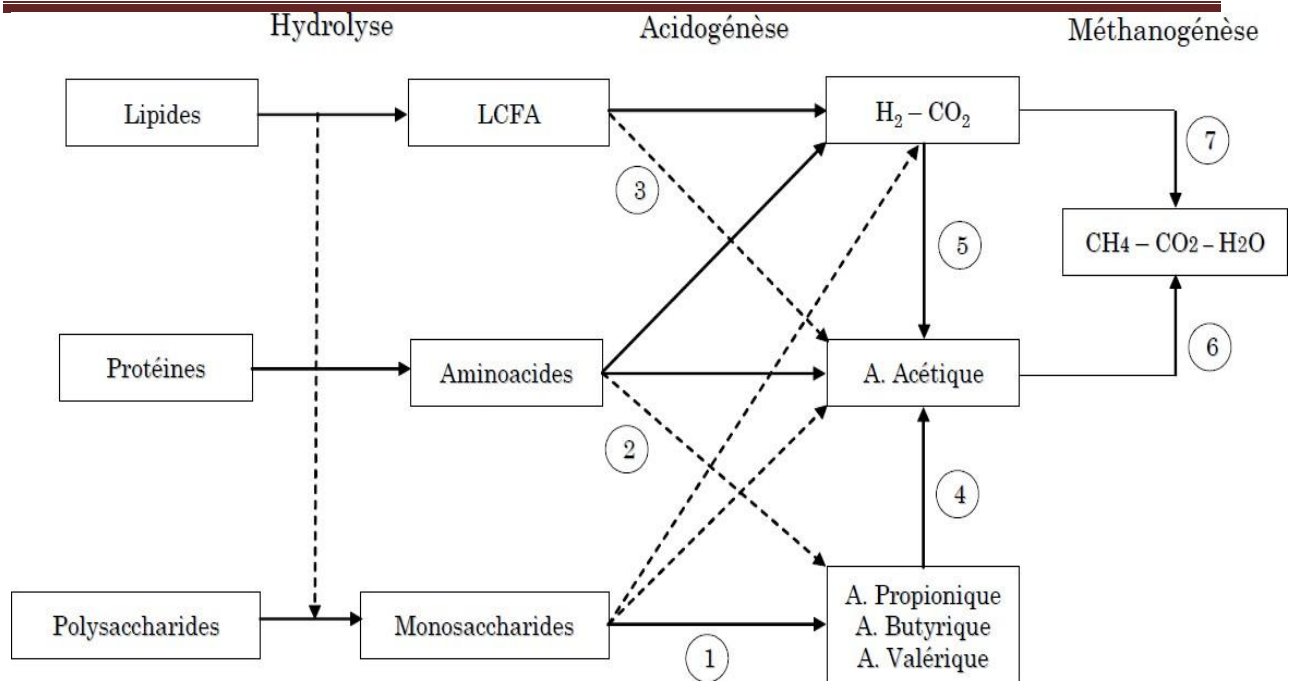


Figure II.3: Flux métabolique de la digestion anaérobie. [34]

- 1 : Acidogènes à partir de monosaccharides
- 2 : Acidogènes à partir d'aminoacides
- 3 : Acidogènes à partir d'acides gras à longue chaîne (LCFA en anglais)
- 4 : Acétogénèse à partir de a. propénoïque, a. butyrique et a. valérique
- 5 : Homoacétogénèse
- 6 : Méthanisation Acétoclaste
- 7 : Méthanisation Hydrogenophile

## II.5. Les paramètres influençant la méthanisation :

### II.5.1. PH :

Le pH est un paramètre essentiel car l'écosystème de la digestion anaérobie. En particulier les organismes méthanogène, est sensible à la variation de pH. Celui-ci a également un effet indirect sur le fonctionnement du système par la modification des équilibres chimiques des acides et des bases faible, notamment les AGV, le sulfure d'hydrogène et l'ammonium dont les formes non ionisées peuvent inhiber la méthanisation. Il est donc important de suivre le pH et, si nécessaire, de l'ajuster dans l'alimentation ou de le réguler automatiquement dans le digesteur. Le pH optimum de la méthanisation se situe autour de la neutralité, entre 6.5 et 8.5. Un élément important pour le maintien du pH est l'alcalinité du digesteur.[17]

### II.5.2. La température :

Comme pour les autres processus biochimiques, l'élévation de la température engendre une augmentation de l'efficacité de la méthanisation [35]. La vie microbienne est capable de se développer sur une très large gamme de températures, en particulier les archées que l'on trouve dans les milieux les plus extrêmes. La croissance des méthanogènes est toutefois jugée optimale pour une température supérieure à 30°C [18].Le maintien de la température dans cette plage est essentiel pour l'efficacité du processus [36].

### II.5.3. L'absence d'oxygène :

L'oxygène est évidemment un inhibant (réaction anaérobie), cependant une petite quantité d'oxygène n'inhibe pas totalement et immédiatement la production de biogaz. En effet, certains groupes de bactéries, appelées anaérobies facultatives, peuvent tolérer et absorber une petite quantité d'oxygène évitant ainsi d'inhiber les autres groupes de bactéries

ne tolérant pas du tout l’oxygène (bactéries anaérobies strictes). L’absence de l’oxygène est une condition pour le développement des bactéries méthanogènes, qui sont anaérobies strictes.[37]

**Tableau II.1:**Effet de l’oxygène sur les différentes phases de la digestion anaérobie. [37]

<b>Hydrolyse</b>	<b>Acidogènes</b>	<b>Acétogénèse</b>	<b>méthanogènes</b>
- bactéries anaérobies strictes et facultatives ; - Type Escherichia, streptococcies, clostridium.	- bactéries anaérobies strictes et facultatives ; -type clostridium principalement.	- bactéries anaérobies strictes ; - type syntrobacter, syntrophys ou syntro-phomonas.	-bactéries anaérobies strictes, groupes des arche ; -type méthanols-bactériales, méthano-coc cales, méthano-microbiale

**II.5.4. Rapport C/N :**

Le rapport C/N représente la proportion des deux éléments. Le carbone (sous forme d'hydrate de carbone) et l'azote (protéines, nitrates, ammoniac...etc.) Sont les principaux éléments nutritifs des bactéries anaérobies.

Le carbone est essentiellement utilisé pour l'alimentation en énergie et l'azote pour la constitution des structures cellulaires. Les bactéries consomment le carbone 15 à 30 fois plus vite que l'azote. [38]Un rapport compris entre 15 et 30 permet à la digestion d'atteindre un taux optimum. Les rapports C/N supérieurs à 23/1 ont été identifiés comme inadaptés pour une digestion optimale ; et des rapports inférieurs à 10/1 se sont révélés inhibiteurs selon des études portant sur la digestion anaérobie thermophile des déchets de volailles, mélanges de papier et fumier, et d’autres substrats celluloseux. [22]

**II.5.5.Brassage :**

Le brassage du digesteur n'est pas essentiel pour que la digestion anaérobie se déroule. Cependant, il permet l'obtention d'un milieu homogène, c'est un moyen de favoriser les transferts thermiques, ioniques et métaboliques. Il permet aussi une augmentation des contacts entre les substrats à digérer et la flore fixée et évite les courts circuits dans le réacteur, un court circuit correspond à la sortie prématurée d'une partie du substrat de la cuve car celle-ci ne suit pas le parcours habituel, l'effluent ne subit pas donc la méthanisation totale [36]. Le brassage se fait à l'aide d'un agitateur mécanique, ou d'un système hydraulique par la recirculation de la boue ou réinjection du gaz produit. [39]

**II.5.6.Pression partielle en hydrogène :**

L’hydrogène est une molécule clé dans le processus de la digestion anaérobie. Il est produit lors de l’acétogénèse à partir des produits de l’acidogènes (AGV). La thermodynamique des réactions de production d’hydrogène est défavorable dans les conditions standards ( $\Delta G^\circ > 0$ ). Cette faible pression partielle est assurée par les bactéries homoacétogènes et hydrogénophiles qui consomment H<sub>2</sub> au fur et à mesure de sa production [40]

**II.5.7. L’absence des inhibiteurs :**

La fermentation anaérobie est réputée pour sa sensibilité aux matières toxiques et particulièrement la phase méthanogène, qui est encore plus sensible. Ces éléments inhibiteurs sont présents dans le substrat lui-même, ou produits lors de la digestion, parmi eux on peut citer : [41]

**a- Oxydants :**

Les oxydants sont des inhibiteurs à cause de leurs grands rôles dans la régulation du potentiel redox. Comme les bactéries méthanogènes exigent de bas potentiels redox, on limite au minimum l'apport de substances oxydantes telles que les nitrates, les nitrites et évidemment l'oxygène [15]



**b- Ammoniaque :**

D'après Hansen et al. Et Chen et al. [42] L'ammoniaque est considéré comme un inhibiteur ayant un effet toxique sur les microorganismes de la digestion anaérobie et notamment des méthanogènes acétoclastes. L'ammoniaque est souvent rencontré dans les supports ayant un fort taux de protéines, il se forme rapidement dans le digesteur, par biodégradation des constituants protéiques et au-delà de 2 à 3 g/l, il devient toxique et inhibiteur pour les microorganismes méthanogènes. [39]

D'après Anderson et al, [42] l'ammoniaque libre a été reconnu plus toxique que l'ion ammonium ( $\text{CH}_4^+$ ). En générale, les taux d'ammoniac  $\text{CH}_4$  libre devraient être maintenus en dessous de 80 ppm pour éviter l'inhibition. Il a été montré par l'ensemble des études faites par Carty; Ficher et al. Hart, Schmid et Lipper, [42] qu'une très forte concentration de l'ordre de 1500 à 3000 ppm en ion ammonium est tolérable.

**c- Les acides gras volatiles(AGV) :**

L'accumulation des acides gras volatils (AGV) pendant le déséquilibre du processus reflète directement un désaccouplement cinétique entre les producteurs et les consommateurs acides. La concentration d'AGV a été plus suggérée pour le contrôle et la surveillance du digesteur anaérobie, dans un système faiblement protégé, le pH, l'alcalinité partielle et les mesures d'AGV sont utiles pour le contrôle de processus tandis que dans le système à pouvoir tampon élevé (fortement protégé), l'AGV est fiable pour indiquer le déséquilibre de processus.

Cependant, plusieurs études ont précisé que l'AGV individuel peut fournir une information plus importante comme avertissement à tôt avant l'échec de processus. [ 23]

**d- Métaux lourds :**

Certains d'entre eux sont toxiques pour les organismes anaérobies, même à de faibles concentrations. [42] Les métaux lourds bloquent le métabolisme et tuent les organismes en inactivant le groupe d'enzymes à savoir les sulfhydriles par formation de mercaptides. Par contre il est possible d'éliminer les produits toxiques du support nutritif ou de les diluer jusqu'à passer en dessous du seuil de toxicité. [41]

**e- Cations :**

Les cations eux aussi présenteraient une toxicité à une certaine concentration vis-à-vis de la méthanisation en se liant aux acides gras volatils. Le tableau suivant montre l'effet des ions [ 37]

**Tableau II.2:** Concentrations en ions provenant la stimulation ou l'inhibition de la Méthanisation. [37]

Ions	Stimulation (mg/l)	Inhibition modérée (mg/l)	Inhibition totale (mg/l)
Na <sup>+</sup>	100/200	3500/5500	8000
K <sup>+</sup>	200/400	2500/4500	12000
Ca <sup>++</sup>	100/200	1000/1500	3000
Mg <sup>++</sup>	75/150	1000/1500	3000

**II.5.8. Temps de rétention hydraulique (TRH) :**

C'est le temps de séjour moyen du substrat dans le réacteur. [37] C'est-à-dire le rapport du volume utile du fermenteur sur le débit volumique du substrat. [38] Ce paramètre opératoire a un impact direct sur les différentes étapes réactionnelles de la digestion anaérobie. En effet, un temps de séjour inférieur à 5 jours est insuffisant pour avoir une digestion stable en raison du lessivage des microorganismes méthanogènes. Voici quelques exemples du temps de rétention de lagunage anaérobie. [43]

**Tableau II.3:** Temps de rétention concernant le lagunage anaérobique. [43]

<b>Temps de rétention (j)</b>	<b>Remarques</b>
2 à 5	Réduction du DBO5 escompté de 60 à 70%
5	Réduction du DBO5 escompté de 70%
0.5	Le minimum pour le dimensionnement en Afrique du sud.
5 à 30 10 5 à 10 5 3 à 5	-Critères du Texas. Avec une réduction de DBO5 espérée de plus de 50%. -valeur minimale à Montana. Avec une réduction de DBO5 espérée de 70%. -critère d'Iowa. Avec une réduction de DBO5 escomptée à 60%. - critère du Nebraska. Avec une réduction de DBO5 escomptée à 75%.
1 à 5	- 1 à 2 jours à une température de 20_30°C ; - 2 à 3 jours à une température de 15 _20°C ; - 4 à 5 jours à une température de 10 _15°C ; - 5 jours à une température de 10°C.
1 5	-En été. - En hiver.
1 à 5	-pour une température de plus de 20°C : un jour, réduction de DBO5 espérée 50%. 2.5 jour, réduction de DBO5 espérée 60%. un jour, réduction de DBO5 espérée 50%. 5 jours, réduction de DBO5 espérée 70%. - Au-delà la réduction de DBO5 peut être réduite de 10 à 20% si la température est comprise entre 15_20°C.

Le temps de séjour aussi est fixé par la vitesse de croissance des bactéries impliquées dans la digestion anaérobique. Ces micro-organismes ont des vitesses de croissance différentes. [41]

Le temps de rétention hydraulique est déterminé expérimentalement, il varie de quelques heures à quelques mois. Les valeurs obtenues dépendent tout d'abord du procédé retenu : discontinu ou continu, des types de fermenteurs la température de fonctionnement du procédé. [39]

**Tableau II.4:** Différents exemples de TRH suivant le procédé de digestions [37]

<b>Procédé</b>	<b>TRH</b>
Réacteurs homogènes conventionnels	10 à 40 j minimum
Digesteurs infiniment mélangés	10à 20 j
Réacteurs de seconde génération : contact anaérobique	6 à 8 j
Réacteurs à cellules fixée	1 à 4 j suivant le substrat

**II.6. Le digesteur:**

**II.6.1. Définition:**

Le digesteur, cœur ou se réalise la méthanisation, et aussi appelé fermenteur ou bioréacteur anaérobique. Il est une simple cuve fermée, étanche et isolé thermiquement, dans la quelle différents micro-organismes dégradent chimiquement et biologiquement les déchets et les effluents organiques et produisent en stade finale du biogaz. Il peut être

équipé des systèmes : de chauffage, d'agitation, de prélèvements et d'un système de mesure de teneur en gaz, de dispositif permettant le contrôle de différents paramètres : la température, le pH, la pression,...etc. [44].

Il existe plusieurs formes de digesteur (ovoïde, cylindrique, ou bien continental), généralement construit en béton avec une protection interne en résine époxy mais pour les digesteurs de grande taille, l'acier vitrifié s'avère souvent plus compétitif

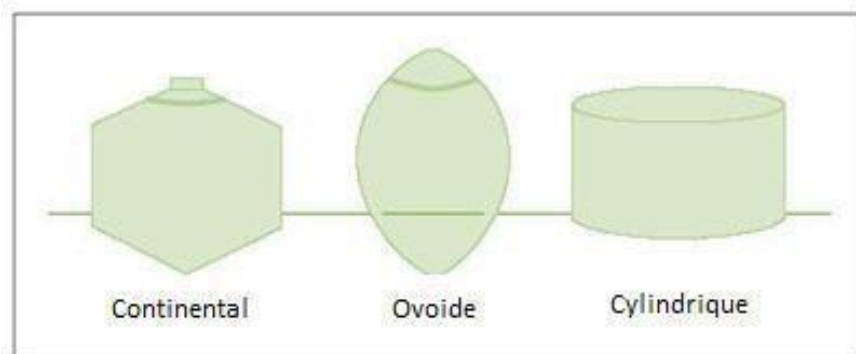


Figure II.4 : Différentes formes de digesteurs.

### II.6.2. Classifications des différents types de digesteurs:

#### II.6.2.1. Mode de l'alimentation:

Le choix de digesteur varie en fonction du type des déchets à traiter et de l'application projetée. Le cycle de méthanisation peut être discontinu ou continu

##### II.6.2.1.1. Les digesteurs discontinus:

Le système Batch est le plus simple et le plus vieux procédé élaboré. C'est un système à digestion discontinue surtout utilisée pour les déchets solides de type fumier. Les déchets à traiter sont placés dans une enceinte close pendant une durée comprise entre 8 semaines et 5 mois avec ou sans système d'agitation. La production de biogaz est irrégulière (rapide au début de la fermentation, beaucoup plus lente vers la fin). Ce système nécessite d'autre part beaucoup de main d'œuvre pour le transport de la biomasse et aussi d'entretien.

##### II.6.2.1.2. Les digesteurs continus:

Ce système est le procédé le plus utilisé. Le substrat introduit de manière continue, est digéré et déplacé soit mécaniquement, soit sous la pression des nouveaux entrants vers la sortie sous forme de digestat. L'agitation permet de conserver une vitesse de production de gaz permanente. Le fonctionnement en continu, est bien adapté aux installations de grande taille. Il existe trois principaux types de digesteurs continus : système à cuve verticale, système à cuve horizontale et système à cuve enterrée[32]

### II.6.2.2. Classification selon le type de substrat :

**a. Solide :** La teneur en matière sèche est supérieure de 15 %.

**b. Semi solide ou pâteux :** La teneur en matière sèche entre 5 et 15%.

**c. Liquide :** La teneur de la matière sèche est inférieure de 5%. [41]

### II.6.2.3. Classification selon le nombre d'étapes :

Selon les phases méthanogènes et l'acidogènes se déroulent dans le même réacteur ou dans deux cuves séparées. [41]

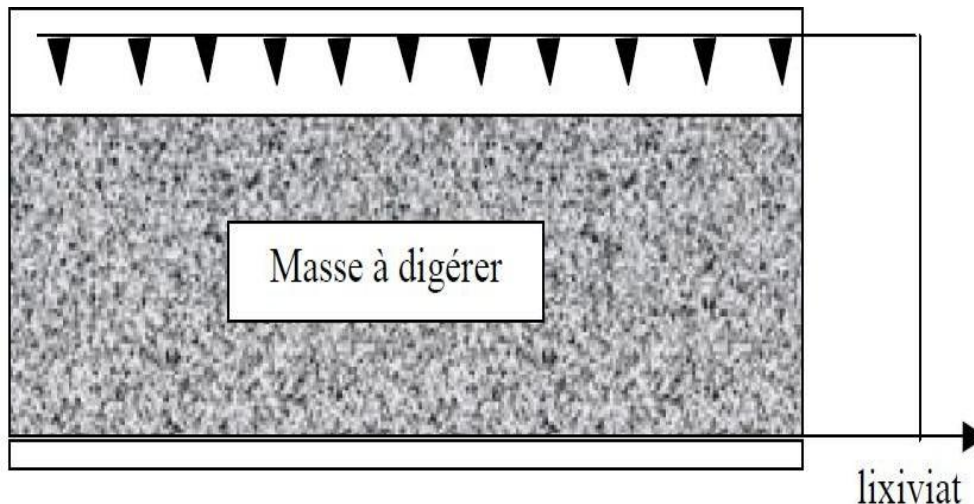
#### II.6.2.3.1 Le procédé en mono-étape :

C'est une fermentation « solide » qui se réalise à 30- 40 % de matière sèche. Cette stratégie consiste à réaliser des digestions anaérobies en une étape dans des cellules fermées qui reçoivent un lixiviat afin d'activer les réactions biologiques (Figure III.7). [45]

**Figure II.5:** Exemple de schéma de principe du digesteur à cellules (fermentation discontinue). [45]

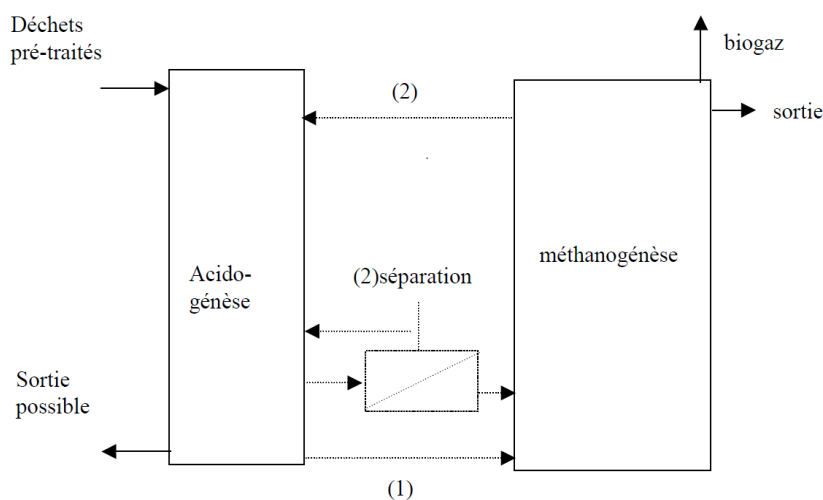
**II.6.2.3.2 Le procédé en bi-étape :**

Ce type de digesteur sépare la phase d'hydrolyse et l'acidogènes dans une première étape, et la méthanogènes dans une seconde étape. [46] La recirculation de la phase liquide



présente l'avantage de ne pas nécessiter constamment l'ajout d'eau réchauffée, [41]

La technologie à deux étapes peut être utilisée aussi pour méthaniser des déchets solides. [47] Dans le réacteur d'acidogènes on réalise une hydrolyse et une acidogènes, ce qui liquéfie la matière organique solide et la transforme en AGV, et dans le second on a la méthanisation de ce lixiviat, [47] donc, L'avantage des procédés bi-étape réside dans le fait que la décomposition de la matière solide est de l'ordre de quelques jours. Cette séparation des phases, réduit le risque d'intoxication des cellules méthanogènes liée à la présence des acides gras volatils lorsque l'étape d'acidogènes n'est pas complètement terminée. [41]



**Figure II.6 :** Stratégies de mise en œuvre de la digestion anaérobique en deux étapes : (1) couplage direct, (2) séparation des liquides et des solides avec recirculation du lixiviat épuré. [45]

**II.7. Avantage et inconvénient de la digestion anaérobique :**

Les enjeux de la méthanisation sont multiples et concernent plusieurs acteurs selon leurs points de vue. Les collectivités locales et autres sociétés de services, les industriels et même les agriculteurs voient la méthanisation comme un moyen de traiter leurs déchets à faible coût

mais sont peu réceptifs à la valorisation énergétique pour différentes raisons (coût, problèmes d'exploitation, manque d'information). La méthanisation semble être, par contre, un enjeu important et de long terme pour l'ensemble de la société en ce qui concerne le bilan énergétique global et les problèmes écologiques dus à l'effet de serre résultant de l'utilisation des énergies fossiles. La méthanisation est dite une technologie propre. Nous pouvons néanmoins considérer que les enjeux sont de deux types : les enjeux environnementaux et les Enjeux économiques.

### a) Enjeux environnementaux :

Pour ce qui concerne l'environnement, les enjeux sont les suivants :

- La méthanisation permet de stabiliser les déchets organiques et de résoudre différents problèmes de pollution (désodorisation, dégradation...). Le taux de réduction de la demande chimique en oxygène varie entre 50 et 60 %. Le produit résiduel ne peut néanmoins moins pas être rejeté n'importe où sans traitement complémentaire car la méthanisation n'a aucun effet sur les nitrates. Par contre, la méthanisation permet d'effectuer une désodorisation efficace ;
- La méthanisation permet d'obtenir des taux élevés d'élimination des polluants organiques et des germes pathogènes ;
- l'utilisation du biogaz résultant de la méthanisation permet de remplacer les énergies fossiles par une énergie issue de la biomasse et donc incorporée au cycle de l'équilibre biologique global ;
- La méthanisation contribue ainsi à l'effet de serre car le gaz qu'elle rejette dans l'atmosphère appartient à la biomasse qui a su l'assimiler pour sa croissance. En définitive, l'utilisation du méthane a un impact positif sur notre environnement et propose des solutions à des problèmes écologiques graves et dont l'importance ne fera qu'augmenter au cours des années.

### b) Enjeux économiques :

Les enjeux économiques de la valorisation du biogaz sont :

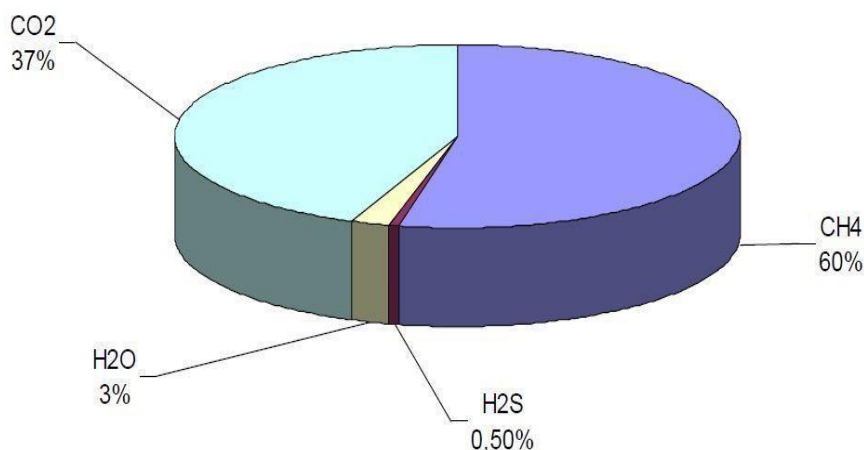
- La méthanisation permet de stabiliser les déchets organiques à moindre coût ;
- Elle donne ainsi une valeur économique à la production de déchets organiques ;
- Elle permet aussi de produire une énergie renouvelable et locale ;
- Elle est d'autant plus un atout vu l'accroissement du prix des énergies fossiles. [23]

**II.8.Biogaz :**

**II.8.1.Définition et composition :**

Le biogaz est le gaz produit par la fermentation de matières organiques animales ou végétales en absence d'oxygène (conditions anaérobies). Cette fermentation appelée aussi "méthanisation" ou encore "digestion anaérobie" peut se produire naturellement ou être provoquée. Le biogaz est un mélange composé principalement de méthane (CH<sub>4</sub>) et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et, en nettement plus faibles proportions, d'azote, d'oxygène et d'eau ; on retrouve également de nombreux composés trace (organiques et inorganiques) tels que le sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S), les thiols (= mercaptans) et tout un panel de Composés Organiques Volatils (COV) notamment dans les biogaz d'Installations de Stockage de Déchets (ISD).[48]

**Figure II.7:** Composition du biogaz des déchets des bovins (en % volumique) [49].



L'énergie du biogaz provient uniquement du méthane : le biogaz est ainsi la forme renouvelable de l'énergie fossile qu'est le gaz naturel. Ce dernier contient essentiellement du méthane mais aussi du butane, du propane et d'autres éléments.

Comme il est indiqué dans les facteurs influençant la méthanisation, il y a ces trois intervalles de température qui assurent la production de biogaz [50] et la quantité de biogaz produit change en fonction de ces températures :

- de 10 à 25°C : psychrophile [51].
- de 25 à 45°C : mésophile [52].
- de 45 à 65°C : thermophile [53].

Le tableau II.5 suivants montre la composition caractéristique du biogaz qui varie suivant son origine (composition des déchets organiques, modes de production, etc.) [54] :

**Tableau II.5 :** Composition caractéristique des biogaz en fonction des substrats et des procédés de production OM / STEP / ISDND / [53] .

Lieux de production et principaux substrats	ISDND d'OM (environ 80 % )	ISDND d'OM Et déchet industriels (50 % -50 % )	OM gérées en digesteurs	Boues de STEP	Lisiers de bovins ou d'ovins	Distillat
Procédé mis en œuvre	Production naturelle sans aspiration	Production forcée avec aspiration	Production forcée avec aspiration	Digesteurs		

Composer majoritaire ( %vol )	CH4	50-58	30-35	25-45	50-60	60-75	60-75	68
CO2	25-34	22-33	14-29	38-34	33-19	33-19	26	
N2	18-2	26-6	49-17	5-0	1-0	1-0	-	
O2	1-0	8-2	8-5	1-0	>0.5	>0.5	-	
H2O (à 30 ° C )	4	4	4	6	6	6	6	
Total % vol	100	100	100	100	100	100	100	
Composer noritaires (mg. Nm3 )	H2S	20-50	5-20	100-900	100-900	1000-4000	300-10000	400
NH3	-	-	-	-	-	50-100	-	
Aromatique	2	1	0-200	0-200	-	-	-	
Organochlorés Organofluorés	0-200	0-100	100-800	100-800	-	-	-	

**II.8.2. Historique :**

Le biogaz a été autour depuis il ya eu de la biomasse et les déchets en décomposition d'autres, en décomposition et digérées par les bactéries. On pense qu'il a été découvert dans un marais, mais le vrai potentiel de ce gaz n'a pas été réalisé jusqu'à ce que les années 1890, lorsque le gaz a été utilisé pour l'éclairage en Angleterre. [55]

En1630, Von Helmont constaté que des gaz inflammables pourraient évoluer de la décomposition de matières organiques et dans les notes Shirley 1667 ses conclusions sur le biogaz alors le nom de gaz des marais. On dit que Marco Polo a écrit sur couverte réservoirs d'eaux usées en Chine, mais on ne sait pas s'ils ont capturé le gaz et l'a utilisé. Certaines sources indique également des Assyriens et des Perses d'utiliser ce gaz pour chauffer l'eau du bain dans l'Antiquité. [55]

1808- Sir Humphrey Davy a constaté que le méthane est présent dans les gaz qui sont formé par la digestion anaérobie du fumier. [55]

1884 – Louis Pasteur présente ses étudiants travaillent à l'Académie des sciences et raconte comment ce gaz peut être utilisé pour le chauffage et l'éclairage. Son élève, Ulysse Gayon, effectuée la fermentation anaérobie du fumier et de l'eau à 35°C et a obtenu 100 litres de biogaz par mètre cube de fumier. [55]

1895 – le biogaz est utilisé pour illuminer les rues à Exeter, en Angleterre. [55]

1940 – le développement du biogaz et des applications sommeillent jusqu'à ce que les pénuries d'énergie de la deuxième Guerre mondiale. La guerre oblige les gens à considérer les sources d'énergie alternatives à nouveau. [55]

1957 - Un inventeur britannique, Bates, modifie sa voiture fonctionnant au biogaz produit à partir de lisier de proc. En 1974, il explique le processus et les avantages de celui-ci dans le film documentaire „Doux comme un écrou“. A ce stade, il dirige sa voiture sur le biogaz pendent 17ans. [55]

2005 - Le programme de soutien de production de biogaz au Népal remporte la récompense Ashden pour l'installation de plus de 150.000 installations de biogaz dans les zones rurales. Et un train qui fonctionne avec du biogaz commence son service en Suède. [55]

**II.8.3. Ressources de biogaz:**

Les ressources de biogaz sont variées, les déchets organique sont la première source, ces

déchets regroupent les déchets urbains et industriels, déchets d’agriculture, ainsi que les déjections animales.

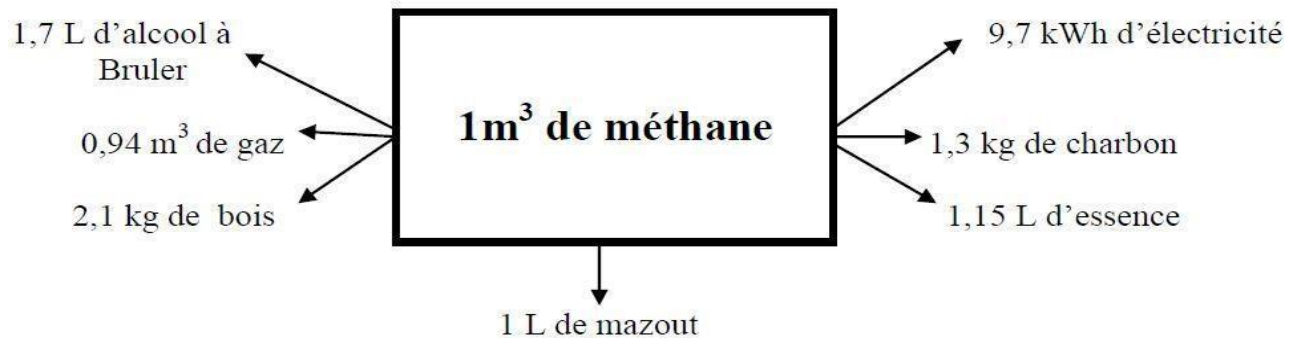
**Tableau II.6 :** Ressources mondiale en biogaz [56].

Ressource mondiale en biogaz	Biogaz produit (Mtep/an)	Biogaz valorisable (Mtep/an)
Déchets solides urbains et industriels	750	60 à 100
Eaux usées urbaines et industrielles	50	40 à 50
Sous-produits agricoles	1000	40 à 150

La quantité et la composition chimique du biogaz produit en fermenteur dépendent du substrat, de sa DCO, du débit d’alimentation du digesteur, de la qualité de l’agitation, du temps de séjour dans le réacteur, de la température de fermentation, l’homogénéité et la granulométrie du substrat etc. [56].

**II.8.4.Valeur énergétique :**

Le méthane brûlé avec une flamme bleue, lorsque sa combustion est complète. Celle-ci s'accompagne d'un fort dégagement de chaleur. Dans ces conditions, 1 m<sup>3</sup> de méthane peut atteindre en brûlant une température de 1400 °C et dégage une quantité de chaleur de 8500 à 9500 kcal, à titre indicatif, 1 m<sup>3</sup> de biogaz, contenant 70% de méthane et de 30% de gaz carbonique, libère par combustion environ 6000 Kcal .[ 57].



**Figure II.8:**Equivalences énergétiques de 1m<sup>3</sup> de méthane. [41]

La variabilité de la quantité du gaz suivant le substrat fermenté est important : De 55% à 75% de CH<sub>4</sub>. Sur une installation donnée, en l'absence d'accident de fermentation, la composition du biogaz est stable. [58]

**II.8.5.Purification du biogaz :**

La purification du biogaz nécessite un traitement qui consiste à éliminer les composés toxiques et corrosifs (H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>).

Ensuite Le biogaz produit passer a l'étapes de purification. Cette dernière permet :

- D'améliorer le pouvoir calorifique .
- De diminuer le volume de stockage .
- De supprimer l'effet corrosif et les mauvaises odeurs dus à la présence de l H<sub>2</sub>S.

Le procédé le plus efficace pour éliminer l'H<sub>2</sub>S est le passage du biogaz dans un filtre composé de limailles de fer (oxyde de fer). Le filtre est placé sur la conduite de gaz. Pour l'élimination de CO<sub>2</sub>, il faut faire barboter le biogaz dans une solution de chaux qui fixera le gaz carbonique. [41]

Pour éliminer l'eau on applique des techniques de condensations pour piéger les gouttelettes ou de séchage la vapeur d'eau (refroidissement et piégeage de l'eau, adsorption sur des



produits de type silica-gel, séchage au glycol ...). [59] . Le tableau II.7 suivants regroupe les différents composés et leurs techniques d'élimination

**Tableau II.7:** Les différents composés et leurs techniques d'élimination. [57]

Voie de valorisation	Composés à enlever
thermique	Eau, sulfure d'hydrogène (H <sub>2</sub> S, éventuellement selon la teneur)
Electricité / cogénération	Eau, sulfure d'hydrogène (H <sub>2</sub> S), organohalogénés
carburant	Eau, sulfure d'hydrogène (H <sub>2</sub> S), organohalogénés, C <sub>2</sub> O
Réseau de gaz	Eau, sulfure d'hydrogène (H <sub>2</sub> S), organohalogénés, C <sub>2</sub> O

**II.8.6. Valorisation de biogaz :**

Le biogaz, de par son contenu en méthane, est un gaz énergétique peut être utilisé selon plusieurs modes de valorisation. On distingue quatre filières:

- Valorisation thermique (produire de la chaleur);
- Valorisation électrique ;
- Valorisation en carburant automobile ;
- Valorisation par injection dans le réseau de gaz de ville ;

**III.8.6.1. Valorisation thermique :**

Brûler du biogaz sous chaudière ou en four est la voie de valorisation la plus ancienne, la mieux maîtrisée et la plus courante. La chaleur de combustion du biogaz peut servir pour la production d'eau chaude, de vapeur à moyenne ou haute pression.

**II.8.6.2. Valorisation électrique du biogaz :**

La voie classique pour produire de l'électricité à partir de biogaz est d'utiliser une chaudière à gaz suivie d'une turbine à vapeur. Cette voie est techniquement fiable et les contraintes liées à l'épuration du biogaz ne sont pas lourdes.

Une seconde voie consiste à installer des moteurs à gaz, soit à étincelles, soit dual fuel (injection d'un gaz pilote qui est généralement un gazole). Le procédé dual fuel, bien que plus souple et plus durable, exige des spécifications particulières et une teneur en méthane d'au moins 40 %.

Les exploitants optent encore souvent pour la voie classique qui évite de traiter le biogaz

La cogénération : Il s'agit de la production combinée de chaleur et d'électricité.

La chaleur peut être utilisée pour le chauffage des digesteurs et le reste peut servir à tout autre usages : séchage du digestat, séchage de foin, production d'eau chaude, alimentation d'un chauffage domestique. Dans le cas de la solution " moteur à biogaz ", il nécessitera en principe une désulfuration et une déshydratation, dont les performances dépendront des spécifications des motoristes. Dans le cas de la solution turbine à vapeur, on peut se contenter d'un traitement par simple filtre dévésiculeur à l'entrée du compresseur, de façon à enlever les particules en suspension dans le biogaz.

**II.8.6.3. Valorisation en carburant automobile :**

Pour cette application, les spécifications de pureté du gaz sont très sévères, puisque le biogaz utilisable comme carburant doit contenir un minimum de 96 % de méthane. Il faut en outre que le point de rosée soit inférieur à -20°C (ce qui correspond à une teneur en eau inférieure à 15 mg/m<sup>3</sup>), que la teneur en H<sub>2</sub>S soit inférieure à 100 mg/m<sup>3</sup>, et que la teneur en

hydrocarbures liquides soit inférieure à 1 %, avec une taille de poussières limitée à 40 microns. [32]

#### **II.8.6.4. Valorisation par injection dans le réseau de gaz de ville :**

Il peut aussi être injecté sur le réseau de gaz naturel. C'est la solution qui offre le meilleur rendement énergétique, si le réseau est assez proche du point de production. Le gaz injecté doit être odorisé et subir un certain nombre de prétraitements pour éliminer le CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O et les composés halogènes. [60]

#### **II.9. Substrat :**

Les substrats qui peuvent faire l'objet d'un traitement par digestion anaérobie sont essentiellement : [61]

- Les effluents d'élevage ;
- Les eaux usées urbaines ;
- Les déchets agro-alimentaires ;
- Les ordures ménagères

##### **II.9.1. Les effluents d'élevage :**

L'élevage de trois espèces (bovins, porcins et volailles) émet chaque année près de 300 millions de tonnes de déchets, soit huit fois plus que la production de la population humaine.

Les élevages de porcs sont producteurs d'un déchet mixte, mélange d'urines et de fèces : le lisier, qui est produit toute l'année dans des élevages aux forts effectifs d'animaux rassemblés, essentiellement dans des bâtiments de faibles surfaces. Le lisier est aisément stockable et manutentionnable.

Les élevages d'ovins sont moins concernés. Les ovins sont essentiellement des animaux de plein air et leurs passages en bergeries n'ont pas l'intensité des stationnements des porcs ou des vaches laitières dans leurs bâtiments spécialisés.

##### **II.9.2. Les eaux usées urbaines :**

Nous avons vu que les différents systèmes d'épuration des eaux usées urbaines par voie aérobie produisent des boues activées, récupérées au niveau des décanteurs ou clarificateurs, et qui alimentent très fréquemment des digesteurs anaérobies. Bien que ces boues puissent parfois donner lieu à une valorisation intéressante, notamment en agronomie, l'objectif du traitement anaérobie est avant tout l'obtention d'une meilleure stabilisation, en particulier afin de réduire les nuisances olfactives et les volumes c'est ainsi que plusieurs auteurs **Mottet** [62] et **Effebi** [43] ont consacré leurs premières recherches essentiellement sur ce type de substrat pour le procédé de la méthanisation

##### **II.9.3. Les déchets agro-alimentaires :**

La charge organique constitutive des eaux résiduaires de l'industrie agroalimentaire et de certains autres types d'industries rend ces effluents polluants et impose un traitement, avant leur évacuation, satisfaisant aux normes de rejet. La digestion anaérobie peut contribuer pour beaucoup de ces effluents à la réduction de cette charge organique, avec des procédés généralement spécifiques à ce type de substrat, caractérisés par l'existence de dispositifs de rétention des bactéries dans le fermenteur et adaptés à des faibles concentrations de matière sèche [63].

##### **II.9.4. les ordures ménagères :**

La production de biogaz à partir de la fraction organique des ordures ménagères dépend, bien entendu, du procédé utilisé et de la qualité de produit mis en fermentation. Compte tenu des teneurs en matière sèche des fractions fermentescibles, les procédés de fermentation méthanique à haute teneur en matière sèche semblent les mieux adaptés, pour des raisons évidentes de réduction des volumes des digesteurs [63].

- Les réactions biologiques des deux étapes sont décrites par les schémas réactionnels suivants :

Acidogènes :



Avec une vitesse de réaction  $r_1 = u_1(S_1)X_1$  telle que  $u_1(S_1)$  est le taux de croissance spécifique de  $X_1$  sur  $S_1$ .



Avec une vitesse de réaction  $r_2 = u_2(S_2)X_2$  telle que  $u_2(S_2)$  est le taux de croissance spécifique de  $X_2$  sur  $S_2$ . six équations différentielles.

$$dX_1/dt = (U_1(S_1) - \alpha D)X_1 \quad (II - 27)$$

$$dS_1/dt = D(S_{1in} - S_1) - K_1 U_1(S_1)X_1 \quad (II - 28)$$

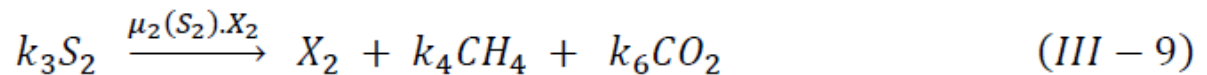
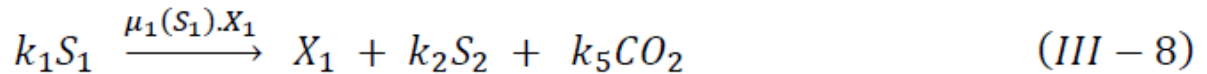
$$dX_2/dt = (U_2(S_2) - \alpha D)X_2 \quad (II - 29)$$

$$dS_2/dt = D(S_{in} - S_2) + K_2 U_1(S_1)X_1 - K_3 U_2(S_2)X_2 \quad (II - 30)$$

$$dz/dt = D(Z_{in} - Z) \quad (II - 31)$$

$$\frac{dC}{dt} = D(C_{in} - C) - q_c(\xi) + K_4 \mu_1(S_1)X_1 + K_5 \mu_2(S_2)X_2 \quad (II - 32)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_1(S_1) = \mu_{1max} \frac{S_1}{S_1 + K_{S1}} \text{ (Monod)} \\ \mu_2(S_2) = \mu_{2max} \frac{S_2}{S_2 + K_{S2} + \frac{S_2^2}{K_{i2}}} \text{ (Haldane)} \\ q_c(\xi) = K_L \alpha [C + S_2 - Z - K_H P_C(\xi)] \\ q_M(\xi) = K_6 \mu_2(S_2)X_2 \\ P_C(\xi) = \frac{\emptyset + \sqrt{\emptyset^2 - 4K_H P_T (C + S_2 - Z)}}{2K_H} \\ \emptyset = C + S_2 - Z + K_H P_T + \frac{K_6}{K_L \alpha} \mu_2(S_2)X_2 \\ CO_2 = C - Z + S_2 \\ pH(\xi) = -\log_{10} \left( K_b \frac{C - Z + S_2}{Z - S_2} \right) \end{array} \right. \quad (II - 33)$$



$$\frac{dX_1}{dt} = \mu_1(S_1).X_1 \quad (III - 10)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = \mu_2(S_2).X_2 \quad (III - 11)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = -K_1 \mu_1(S_1)X_1 \quad (III - 12)$$

## II.10 Les méthodes utilisées pour résoudre l'équation différentielle :

### II.10.1 La méthode des différences finies :

#### II.10 .1.1 Définition :

En mathématiques, une différence finie est une expression sous la forme d'une différence entre les valeurs d'une fonction en deux points spécifiques. La méthode consiste à remplacer les dérivées partielles par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage [34,36].

**Avantages** : grande simplicité d'écriture et faible coût de calcul.

**Inconvénients** : limitation à des géométries simples, di cultes de prise en compte des conditions aux limites de type Neumann [36].

#### II.10.1.2 Principe :

La différence finie peut être utilisée pour discrétiser une équation différentielle ordinaire et consiste à approximer les dérivées des équations de la physique au moyen des développements de Taylor et se déduit directement de la définition de la dérivée [33].

Soit  $u(x, y, z, t)$  une fonction de l'espace et du temps. Par définition de la dérivée, on a :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{u(x + \Delta x, y, z, t) - u(x, y, z, t)}{\Delta x} \quad (II. 32)$$

Si  $\Delta x$  est petit, un développement de Taylor de  $u(x+\Delta x, y, z, t)$  au voisinage de  $x$  donne :

$$u(x + \Delta x, y, z, t) = u(x, y, z, t) + \Delta x \frac{\partial u}{\partial x}(x, y, z, t) + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, y, z, t) + \frac{\Delta x^3}{6} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3}(x, y, z, t) + \dots \tag{II. 33}$$

En tronquant la série au premier ordre en  $\Delta x$ , on obtient :

$$\frac{u(x + \Delta x, y, z, t) - u(x, y, z, t)}{\Delta x} = \frac{\partial u}{\partial x}(x, y, z, t) + O(\Delta x) \tag{II. 35}$$

L'approximation de la dérivée  $\frac{\partial u}{\partial x}(x)$  est alors **d'ordre 1** indiquant que l'erreur de troncature  $O(\Delta x)$  finit vers zéro comme la puissance première de  $\Delta x$ .

**II.10.1.3 Notation indicielle - cas 1D :**

Considérons un cas monodimensionnel où l'on souhaite déterminer une grandeur  $u(x)$  sur l'intervalle  $[0,1]$ . La recherche d'une solution discrète de la grandeur amène à constituer un maillage de l'intervalle de définition. On considère un maillage (ou grille de calcul) composé de  $N+1$  points  $x_i$  pour  $i=0 \dots N$  régulièrement espacés avec un pas  $\Delta x$ .

Les points  $x_i = i\Delta x$  sont appelés les nœuds du maillage. Le problème continu de départ de détermination d'une grandeur sur un ensemble de dimension infinie se ramène ainsi à la recherche de valeurs discrètes de cette grandeur aux différents nœuds du maillage.

**Notation :** on note la valeur discrète de  $u(x)$  au point  $x_i$ , soit  $u_i = u(x_i)$ . De même pour la dérivée de  $u(x)$  au nœud  $x_i$ , on note  $(\frac{\partial u}{\partial x})_{x=x_i} = (\frac{\partial u}{\partial x})_i$ . Cette notation s'utilise de façon équivalente pour toutes les dérivées d'ordre successif de la grandeur  $u$ .

Le schéma aux différences finies d'ordre 1 présenté au-dessus s'écrit, en notation indicielle :

$$(\frac{\partial u}{\partial x})_i = (\frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x}) + O(\Delta x) \tag{II. 36}$$

Ce schéma est dit "**schéma explicite**" ou "**décentré avant**". Il est possible de construire un autre schéma d'ordre 1, appelé "**schéma implicite**" :

$$(\frac{\partial u}{\partial x})_i = (\frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x}) + O(\Delta x) \tag{II. 37}$$

**II.10.1.4 Schéma d'ordre supérieur :**

Des schémas aux différences finies d'ordre supérieur peuvent être construits en manipulant des développements de Taylor au voisinage de  $x_i$ . On écrit :

$$u_{i+1} = u(x + \Delta x) = u_i + \Delta x \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_i + \frac{\Delta x^2}{2} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_i + O(\Delta x^3) \quad (\text{II. 38})$$

$$u_{i-1} = u(x - \Delta x) = u_i - \Delta x \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_i + \frac{\Delta x^2}{2} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_i + O(\Delta x^3) \quad (\text{II. 39})$$

La soustraction de ces deux relations donne :

$$u_{i+1} - u_{i-1} = 2\Delta x \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_i + O(\Delta x^3) \quad (\text{II. 40})$$

Ce qui permet d'obtenir le schéma d'ordre deux dit "centré" pour approximer la dérivée première de  $u$  :

$$\left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_i = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{\Delta x^2} + O(\Delta x) \quad (\text{II. 41})$$

**II.11 Méthode de Runge – Kutta :**

Les méthodes de Runge-Kutta sont des méthodes à un pas où la fonction  $f$  est évaluée plusieurs fois par intervalle de la subdivision [41].

Un schéma de Runge- Kutta 4 est défini par les formules :

$$k_1 = f(x_n, y_n) \quad (\text{II.54})$$

$$k_2 = f(x_n + c_2 h, y_n + h a_{2,1} k_1) \quad (\text{II.55})$$

$$k_3 = f(x_n + c_3 h, y_n + h(a_{3,1} k_1 + a_{3,2} k_2)) \quad (\text{II.56})$$

$$k_4 = f(x_n + c_s h, y_n + h(a_{s,1} k_1 + \dots + a_{s,s-1} k_{s-1})) \quad (\text{II.57})$$

$$y_{n+1} = y_n + h(b_1 k_1 + \dots + b_s k_s) \quad (\text{II.58})$$

$$x_{n+1} = x_n + h \quad (\text{II.59})$$

Les valeurs des coefficients  $k_i$  dépendent de  $x$  et sont donc différentes pour chaque valeur de  $n$ .

**II.11.1 La méthode Runge Kutta 4 :**

La méthode d'Euler n'utilise que la dérivée au début de chaque intervalle  $[kh, (k+1) h]$  pour déduire les valeurs  $X_{k+1}$  et  $Y_{k+1}$  à la fin de l'intervalle à partir des valeurs  $X_k$  et  $Y_k$  au début de l'intervalle. A présentons va calculer des valeurs de la dérivée en 4 points de l'intervalle, on d'atteindre une plus grande précision [42].

**II.11.1.1 La formule de méthode de Runge Kutta 4 :**

Le système d'équation différentielle régissant le fonctionnement du distillateur solaire se compose de 3 équations non linéaires d'ordre un. Nous avons 3 inconnues :  $T_p$ ,  $T_e$ ,  $T_v$ .

Ces équations se résolvent sous MATLAB par la méthode de RUNGE-KUTTA 4, du cinquième ordre.

La méthode de RUNGE-KUTTA 4 donnée par :

$$T_{i+1} = T_i + \frac{1}{6}k_1 + \frac{1}{3}k_2 + \frac{1}{3}k_3 + \frac{1}{6}k_4 \quad (\text{II.60})$$

Chaque étape de RUNGE-KUTTA 4 utilisée les 4 valeurs suivantes :

$$k_1 = hf(t_i, T_i) \quad (\text{II.61})$$

$$k_2 = hf(t_i + \frac{1}{2}h, T_i + \frac{1}{2}k_1) \quad (\text{II.62})$$

$$k_3 = hf(t_i + \frac{1}{2}h, T_i + \frac{1}{2}k_2) \quad (\text{II.63})$$

$$k_4 = hf(t_i + h, T_i + k_3) \quad (\text{II.64})$$

**II.11.2 la méthode Runge – Kutta – FEHLBERG :**

En mathématiques, la méthode Runge – Kutta – Fehlberg (ou méthode Fehlberg) est un algorithme d'analyse numérique pour la solution numérique des équations différentielles ordinaires. Il a été développé par le mathématicien allemand Erwin Fehlberg et est basé sur la grande classe de méthodes Runge – Kutta. La nouveauté de la méthode de Fehlberg est qu'il s'agit d'une méthode intégrée de la famille Runge – Kutta, ce qui signifie que des évaluations de fonctions identiques sont utilisées conjointement pour créer des méthodes d'ordre variable et des constantes d'erreur similaires. La méthode présentée dans l'article de Fehlberg de 1969 a été surnommée la méthode RKF45, et est une méthode d'ordre 4 avec un estimateur d'erreur d'ordre 5. En effectuant un calcul supplémentaire, l'erreur dans la solution peut être estimée et

contrôlée en utilisant le plus élevé - ordre intégré méthode qui permet de déterminer automatiquement une taille de pas adaptative [40].

**II.11.2.1 La formule de méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG :**

Le système d'équation différentielle régissant le fonctionnement du distillateur solaire se compose de 6 équations non linéaires d'ordre un. Nous avons 3 inconnues :  $T_p$ ,  $T_e$ ,  $T_v$ .

Ces équations se résolvent sous MATLAB par la méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG, du cinquième ordre.

La méthode de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG donnée par :

$$T_{i+1} = T_i + \frac{16}{135}k_1 + \frac{6656}{12825}k_3 + \frac{28561}{56430}k_4 - \frac{9}{50}k_5 + \frac{2}{55}k_6 \tag{II.65}$$

Chaque étape de RUNGE-KUTTA-FEHLBERG nécessite l'utilisation de six valeurs suivantes :

$$k_1 = hf(t_i, T_i) \tag{II.66}$$

$$k_2 = hf\left(t_i + \frac{1}{4}h, T_i + \frac{1}{4}k_1\right) \tag{II.67}$$

$$k_3 = hf\left(t_i + \frac{3}{8}h, T_i + \frac{3}{32}k_1 + \frac{9}{32}k_2\right) \tag{II.68}$$

$$k_4 = hf\left(t_i + \frac{12}{13}h, T_i + \frac{1932}{2197}k_1 - \frac{7200}{2197}k_2 + \frac{7296}{2197}k_3\right) \tag{II.69}$$

$$k_5 = hf\left(t_i + h, T_i + \frac{439}{216}k_1 - 8k_2 + \frac{3680}{513}k_3 - \frac{845}{4104}k_4\right) \tag{II.70}$$

$$k_6 = hf\left(t_i + \frac{1}{2}h, T_i - \frac{8}{27}k_1 - 2k_2 - \frac{3544}{2565}k_3 + \frac{1855}{4104}k_4 + \frac{11}{40}k_5\right) \tag{II.71}$$

**II.11.3 La méthode Runge Kutta de sixième ordre explicite :**

Le système d'équations différentielles ordinaires considéré a la forme

$$dy/dx = f(x, y) \tag{II.72}$$

$y(x_0) = y_0$  Ici  $y(x)$  et  $f(x, y)$  sont des fonctions à valeurs vectorielles

$$y_x = (y_1(x), y_2(x), \dots \dots \dots, y_m(x)) \tag{II.73}$$

$$f(x, y) = (f_1(x, y), f_2(x, y), \dots \dots \dots, f_m(x, y)) \tag{II.74}$$

Nous avons donc affaire à  $m$  équations simultanées de premier ordre. Pour le cas du cinquième ordre, des formules explicites de Runge-Kutta ont été trouvées dont le reste, bien



que d'ordre six lorsque  $y$  est présent dans (II.72), devient d'ordre 7 lorsque  $f$  est une fonction de  $x$  seul [47], [48]. Ceci est dû à l'utilisation de six substitutions, une caractéristique nécessaire lorsque  $y$  se produit de manière non triviale [45]. Une famille de formules explicites du sixième ordre a été décrite [45]. Dans cette famille se trouve la formule donnée dans la section suivante. Son reste, tout en étant d'ordre sept lorsque  $y$  est présent dans (II.72), est d'ordre 8 lorsque  $f$  est une fonction de  $x$  seul. Là encore, la possibilité se présente parce que sept substitutions fonctionnelles sont utilisées au lieu de six. Encore une fois, c'est un must [46].

Pour certaines équations (celles qui ne dépendent pas fortement de  $y$ ), ces formules semblent conduire à une augmentation de la précision.

**II. 11.3.1 La formule de Runge Kutta de sixième ordre explicite (Rk7) :**

Pour l'intervalle  $[x_n, x_{n+h}]$ , Lobatto quad- Les points de ration qui conduisent à un reste d'ordre 8 sont :

$$x_n, \quad x_n + h/2, \quad x_n + (7 - 21^{1/2})h/14, \quad x_n + (7 + 21^{1/2})h/14, \quad x_n + h$$

Ce qui suit est un ensemble de formules Runge-Kutta connexes. Ils peuvent être vérifiés par substitution dans les relations données par Butcher [45].

Exprimés de manière habituelle, ils sont

$$T_{i+1} = T_i + \{9k_1 + 64k_3 + 49k_5 + 49k_6 + 9k_7\}/180 \tag{II.75}$$

$$k_1 = hf(t_i, T_i) \tag{II.76}$$

$$k_2 = hf(x_i + vh, T_i + vk_1) \tag{II.77}$$

$$k_3 = hf(t_i + \frac{1}{2}h, T_i + [(4v - 1)k_1 + k_2]/(8v)) \tag{II.78}$$

$$k_4 = hf(t_i + \frac{2}{3}h, T_i + [(10v - 2)k_1 + 2k_2 + 8vk_3]/(27v)) \tag{II.79}$$

$$k_5 = hf(t_i + (7 + 21^{\frac{1}{2}})h/14, T_i + [-([77v - 56] + [17v - 8]21^{\frac{1}{2}})k_1 - 8(7 + 21^{\frac{1}{2}})k_2 + 48(7 + 21^{\frac{1}{2}})vk_3 - 3(21 + 21^{\frac{1}{2}})vk_4]/(392v)) \tag{II.80}$$

$$k_6 = hf\left(t_i + \frac{\left(7-21^{\frac{1}{2}}\right)h}{14}, T_i + [-5\left([287v - 56] - [59v - 8]21^{\frac{1}{2}}\right)k_1 - 40\left(7 - 21^{\frac{1}{2}}\right)k_2 + 320\left(21^{\frac{1}{2}}\right)vk_3 + 3\left(21 - 121\left(21^{\frac{1}{2}}\right)\right)vk_4 + 392\left(6 - 21^{\frac{1}{2}}\right)vk_5]/(1960v)\right)$$

$$k_7 = hf\left(t_i + h, T_i + [15\left([30v - 8] - [7v21^{\frac{1}{2}}]\right)k_1 + 120k_2 - 40(5 + 7\left(21^{\frac{1}{2}}\right))vk_3 + 63\left(2 + 3\left(21^{\frac{1}{2}}\right)\right)vk_4 - 14\left(49 - 9\left(21^{\frac{1}{2}}\right)\right)vk_5 + 70(7 + 21^{\frac{1}{2}})vk_6]/(180v)\right)$$

(II.81)

(II.82)

**II. 12 Programme :**

Le programme informatique élaboré est écrit en **MATLAB** (version 2018).Ce logiciel calcule les différents .....

Au début du programme, on donne les données ....., telles que : les..... initiales .....

# **Chapitre III**

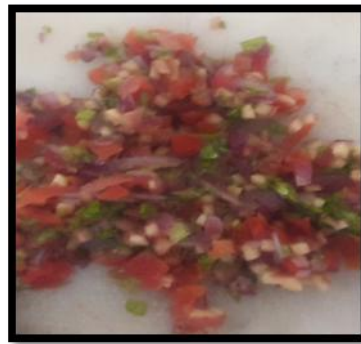
## **Méthodes et Matériels**

### III.1. Le substrat utilisé :

Le substrat utilisé dans cette étude pour l'alimentation des digesteurs:

- Le déchet ménager, ce déchet constitué principalement par les déchets de cuisine de différentes quantités: 5.0175g, 5.0114g et 5.0035g

Ces déchets sont découpés en petits morceaux afin d'assurer une homogénéisation de l'échantillon .photo III.1.



**Photo III.1 :** Déchet ménager .

- Le déchet l'abattoir : Le substrat étudié est constitué de l'ensemble des déchets et sous produits engendrés par l'activité des abattoirs, de façon qualitative et quantitative. le substrat sélectionné est composé de déchets de contenus de panses .Photo III.2.



**Photo III.2 :** Le déchet l'abattoir utilise.

### III.2. Description de digesteur :

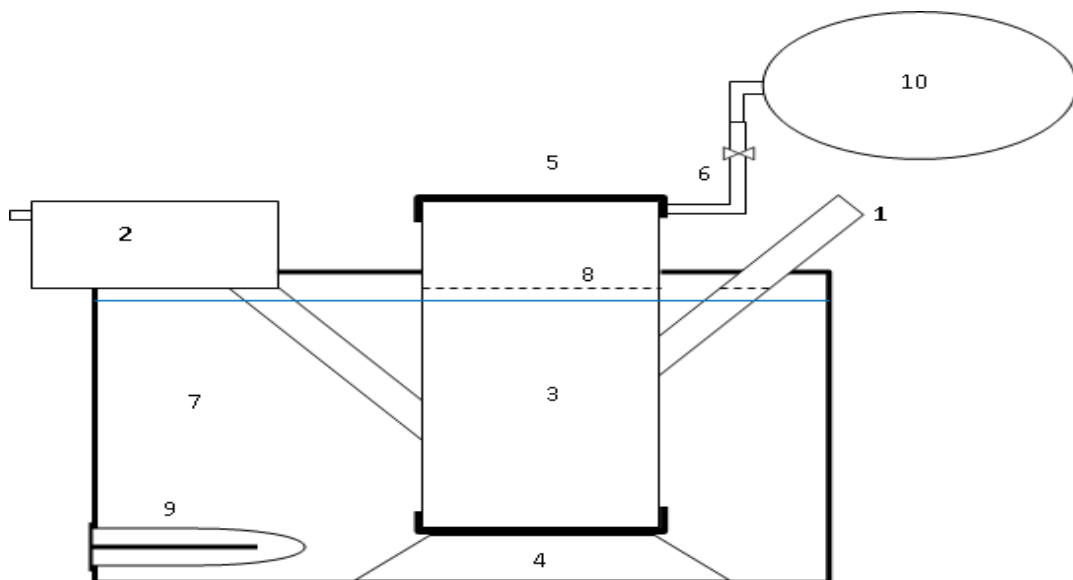
#### a) Dispositif expérimental:

Le digesteur continu est un tube de plastique avec un diamètre de 20 cm et une longueur de 45 cm, hermétiquement fermé, avec un volume réactionnel de 12 L, deux tubes de diamètre de 4 cm ont été installés sur les deux côtés, l'un pour l'introduction de la matière organique et l'autre pour la sortie de substrat digéré. Une sortie de biogaz est installée en haut de digesteur

elle menée d'une vanne d'arrêt, à l'extrémité de la sortie nous avons installé un ballon pour stocké le biogaz produit. La température de la fermentation est fixée à 37°C dans un bain marie thermostat.



Photo III.3 : Digesteur continu.



(1) Entrée du substrat; (2) Sortie du Digestat; (3) Corps de digesteur; (4) Support;  
 (5)Couvercle; (6) Sortie du biogaz; (7) Bain-marie; (8) Niveau du substrat; (9) Résistance  
 électrique; (10) Ballon pour la récupération du biogaz.

**Figure III.1** : Dispositif expérimental du digesteur continu à l'échelle du laboratoire.

(TAHRI Ahmed, 2019).

➤ **L'inoculum:**

L'inoculum utilisé est récupéré d'un digesteur en fonction qu'est traitée la bouse de vache.

**III.3. La détermination du pH :**

**a) Matériels utilisés :**

- pH-mètre ;
- bécher.

**b) Méthode :**

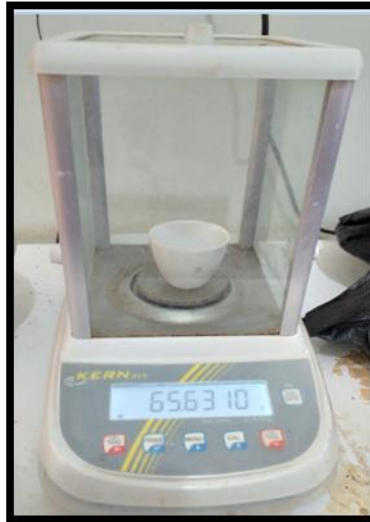
1. On allume le PH mètre.
2. Rincer l'électrode, avec de l'eau distillée et sécher avec un papier hygiénique.
3. Immerger l'électrode dans l'échantillon à analyser et agiter
4. Lire directement le pH lorsque la valeur s'est stabilisée.
5. Rincer l'électrode avec l'eau distillée et sécher pour réaliser la mesure suivante.
6. Noter la valeur affichée sur l'appareille.

**III.4. Les paramètres de détermination du bilan matière :**

**III.4.1 Détermination de la matière sèche (MS) :**

**a) Matériels utilisés :**

- Creusé.
- Balance.
- Dessiccateur.
- Etuve réglée à 105.



Dessiccateur

Balance+ Creusé.

Etuve réglée à 105

**Photo III.4** : Matériels utilisés pour Détermination la matière sèche.**b) Méthode :**

La matière sèche est déterminée par dessiccation dans une étuve maintenue à 105 °C jusqu'à ce que le poids de l'échantillon à analyser devienne constant. La différence du poids correspond à la perte d'humidité et le résidu représente la teneur en matière sèche de l'échantillon.

Pour déterminer la matière sèche, une prise d'échantillon de masse 3g, soit (M1), est versée dans un creuset de masse connue soit (M) préalablement nettoyée et séchée, ensuite l'ensemble est placé dans une étuve à 105 °C pendant 2 heures et en calcul le poids, on répète ce processus jusqu'à ce que nous obtenions un poids d'échantillon stable. Les creusets

ont été pesés après refroidissement dans un dessiccateur. (Lamir Abderrahim, 2019-2020)



**Photo III .5.**Substrats après dessiccateur.

La matière sèche s'obtient selon la méthode de Michaud : (Lamir Abderrahim, 2019-2020)

$$M \% = \left( \frac{M_2}{M_1} \right) \times 100$$

Avec :

M : masse de la creusé ;

M1 : masse de l'échantillon avant dessiccation ;

M2 : masse de l'échantillon après dessiccation.

Le taux d'humidité est calculé à partir de la formule suivante :

$$\% \text{ d'humidité} = 100 - \% \text{MS}$$

#### III.4.2. Détermination de la teneur en matière organique (MO) :

a) Matériels utilisés :

- Creusé
- Balance de précision
- Dessiccateur
- Four à moufle





**Photo III. 6 :** Four à moufle

**b) Méthode utilisée :**

Pour déterminer la teneur en matière organique (MO), la masse ( $M_2$ ) de l'échantillon après dessiccation, est introduite dans une creusé préalablement nettoyée et séchée ayant une masse ( $M$ ), l'ensemble est placé dans un four à moufle pour une calcination à [550](#) °C pendant 5 heures.

Après refroidissement les creusés contenant la matière minérale. (S. Kalloum, 2016)



**Photo III.7:** Substrat après calcination.

**c) Les calculs :**

Le calcul de matière organique MO s'obtient selon la relation suivante : (S. Michaud, 2001)

$$\%MO = \frac{M_2 - M_3}{M_2} \times 100$$

$M_2$  : la masse après la dessiccation.

$M_3$  : la masse après calcination.

**III.5. Détermination du volume du biogaz et CH<sub>4</sub> :**

La production du biogaz est le but principal de la digestion anaérobie. Durant le déroulement du processus de digestion anaérobie le volume du biogaz et le méthane produit sont mesurés de façon régulière par la méthode de Test de Potentiel Méthanogène (BMP).

**a) Matériels**

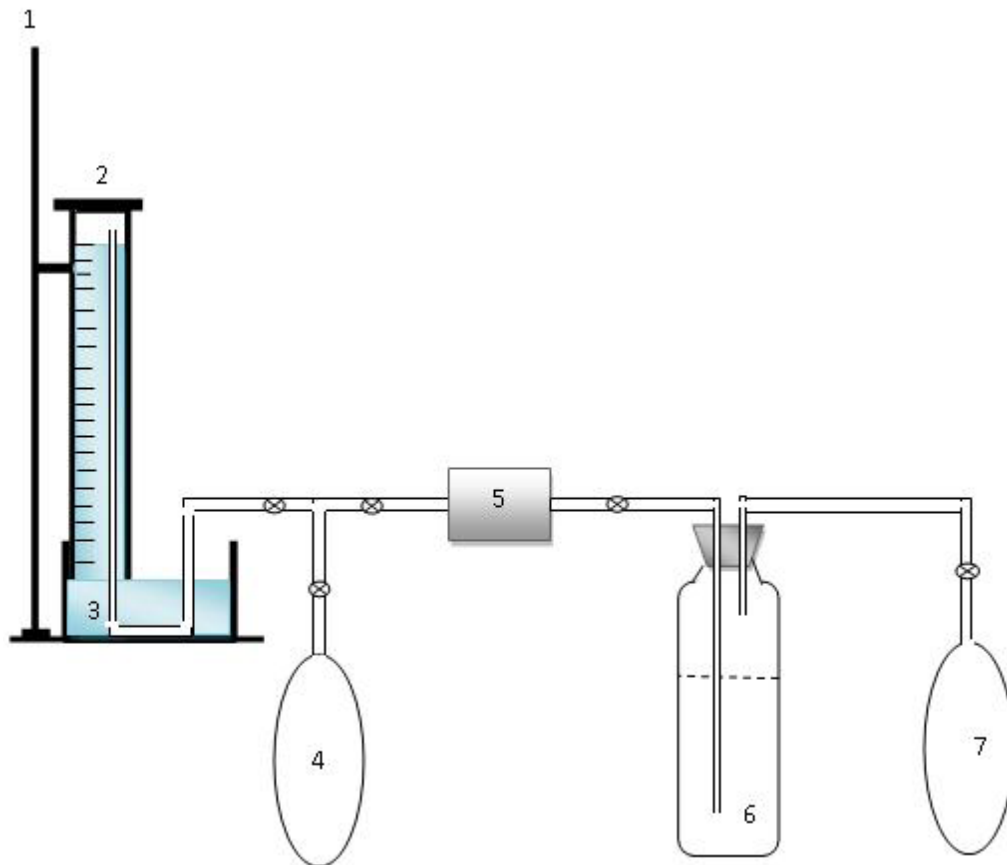
- Éprouvette graduée;
- Flacon ;
- Support ;
- Des tuyaux;
- Pompe à vide;
- deux ballons

**b) Solutions**

- Na Cl (10g/l) pH=2.
- NaOH (3M/l).

**c) Méthode:**

Le volume des biogaz produits (4) est mesuré par la méthode du liquide déplacé dans l'éprouvette inversé (2) avec une solution saturée (NaCl 10g/l pH=2) (3) afin de réduire au maximum la dissolution de CO<sub>2</sub>; après la quantification le biogaz est pomper(5) dans une solution de NaOH (3M/l) (6) pour l'élimination de CO<sub>2</sub>, en fin en obtenons un méthane pure(7), en le quantifier par la même méthode (S. Str et al,2017). Photo 05. Fige20.



(1) Statif - (2) Éprouvette graduée inversée - (3) Solution saturée (NaCl 10g/l pH=2) - (4) Biogaz non filtré (5) Pompe à vide - (6) Filtration de CO<sub>2</sub> (solution de NaOH (3M/l)) - (7) Biogaz filtré.

**Figure III.2:** Schéma représentatif de système de mesure du volume du biogaz et de CH<sub>4</sub> produit. (Test de potentiel méthanogène ou BMP). (TAHRI Ahmed, 2019)

### II.5.1. Détermination de la DCO :

C'est la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder chimiquement lors de la dégradation chimique d'une quantité de matière organique. Cette mesure traduit leurs teneurs et le degré de la pollution. La DCO est l'unité de mesure de pollution carbonée la plus utilisée en modélisation des procédés biologiques car elle permet de faire des bilans de matière regroupant des produits organiques biodégradables et non biodégradables. (Lamir Abderrahim, 2020)

#### a) Matériels utilisés :

- Centrifugeuse.
- Pipette.
- Epprouvette.

- Bécher.
- Tubes.
- Burette.
- Thermo réacteur.

#### b) Méthode :

Ce dosage est réalisé par l'emploi de la méthode au bichromate de potassium (AFNOR T90 -101). Cette méthode analytique est adaptée pour le dosage de la DCO dans la gamme de mesure va de 30 mg/L à 700 mg/L pour des échantillons non dilués. Les valeurs de la DCO de notre échantillon sont plus élevées que ces valeurs, pour cela toutes les mesures de la DCO sont réalisées sur des échantillons dilués (**Lamir Abderrahim, 2020**)

Les matières organiques contenues dans l'échantillon sont oxydées, en milieu acide ( $H_2SO_4$ ), en présence de sulfate d'argent ( $Ag_2 SO_4$ ) comme catalyseur, et de sulfate de mercure ( $HgSO_4$ ) pour éviter l'interférence des chlorures, par le bichromate de potassium ( $K_2 Cr_2 O_7$ ), introduit en excès, sous le chauffage à  $150^\circ C$ , pendant 2 heures dans un thermo réacteur

Après refroidissement, la DCO est déterminée par dosage en retour : l'excès de bichromate de potassium est dosé à l'aide d'une solution de sulfate fer ammonium [sel de Mohr  $Fe (NH_4)_2 (SO_4) H_2 O$ ],

Après la détermination de leur titre, en présence de quelques gouttes de féroïenne comme indicateur coloré. L'oxydation de la matière produit des ions donnant une coloration rouge violacé. La DCO est exprimé par la relation suivante :

$$DCO = \frac{V_T - V_E \times 8000 \times T \times d}{V_e} \quad (\text{en mg } O_2 / L)$$

Avec :

$V_T$  : Volume de sel de Mohr pour le témoin.

$V_E$  : Volume de sel de Mohr pour l'échantillon.

$T$  : titre de sel de Mohr.

$d$  : facteur de dilution.

$V_e$  : Volume d'échantillon prélevés après la dilution.

# **Chapitre *IV***

## **Résultats et discussions**

Dans ce chapitre sont présentés les résultats obtenus et leur interprétation .

**Caractéristiques du substrat :**

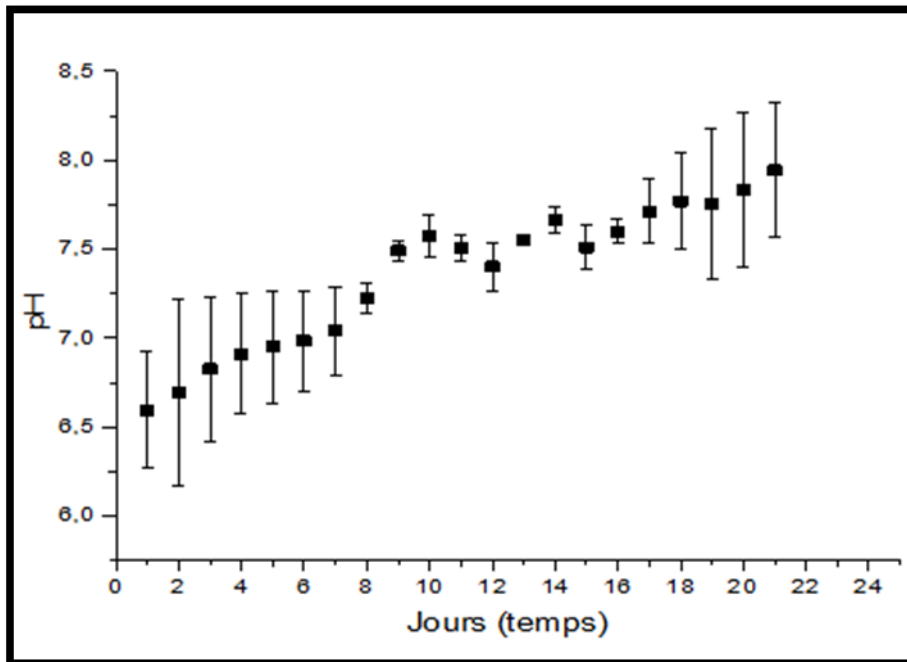
Paramètre	Unités	Déchet ménage(DM)	Déchet abattoir(DA)
pH			5,81
Taux de Matière sèche	%	12,24	21,75
Taux de Matière organique	%	91,78	94,01
Taux de Matière minérale	%	8,22	5,99
Taux d'humidité	%	87,76	78 ,25
Demande chimique en oxygène Soluble (DCO <sub>S</sub> )	Mg/l	13227,52	21744,79
Demande chimique en oxygène Totale (DCO <sub>T</sub> )	Mg /l	6361,26	16927,08

**IV.1 .Variation du pH :**

**IV.1.1.Variation du pH de déche ménagers :**

Le tableau suivant représente les valeurs de pH pour les trois digesteurs et le pH moyen entre eux :

Les jours	$pH_{Dg1}$	$pH_{Dg2}$	$pH_{Dg3}$	$pH_{moyen}$
1	6,92	6,61	6,26	6,59667
2	7,29	6,51	6,29	6,69667
3	7,29	6,66	6,53	6,82667
4	7,3	6,72	6,72	6,91333
5	7,31	6,77	6,77	6,95
6	7,31	6,86	6,79	6,98667
7	7,32	6,93	6,87	7,04
8	7,32	7,18	7,18	7,22667
9	7,56	7,46	7,46	7,49333
10	7,71	7,51	7,51	7,57667
11	7,42	7,55	7,55	7,50667
12	7,56	7,32	7,32	7,4
13	7,52	7,56	7,56	7,54667
14	7,58	7,71	7,71	7,66667
15	7,65	7,42	7,46	7,51
16	7,68	7,56	7,56	7,6
17	7,87	7,52	7,75	7,71333
18	8,02	7,48	7,8	7,76667
19	8,22	7,39	7,65	7,75333
20	8,31	7,45	7,74	7,83333
21	8,35	7,87	7,61	7,94333

**Tableau IV.1 :** La variation de pH en fonction de temps de déche ménage.**Figure. IV.1:** La variation de pH en fonction de temps de déche ménage.

D'après la figure, on remarque que le niveau de pH est compris entre 6,26 et 8,35 pendant 21 jours pour les trois digesteurs.

Le niveau de pH le premier jour était de 6,5 et augmentait jusqu'au sixième jour, pour approcher 7;

Il a atteint 7 au septième jour et a continué d'augmenter jusqu'à la fin de l'expérience, atteignant 7,8 .explique par consommation de acétate.

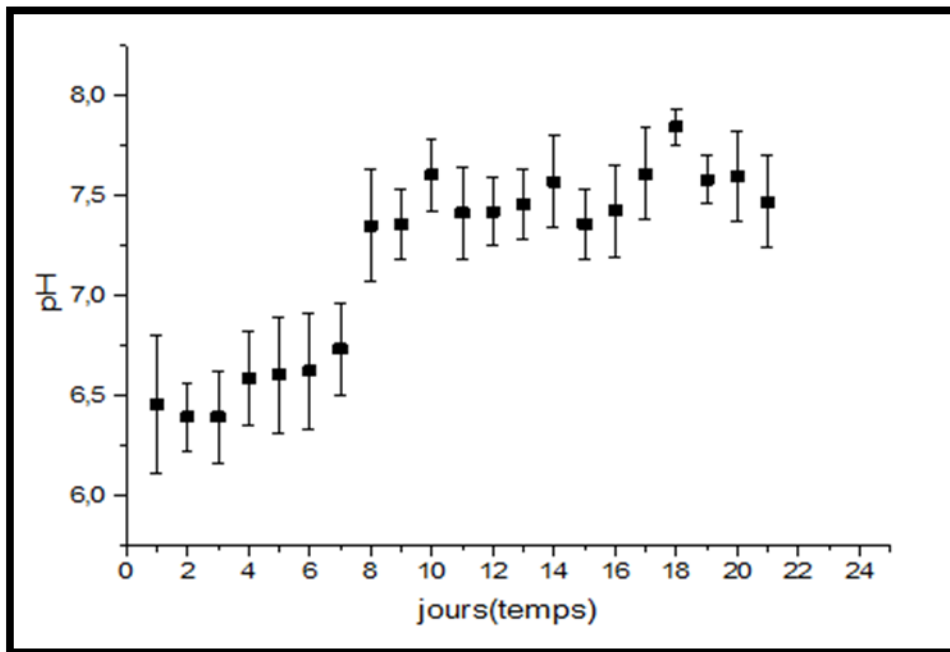
## IV.1.2. PH de déche d'abattoir:

Le tableau suivant représente les valeurs de pH pour les trois digesteurs et le pH moyen entre eux :

les jours	$pH_{Dg1}$	$pH_{Dg2}$	$pH_{Dg3}$	$pH_{moyen}$
1	6,28	6,24	6,86	6,46
2	6,32	6,27	6,59	6,39333
3	6,55	6,51	6,13	6,39667
4	6,74	6,7	6,32	6,58667
5	6,79	6,75	6,27	6,60333
6	6,81	6,77	6,29	6,62333
7	6,89	6,85	6,47	6,73667
8	7,22	7,16	7,68	7,35333
9	7,48	7,44	7,16	7,36
10	7,53	7,48	7,81	7,60667
11	7,57	7,53	7,15	7,41667
12	7,35	7,3	7,62	7,42333
13	7,58	7,54	7,26	7,46
14	7,73	7,68	7,31	7,57333
15	7,48	7,44	7,16	7,36
16	7,58	7,54	7,16	7,42667
17	7,77	7,72	7,35	7,61333
18	7,95	7,77	7,82	7,84667
19	7,67	7,63	7,45	7,58333
20	7,76	7,7	7,34	7,6
21	7,63	7,58	7,21	7,47333

**Tableau IV.2** :La variation de pH en fonction de temps de déche d'abattoir.





**Figure IV .2 :** La variation de pH en fonction de temps de déche d'abattoir.

D'après la figure, on remarque que le niveau de pH est compris entre 6 ,25 et 7,8 pendant 21 jours pour les trois digesteurs.

Le pH peut être divisé en trois plages:

Au cours des deux premiers jours, on constate une diminution rapide du pH d'une valeur de 6,5 à 6,3. Cette carence est due à la dégradation du substrat et à la formation de l'acide gras en tant que substance

Lactate, butyrate, préopinante, etc. et leurs accumulations dans le milieu.

Dès le quatrième jour, nous avons ajusté le pH avec une solution d'hydroxyde de sodium Afin d'amener sa valeur proche de 7 (valeur optimale pour la digestion anaérobie), du quatrième au huitième jour, le pH ne cesse d'augmenter sa valeur proche de 7.

Après le huitième jour, un deuxième ajustement du pH a été effectué. Mais cette fois le pH, Il reste stable après modification vers 7 jusqu'à la fin de l'expérience. Cela peut s'expliquer par Consommation d'acides gras volatils (AGV) et épuisement de la matière organique. Bonne dérèglement de la méthanisation.

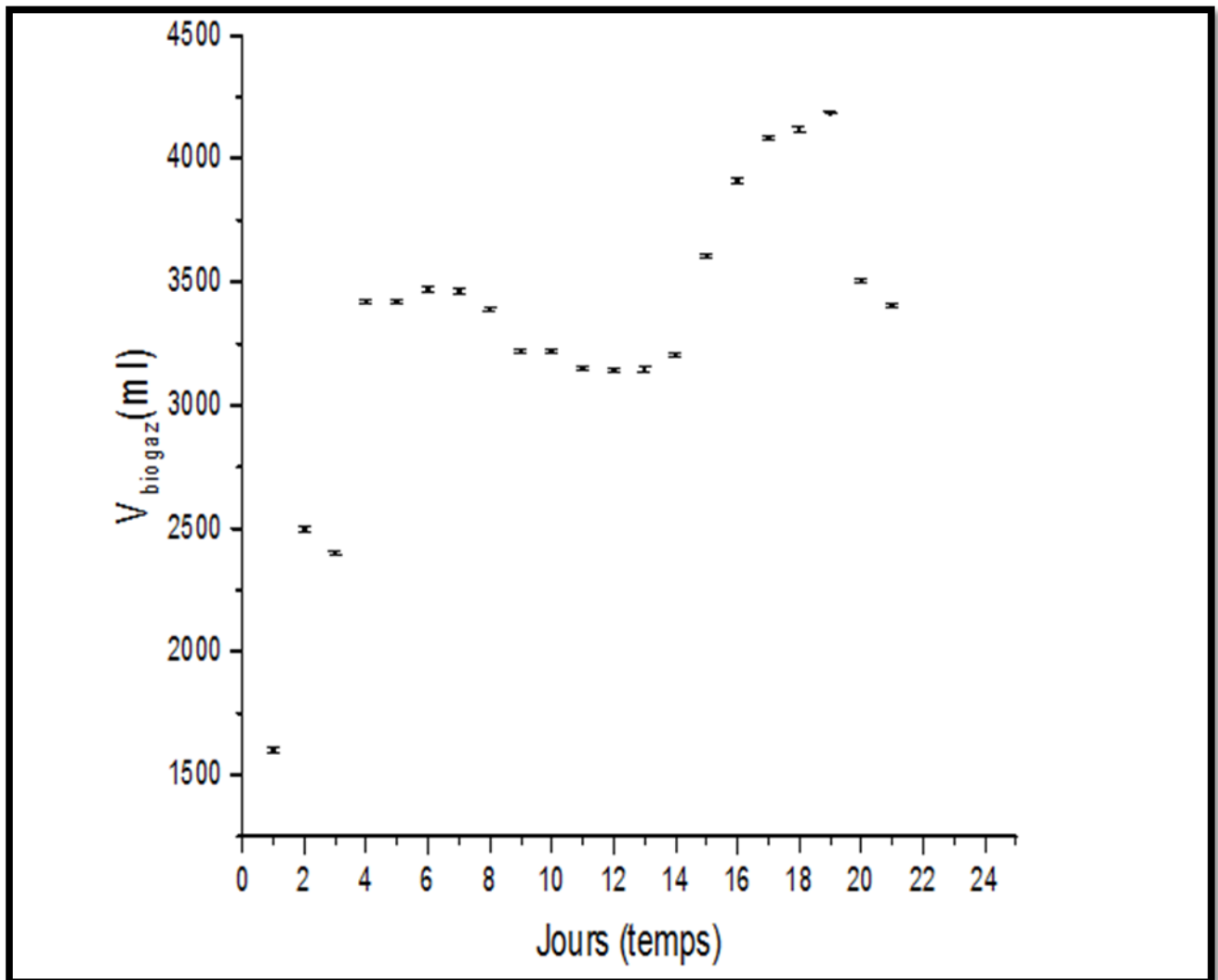
## **IV.2.Volume de biogaz produit :**

### **IV.2.1.Volume de biogaz produit de déche ménagers :**

Le tableau suivant représente les Volume de biogaz produit de déche ménagers pour les trois digesteurs et le moyenne entre eux :

Jours	$V_{Dg1}(ml)$	$V_{Dg2}(ml)$	$V_{Dg3}(ml)$	$V_{moyen}(ml)$
1	1590	1610	1600	1600
2	2480	2509	2500	2496,33333
3	2390	2410	2400	2400
4	3410	3430	3420	3420
5	3410	3430	3420	3420
6	3460	3480	3470	3470
7	3450	3470	3460	3460
8	3380	3400	3390	3390
9	3210	3230	3220	3220
10	3210	3230	3220	3220
11	3140	3160	3150	3150
12	3130	3150	3140	3140
13	3135	3155	3145	3145
14	3200	3210	3200	3203,33333
15	3600	3610	3600	3603,33333
16	3901	3921	3911	3911
17	4086	4086	4076	4082,66667
18	4110	4130	4120	4120
19	4190	4190	4180	4186,66667
20	3500	3510	3500	3503,33333
21	3400	3410	3400	3403,33333

**Tableau IV.3** :Le Volume de biogaz en fonction de temps de déche ménage.



**Figure IV.3 :** Le Volume de biogaz en fonction de temps de déche ménage.

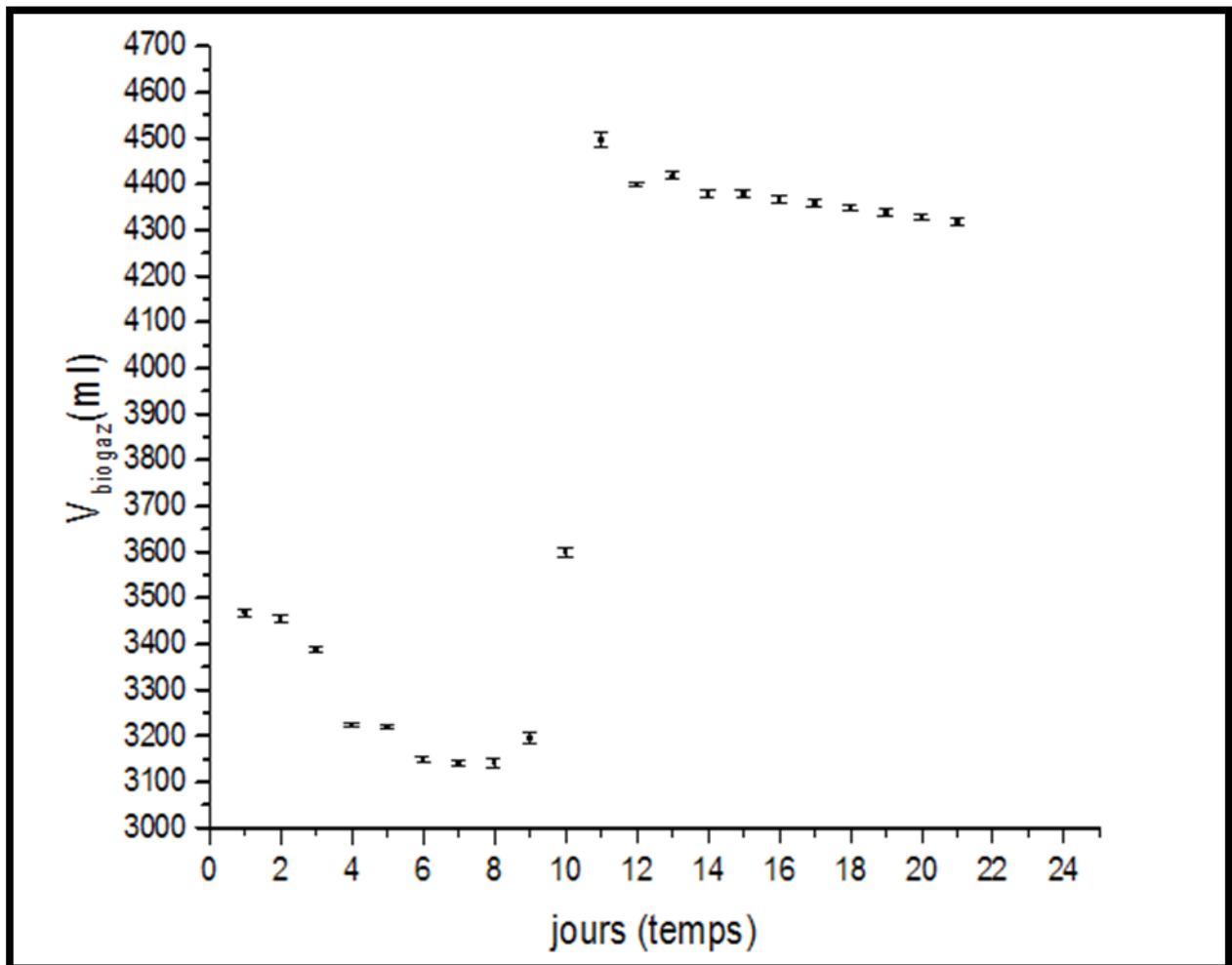
A travers la figure, on remarque que le volume de biogaz le premier jour était de 1500ml, pour augmenter le deuxième jour à 2500ml, après quoi on a remarqué une légère baisse le troisième jour à 2400ml. Une forte production de biogaz a été observée au départ à partir du quatrième jour (3420ml). Cela nous permet de dire qu'il y a transformation des acides gras volatils en méthane et en dioxyde de carbone. Cela peut être justifié en atteignant la formation de méthane à partir de ce jour. La production s'est poursuivie jusqu'au dix-neuvième jour, puis s'est affaiblie et affaiblie jusqu'au dernier jour.

#### **IV. 2.2 .Volume de biogaz produit de déche d'abattoir :**

Le tableau suivant représente les Volume de biogaz produit de déche d'abattoir pour les trois digesteurs et le moyenne entre eux :

Jours	$V_{Dg1}$	$V_{Dg2}$	$V_{Dg3}$	$V_{moyen}$
1	3460	3475	3470	3468,33333
2	3450	3465	3460	3458,33333
3	3380	3394	3390	3388
4	3230	3223	3220	3224,33333
5	3217	3223	3220	3220
6	3145	3155	3150	3150
7	3135	3147	3140	3140,66667
8	3130	3149	3145	3141,33333
9	3180	3206	3200	3195,33333
10	3590	3607	3600	3599
11	4480	4509	4500	4496,33333
12	4395	4405	4400	4400
13	4410	4426	4420	4418,66667
14	4370	4385	4380	4378,33333
15	4370	4387	4380	4379
16	4360	4376	4370	4368,66667
17	4350	4365	4360	4358,33333
18	4340	4354	4350	4348
19	4330	4347	4340	4339
20	4320	4335	4330	4328,33333
21	4310	4326	4320	4318,66667

**Tableau IV.4** :Le Volume de biogaz en fonction de temps de déche d'abattoir.



**Figure IV .4 :** Le Volume de biogaz en fonction de temps de déche d'abattoir.

[3470](#) ml de méthane ont été produits pendant les deux premiers jours, puis il a commencé à décliner jusqu'au septième jour, atteignant [3140](#) ml. On constate une augmentation significative du volume de biogaz du huitième au onzième jour, pour atteindre [4486](#) ml, et puis il commence à diminuer jusqu'à la fin de l'expérience.

#### IV. 3. Volume de $\text{CH}_4$ (le potentiel biochimique méthanogène) :

##### IV. 3.1. Volume de $\text{CH}_4$ de déche ménage:

Le tableau suivant représente les Volume de  $\text{CH}_4$  produit de déche ménage pour les trois digesteurs et le moyenne entre eux :

Jours	$V_{Dg1}$	$V_{Dg2}$	$V_{Dg3}$	$V_{moyen}$
1	811	831	821	821
2	1793	1809	1803	1801,66667
3	1788	1679	1798	1755
4	1799	1822	1809	1810
5	2230	2225	2220	2225
6	2300	2315	2310	2308,33333

7	2110	2130	2120	2120
8	1977	1997	1987	1987
9	2150	2170	2160	2160
10	2551	2571	2561	2561
11	2600	2620	2610	2610
12	2602	2622	2612	2612
13	2610	2630	2620	2620
14	2614	2634	2624	2624
15	2620	2640	2630	2630
16	3150	3170	3160	3160
17	3002	3022	3012	3012
18	3000	3026	3009	3011,66667
19	2980	3020	3000	3000
20	2550	2570	2560	2560
21	2458	2478	2468	2468

Tableau IV.5. Le Volume de CH<sub>4</sub> en fonction de temps de déche ménage.

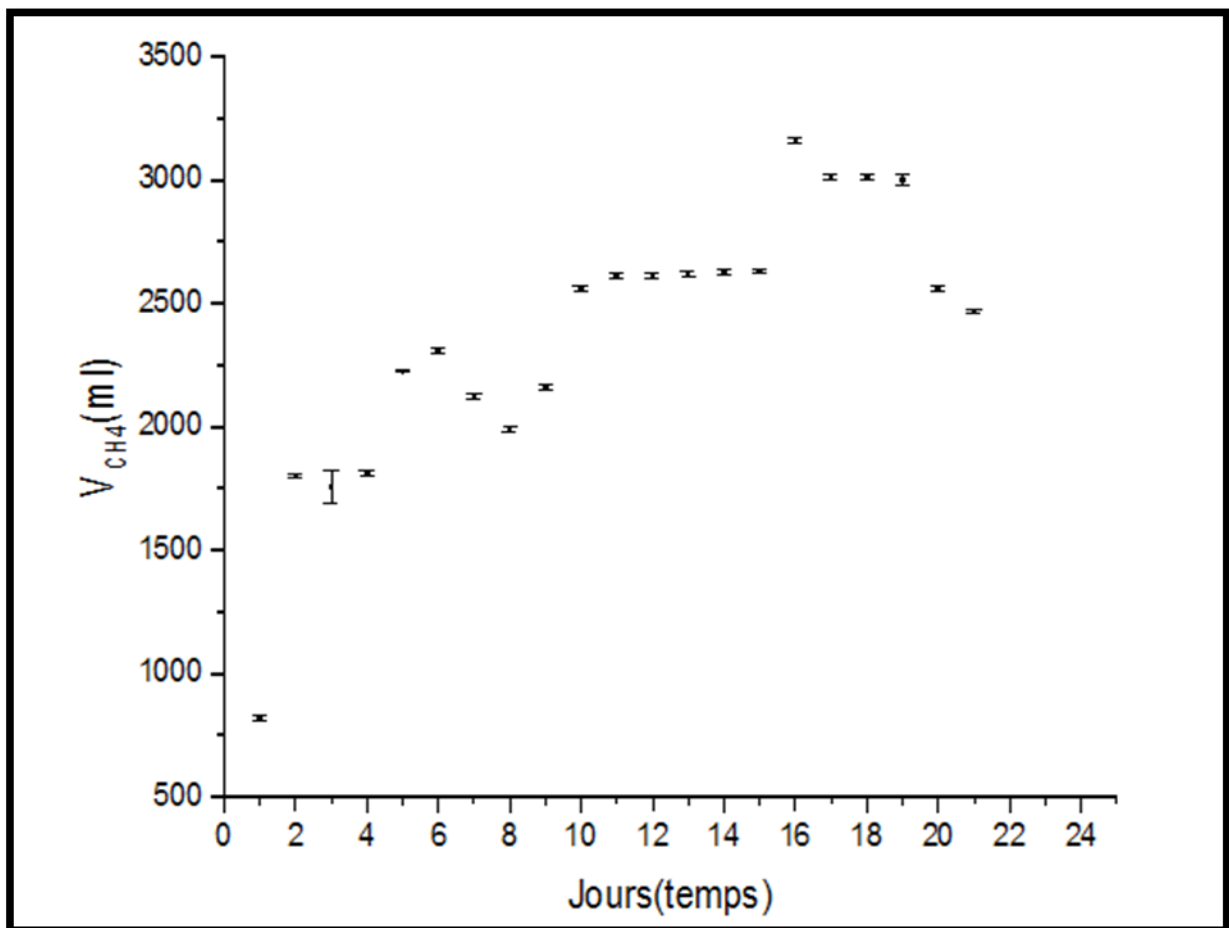


Figure IV.5 : Le Volume de CH<sub>4</sub> en fonction de temps de déche ménage.

A travers la figure, on remarque que le volume de méthane était de [821](#), puis il a commencé à augmenter jusqu'au sixième jour pour atteindre [2308,33](#). On remarque que dans les deux jours

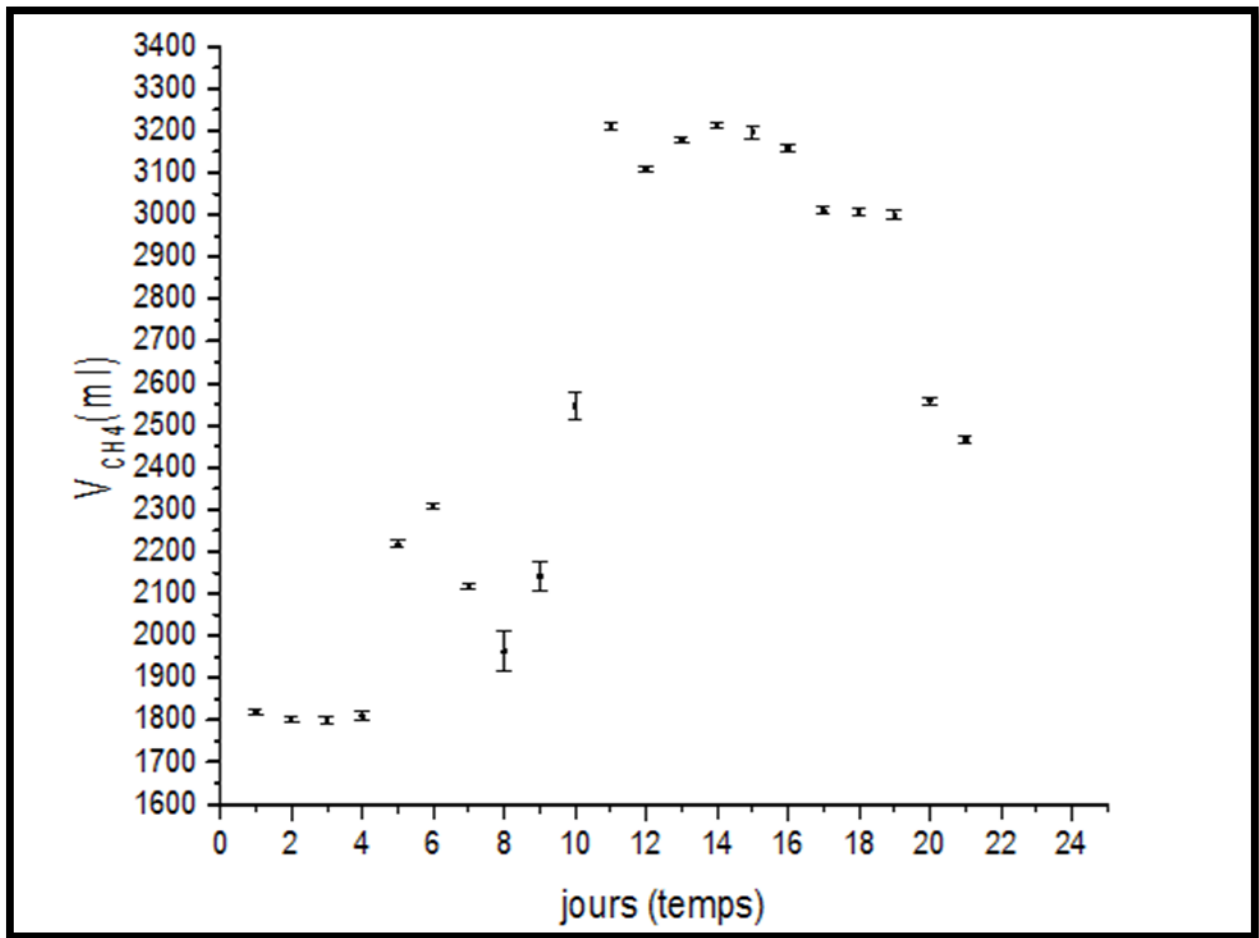
suyvants, le volume de méthane a diminué. À partir du neuvième jour, on constate une augmentation du volume de méthane, qui s'explique par le début de la production de méthane, et la production se poursuit jusqu'au dix-huitième jour. Et puis il commence à diminuer jusqu'à la fin de l'expérience.

#### IV. 3. 2. Volume de CH<sub>4</sub> de déche d'abattoir:

Le tableau suivant représente les volumes de CH<sub>4</sub> produites de déches d'abattoir pour les trois digesteurs et le moyenne entre eux :

Jours	$V_{Dg1}$	$V_{Dg2}$	$V_{Dg3}$	$V_{moyen}$
1	1811	1825	1821	1819
2	1793	1809	1803	1801,66667
3	1790	1809	1798	1799
4	1800	1820	1809	1809,66667
5	2210	2225	2220	2218,33333
6	2300	2315	2310	2308,33333
7	2110	2125	2120	2118,33333
8	1907	1995	1987	1963
9	2100	2165	2160	2141,66667
10	2511	2567	2561	2546,33333
11	3200	3217	3210	3209
12	3100	3115	3108	3107,66667
13	3170	3185	3180	3178,33333
14	3204	3219	3214	3212,33333
15	3180	3211	3200	3197
16	3150	3165	3160	3158,33333
17	3002	3019	3012	3011
18	3000	3015	3009	3008
19	2990	3011	3000	3000,33333
20	2550	2567	2560	2559
21	2458	2474	2468	2466,66667

**Tableau IV.6.** Le Volume de CH<sub>4</sub> en fonction de temps de déche d'abattoir.



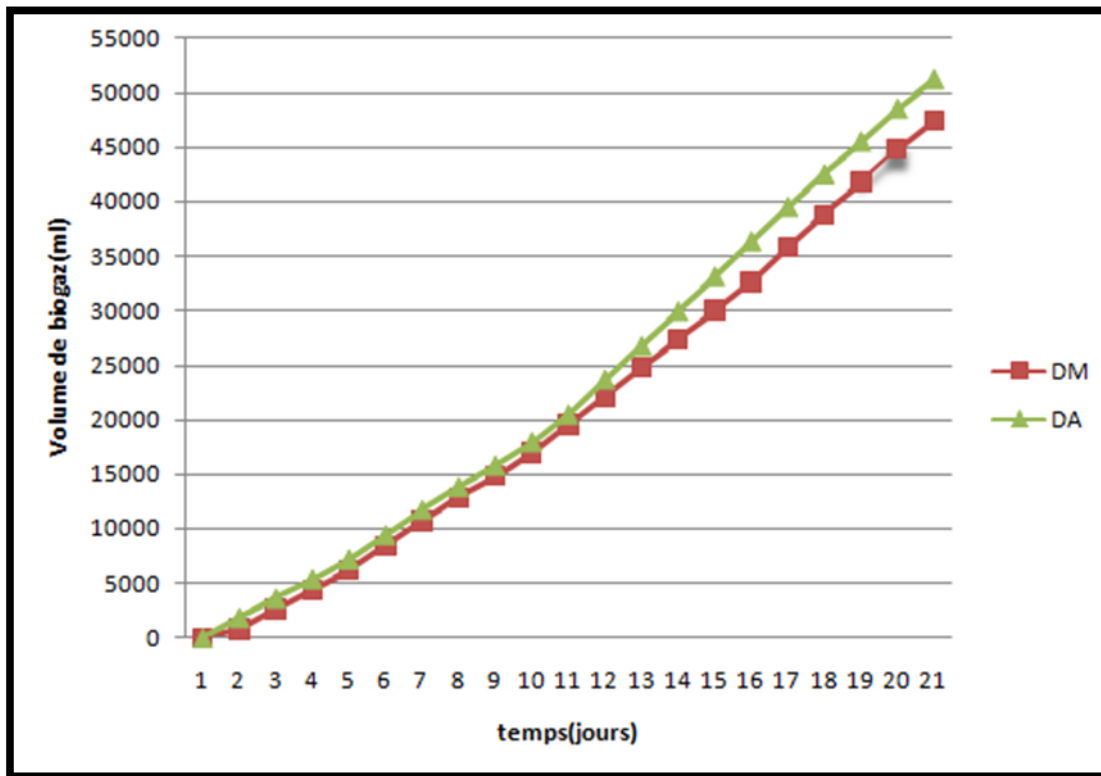
**Figure IV.6** : Le Volume de  $CH_4$  en fonction de temps de déche d'abattoir.

On remarque que le pourcentage de méthane dans les quatre jours est approximativement égal à [1819](#), et après le quatrième jour il commence à augmenter jusqu'au sixième jour, ce qui s'explique par la production d'une proportion de méthane. Après le sixième jour, on constate une diminution du volume de méthane au cours des deux prochains jours (7,8). Une forte production de méthane a été observée du neuvième au onzième jour. Ensuite, i Commence à diminuer jusqu'à la fin de l'expérience.



## IV. 4. Variation de Cumulation:

## IV. 4. 1. Cumulation de volume de biogaz :



**Figure IV.7 :** Variation de volume de biogaz cumulé en fonction de temps.

À travers le graphique ci-dessus, nous remarquons que le pourcentage de biogaz augmente pour deux déchets, et nous remarquons également que la plus grande quantité est produite dans les déchets des abattoirs.

IV.4.2. Variation cumulation de  $\text{CH}_4$  :

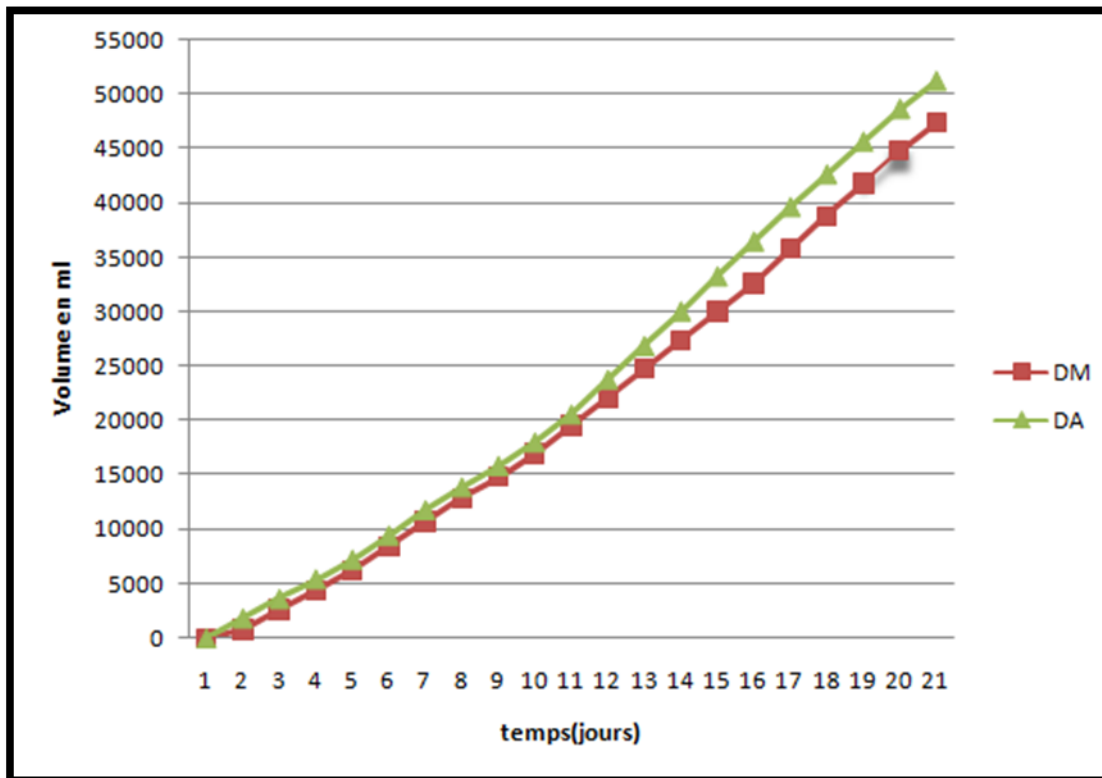


Figure IV.8 : Cumulation de CH<sub>4</sub> en fonction de temps.

À travers le graphique ci-dessus, nous remarquons que le pourcentage de CH<sub>4</sub> augmente pour deux déchets, et nous remarquons également que la plus grande quantité est produite dans les déchets des abattoirs.

**IV.5.Cumulée de volume de biogaz et CH<sub>4</sub> dans chaque déchet :**

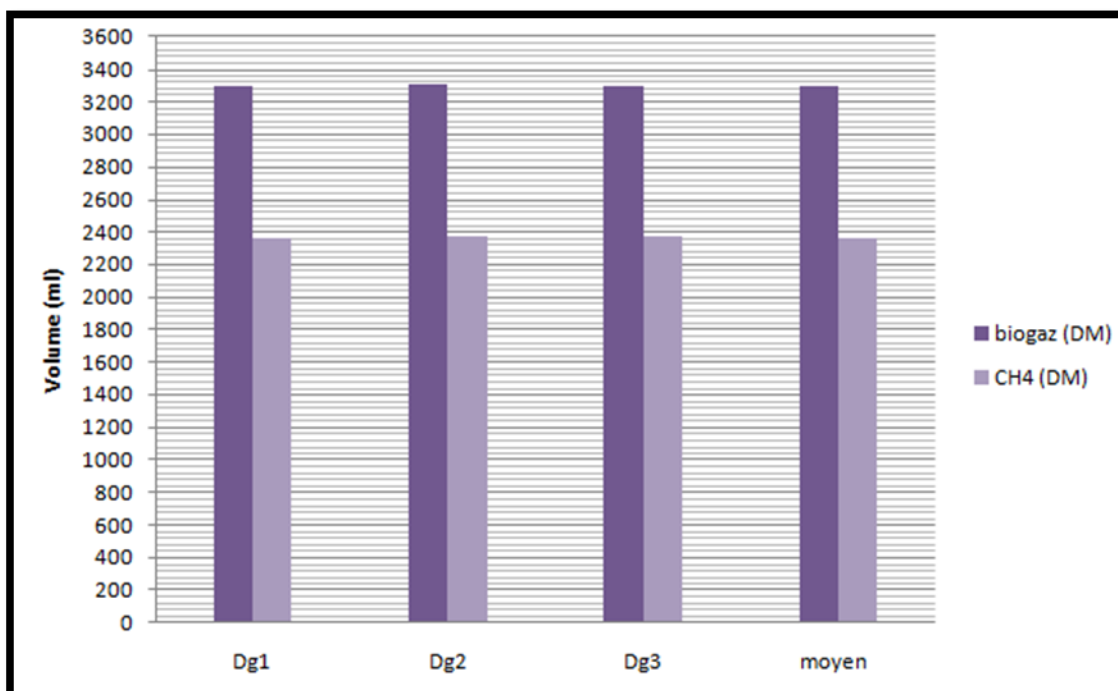


Figure IV.9 : Production cumulée de volume de biogaz et de CH<sub>4</sub> dans déchet ménagé.

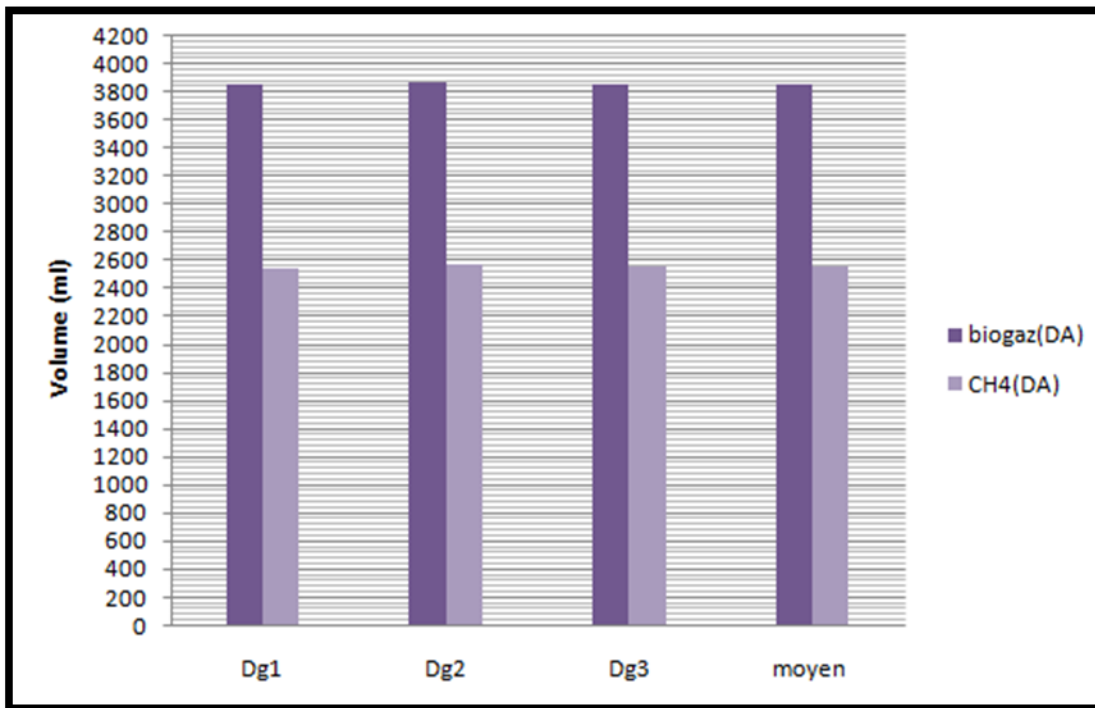


Figure IV.10 : Production cumulée de volume de biogaz et de CH<sub>4</sub> dans déchet battoire.

On remarque à travers les deux chiffres que le taux d'accumulation de biogaz est supérieur au taux d'accumulation de méthane, qui est pour deux déchets.

IV.6.Cumulée de volume de biogaz et CH<sub>4</sub> dans les deux déchets :

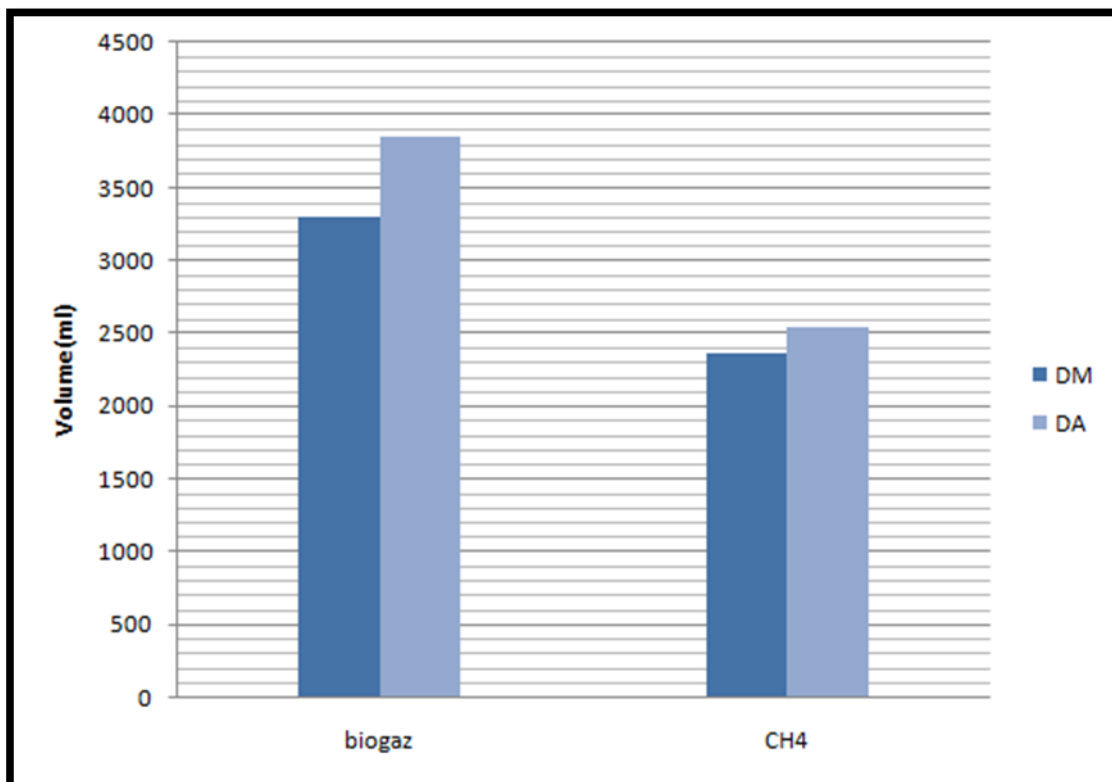
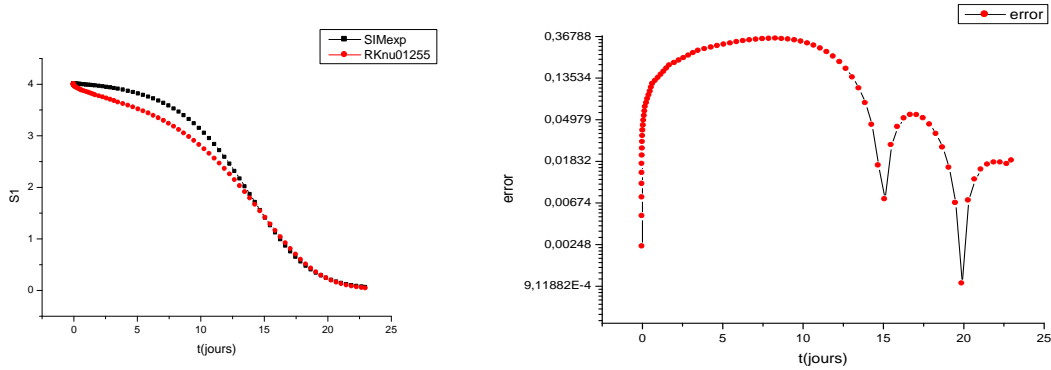


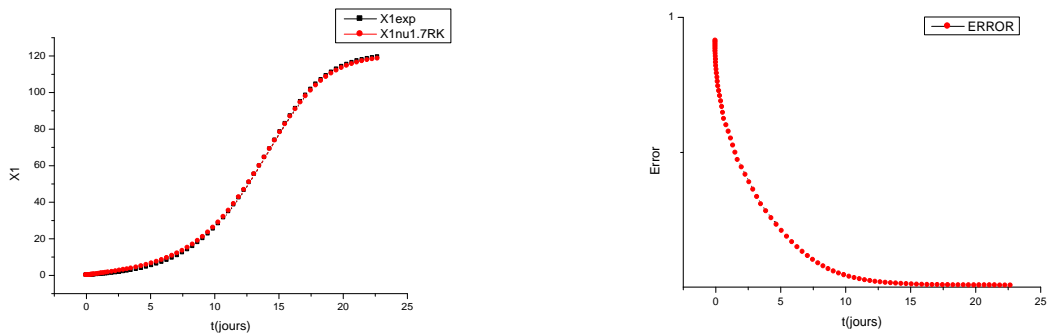
Figure IV.11 : Volume de biogaz et CH<sub>4</sub> en fonction de temps.

A partir de la figure, on remarque que le volume de biogaz et le volume de méthane sont plus importants.

**IV.7: Explication:**

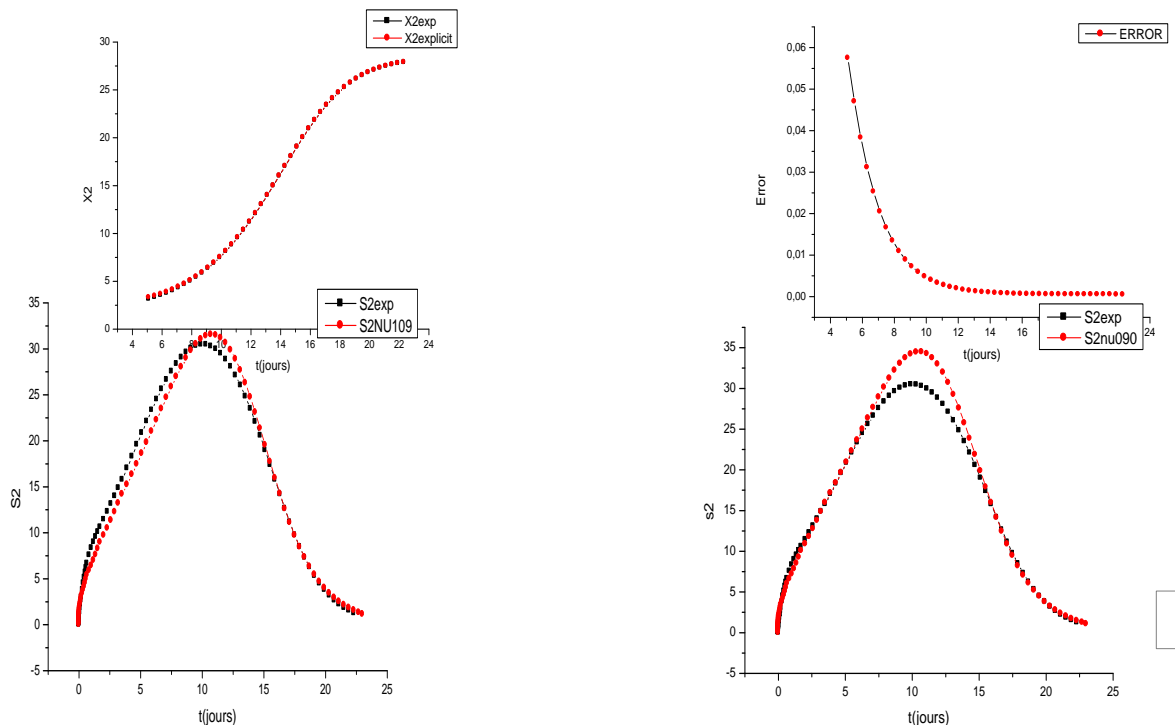


En premier figure le  $S_1$  en diminue à passant des jours, ceci explique les deux méthodes donne le bon résultat de simulation et le dernier courbe confirme cette résultat.

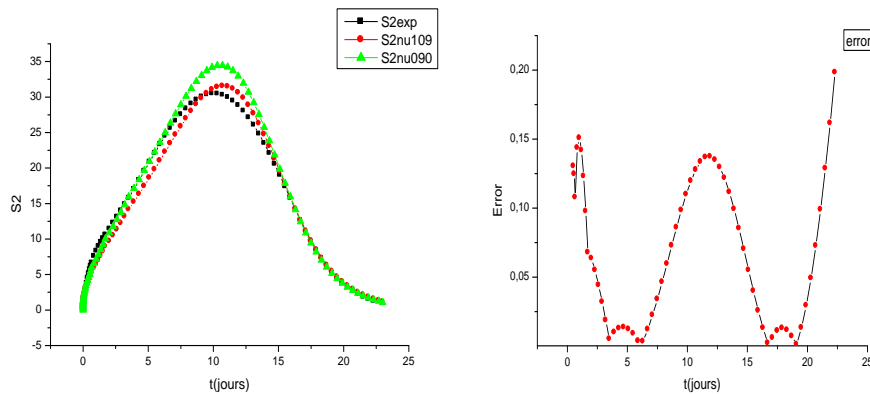


On cette figure les 2 courbes de  $X_1$  en fonction de temps augmente les valeurs de  $X_1$  et en remarque le méthode de Runge- kutta de 7RK d'ordre 6 correspondant avec le méthode de différence finies, et la courbe de erreur explique le cette résultat.

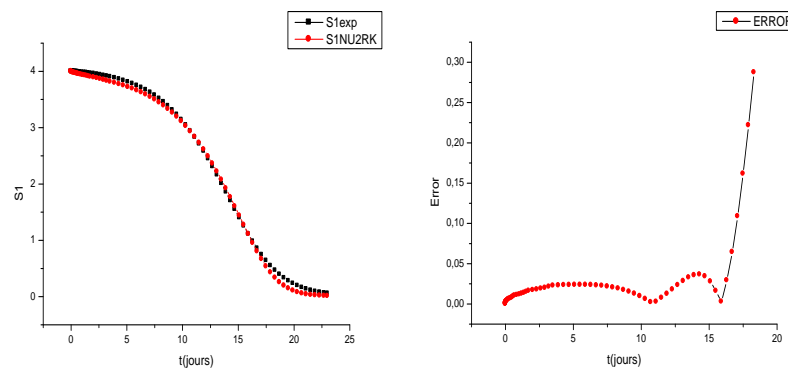
A la ce figure observe le courbe de  $X_1$ exp correspondant avec le courbe de  $X_1$  explicité dans la même méthode.



On cette figure en remarque les différents dans les courbe de méthode de Runge –kutta a cause de échange de ration à grandeur u .ce explique le différent de grandeur u influence sur le resulta de simulation.



En explique cette resulta aux les différents des valeurs de nu et le courbe de l'erreur explicite



bien cet différent .

La courbe de  $S_1$  nu.2RK influence sur la courbe de  $S_1$  exp et le valeur de courbe d'erreur approximativement zéro.

Alors tous les figures expliquent bien les deux méthode approximativement correspondent qui permettent donne le bon resulta de simulation .

# **Conclusion général**

## Conclusion général

---

### Conclusion général

Si l'objectif principale de notre travail était simulation de rendement de méthane des différents déchets organiques, l'objectif principal est de déterminer la relation entre la digestion anaérobie et l'utilisation de Matlab Simulink.

En première partie étude bibliographique on va connaître la définition de valorisation des déchets et définition du digesteur anaérobie, et à la deuxième partie expérimentale comme traitement des déchets en ville d'Adrar par la méthode de digestion anaérobie à l'échelle du laboratoire, en utilisant des digesteurs anaérobies de volume de 12L. Pour cela nous avons rempli notre digesteur continu avec le déchet de la ville d'Adrar et suivi les paramètres tels que le pH, et le volume de biogaz, et de méthane, et les AGV, TAC. Les résultats ont donné au bout de 21 jours le volume de biogaz augmente aussi le volume de CH<sub>4</sub>. Les résultats de simulation nous aident à l'influence des différents paramètres sur le processus en général.

# **Références**

# **Bibliographiques**



## Références Bibliographiques

---

- [1]: M. EL A.Harchaoui, Eude de bio méthanisation des déchets d'abattoir et conurbation expérimentale, mémoire de master, université kasdi merbah Ouargla, 2013.
- [2] M. Djaâfri, .M. Khelifi, S. Kalloum, A. Tahri, K. Kaidi et A. Touzi, Effet del'ensemencement sur la digestion anaérobie des déchets ménagers de la ville d'Adrar Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien /Adrar, 2009
- [3] N. Laskri, O. Hamdaoui et N. Nedjah, Traitement et valorisation des déchets par procédé de digestion anaérobie : production du biogaz, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Africaine Ahmed Draïa, 1961.
- [4] : K. A. Nikita Topanou, Gestion des déchets solides ménagers dans la ville d'Abomey- Calavi (Bénin) : Caractérisation et essais de valorisation par compostage, Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi et Université d'Aix Marseille, 2012.
- [5]: M. Benyoucef, K. Takoura, A. Bayoucef, la méthanisation des déchets organiques de la ville d'Adrar, mémoire de licence, université d'Adrar, 2012-2013.
- [6] : **Suess. M. J., et Huismans. J. w.** ; La gestion des déchets dangereux : Principes directeurs et code de bonne pratique. OMS, Publications régionales Série européenne, N°14. COPENHAGUE.1984.
- [7] : Direction départementale de l'agriculture et de la foret, Les types de déchets et leurs stockage, 11 pages ;2004. [réf. du mars 2017], disponible sur [www.dechetcom.com/comptes/envchristele/types\\_dechets.pdf](http://www.dechetcom.com/comptes/envchristele/types_dechets.pdf)
- [8] : **DDTM 64 - SDREM**, ; Les déchets inertes : Les installations de stockage de déchets inertes ISDI, page3. 1<sup>er</sup> et 2 décembre 2014, [réf. du janvier 2017], disponible sur : [http://www.le64.fr/fileadmin/mediatheque/cg64/documents/environnement/3-b\\_Cadrage\\_r%C3%A9glementaire\\_inertesBD.pdf](http://www.le64.fr/fileadmin/mediatheque/cg64/documents/environnement/3-b_Cadrage_r%C3%A9glementaire_inertesBD.pdf)
- [9]: A. Tahri, „production du biogaz à partir des déchets ménagers de la ville d'Adrar, influencede pH et ensemencement“, mémoire master, université d'Adrar, 2014.
- [10] : L. Biganzoli, L. Gorla, S. Nessi, and M. Grosso, “Volatilisation and oxidation of aluminum scraps fed into incineration furnaces,” *Waste Manag.*, vol. 32, no. 12, pp. 2266–2272, 2012.
- [11] : T. Rouanet, F. Gougeon, J. Fayard, F. Rémy, H. Migaud, and G. Pasquier, “Trochléoplastie de creusement dans l' instabilité fémoropatellaire : une série de 34 cas à 15 ans de recul Sulcus deepening trochleoplasty for patellofemoralinstabilité : A séries of 34 cases,” *Rev. Chir. Orthop. Traumatol.*, vol. 101, no. 4,pp. 282–286, 2015.
- [12] :M. Kasina, M. Kasina, and G. Sciences, “Metallic Elements Occurrences in The Municipal Waste Metallic Elements Occurrences Municipal Waste IncinerationBottom Ash Incineration Bottom Ash Assessing

## Références Bibliographiques

---

the feasibility of using the , heat temperature function for a district heat demand forecast,” *Energy Procedia*, vol. 125, pp. 56–62, 2017.

[13] :C. J. L. Be, R. K. D. Obe, and G. S. Ghataora, “Municipal incinerated bottom ash characteristics and potential for use as aggregate in concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 127, pp. 504–517, 2016.

[14]: Charlotte Rigaud-illustration : Claire Laffargue, „Biogaz : ce qu'il faut savoir“, Systèmes Solaires – Le Journal Des Energies Renouvelables n°179, 2007.

[15]: Ahmed Adoue, „développement durable, traitement des déchets, valorisation, élimination“ professeur de chimie de l'environnement à l'université de Mostaganem, mai 2009.

[16]:Maozhe Chen, "Faisabilité technique et environnementale de l'utilisation dans des matériaux de construction commentaires de centres d'incinération de boues de station d'épuration“, 2012.

[17]: K.Kaidi, „Etude comparative de la digestion anaérobie de différents déchets organiques“, mémoire licence, université d'Adrar, 2013.

[18]:SengaKiesses, „Valorisation énergétique des déchets de bois traités par voies thermochimiques (pyrolyse et hydroliquifaction)“, thèse de doctorat, université Nantes Angers laMans, 2013.

[19] :**Duplessis. J.** ; Le compostage facilité, Guide sur le compostage domestique, NOVA Envirocom.2002.

[20]:**Boulangier. A.** ; Préparation d'un déchet ménager pour l'optimisation du potentiel et de la cinétique méthanogène. Thèse de doctorat. L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement, AgroParisTech, Ecole doctorale ABIES, 316 page.2011.

[21]:**Vanai. P.,** ; Valorisation agronomique d'un compost urbain produit par méthanisation : Etude en milieu tropical, Thèse de doctorat. Centre Universitaire de Polynésie Française, 171 pages.1995.

[22]:**Kalloum .S, Khelafi. M, Djaafri .M, Tahri .A et Touzi .A.** ; Etude de l'influence du pH sur la production du biogaz à partir des déchets ménagers. *Revue des Energies Renouvelables*. Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu, 01000 Adrar Vol. 10 N°4 (2007) 539 – 543, page 540.2007.

[23] :W. Guitoun, Etude sur la bio méthanisation des déchets organiques. Contribution expérimentale, mémoire master académique, université Kasdi-Merbah.Ouargla, 2015.

## Références Bibliographiques

---

- [24] :K. Derbal, digestion anaérobie des déchets solides mélanges avec les boues de station d'épuration, Thèse de Doctorat, université mentouri Constantine.
- [25] :V. K. Vijay, R. Kapoor, A. Trivedi, and P. Narale, "Biogas Upgrading and Bottling Technology for Vehicular and Cooking Applications," *Manag. Nat. Resour. a Chang. Environ.*, vol. 10, pp. 135–153, 2015.
- [26] : Jain, S., Lala, A., K., Bathia, S., K., Kudchadker, A. P. Modeling of hydrolysis controlled anaerobic digestion. *Journal of Chemical Technology and. Biotechnology*, 1992,53, 337-344.
- [27] : Goel, R., Mino, T., Satoh, H., Matsuo, T. Comparison of hydrolytic enzyme systems in pure culture and activated sludge under different electro acceptor conditions. *Water Science and Technology*, 1998, 37 (4/5) : 335-343.
- [28] : Vavilin, V.A., Rytov, S.V. Lokshina, L.Y. A description of hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic matter. *Bioresource Technology*, 1996; 56: 229-237
- [29] :Archer, D.B., Kirsop, B.H. The microbiology and control of anaerobic digestion. In Wheatley *Anaerobic digestion, a waste treatment technology, Critical reports an applied chemistry*. London, Elsevier, 1990, 43-91.
- [30] : Wheatley, A. Anaerobic digestion: A waste water treatment technology. Elsevier *Applied Science*, 1990.
- [31] : Moletta, R. La digestion anaérobie : du plus petit au plus grand. *Bio futur*, janvier, 1993, 16-25.
- [32] : Moletta, R. Procédés biologiques anaérobies. In: *Gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires*. Technique et documentation. Éditions Lavoisier, Paris. 2006, 247-290.
- [33] : A .RAHMANI,H.TAYEBI, Gestion et valorisation énergétique des déchets organiques. mémoire master université d'Adrar 2015-201
- [34]: F. Vedrenne, 'Étude des processus de dégradation anaérobie et de production de méthane au cours du stockage des lisiers'', école nationale supérieure d'agronomie de Rennes, 2007.
- [35]: M. Salvador Rodriguez Susa, "Etude d'un bioréacteur anaérobie à membranes immergées pour le traitement des eaux résiduaires'', thèse de doctorat, Université de Los Andes – Bogotá – Colombie, 21 juillet 2005.
- [36] : **Amarante. L.** ; Bio méthanisation des déchets putrescibles municipaux- technologies disponibles et enjeux pour le Québec, page 80, Sherbrooke, Québec, CANADA.2010.
- [37] : **Ostrem. K.**; Greening Waste: Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes. Mémoires de maîtrise, Columbia Université, New York.2004.

## Références Bibliographiques

---

- [38]: L.E. Marache, „La méthanisation des effluents et déchets organiques : état des connaissances sur le devenir pathogène“, thèse de doctorat, université Paul-Sabatier de Toulouse, France, 2001.
- [39] :Maintenance des digesteurs à biogaz, Maroc, M. Jlaïdi, A. Amahrouch, 1995.
- [40] :A. Dahou, «la production de biogaz à partir de lagunage de la wilaya d'Adrar » université Kasdi Merbah, Ouargla, 2010.
- [41] :M. R. Hamed, A. Tsolakis, and C. S. Lau, “Biogas upgrading for on-board hydrogen production : Reforming process CFD modeling,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 24, pp. 12532–12540, 2014.
- [42]: I. Boutouta, “valorisation énergétique des déchets solides urbains de la ville de Blida”, mémoire master, université Saad Dahleb de Blida, 2011-2012.
- [43]: A. Mottet, „Recherche d'indicateurs de biodégradabilité anaérobie et modélisation de la digestion anaérobie thermophile : application aux boues secondaires d'épuration non traitées et prétraitées thermiquement“, thèse de doctorat, université Montpellier, 2009.
- [44]: K. Effibi, „Lagunage anaérobie : modélisation combinant la décantation primaire et la dégradation anaérobie, Thèse de doctorat, université de Liège Campus d'ARLON, mars 2009.
- [45] :Y. Chen, B. Rößler, S. Zielonka, A. Lemmer, A. Wonneberger, and T. Jungbluth, “The pressure effects on two-phase anaerobic digestion,” *Appl. Energy*, vol. 116, pp. 409–415, 2014.
- [46]: R. Moletta “ la méthanisation :La digestion anaérobie des déchets municipaux” rédaction 2003.
- [47]: A. Saidi, B. Abada, „La bio-méthanisation : une solution pour un développement durable“, revue des énergies renouvelables, CER'07 Oujda, 2007.
- [48]: R. Moletta “ la méthanisation :Technologies du traitement des effluents par méthanisation”rédaction 2002.
- [49] : J.L. Bal, B. Chabot, «Les énergies renouvelables : État de l'art et perspectives de développement», 2001.
- [50] : N. Laskri, O. Hamdaoui, N. Nedjah, « Traitement et valorisation des déchets par procédé de digestion anaérobie : production du biogaz », Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda (23 – 26 23), 2007

## Références Bibliographiques

---

- [51] : Claire CHOTTIER « Composés Organiques Volatils du Silicium et sulfure d'hydrogène Analyse – Traitement – Impact sur la valorisation des biogaz » Thèse de doctorat , Ecole doctorale de Chimie de Lyon , Année 2011 .
- [52] : RECORD 2003 «Méthanisation des déchets organiques» Etude bibliographique, 194p, n°01- 0408/1A.
- [53] : Kashyap D.R., Dadhich K.S., Sharma S.K. «Biomethanation under psychrophilic conditions: a review » *Bioresource Technology* 87, 147-153,2003 .
- [54] : Bouallagui H, Ben Cheikh R, Marouani L., Hamdi M« Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester » *Bioresource Technology* 86, 85-89, 2003.
- [55] : Youssef ABARGHAZ « Promotion des techniques d'assainissement écologique a des fins de valorisation eaux usées – Das du projet pilote du Douar Dayet Dfrah »Thèse de doctorat ,université Mohamed V-AGDAL , Juin 2013
- [56]: A. El-Kerbi, S. Kahlaoui, „digestion anaérobie des déchets de matière organique“,mémoire de licence, université d'Adrar, juin 2011.
- [57] :H. Li, S. Zou, C. Li, and Y. Jin, “Alkaline post-treatment for improved sludge an aerobic digestion,” *Bioresour. Technol.*, vol. 140, pp. 187–191, 2013.
- [58] : «OCDE / AIE De la 1ère à la 2ème génération de technologies des biocarburants, aperçu de l'industrie actuelle et des activités de RD&D», 2008
- [59] :Ahring B.K." Status on science and application of hemophilic anaerobic Digestion". *Water Science & Technologie* 30, No 12, 241-249,1994
- [60] :Bertan de la farge «le biogaz procédés de fermentation méthaniques» Masson, Paris, 1995.
- [61]: L. Angélique, „bio méthanisation“, rapport, université de Liège, 2011.
- [62]: „la méthanisation à la ferme“, guide pratique, ADEM (agence de l'environnement et de lamaitrise de l'énergie), septembre 2011.
- [63]: A. Mottet, „recherche anaérobie des déchets solides ménagers avec les boues de stationsd'épuration“, thèse de doctorat, université Mentousi, Constantine, 2010.
- [64] : S. Porselvam, N. Soundara Vishal, S. V. Srinivasan, “Enhanced biogas yield by thermo-alkalisolubilization followed by co-digestion of intestine waste from slaughterhouse with food waste, "Biotech, vol. 7, (5), , pp. 1–10,2017

# **ANNEXES**

<i>Paramètres</i>	<i>Définitions</i>	<i>Unités</i>
$\alpha$	pourcentage de la biomasse dans la phase liquide	$mmol.L^{-1}$
C	concentration totale en carbone inorganique.	$mmol.L^{-1}$
Cin	concentration entrante en carbone inorganique.	$jours^{-1}$ .
D	taux de dilution.	$g.g^{-1}$ de biomasse acidogène
k1	rendement de la dégradation du substrat.	$mmol.g^{-1}$ de biomasse acidogène
k2	rendement de production des AGV.	$mmol.g^{-1}$ de biomasse méthanogène
k3	rendement de dégradation des AGV.	$mmol.L^{-1}.atm^{-1}$
k4	rendement de production de CO <sub>2</sub>	$L.jours^{-1}.L^{-1}$ , de réacteur
k5	rendement de production de CH <sub>4</sub>	$mmol.L^{-1}$
k6	constante de Henry.	$g.L^{-1}$
KH	coefficient de transfert volumique gaz/liquide.	$g.L^{-1}$
kLa	constante d'inhibition.	$g.L^{-1}$
KI2		$mmol.L^{-1}$
KS1	constante de demi-saturation.	$atm$
KS2	constante de demi-saturation.	$atm$
PC	pression partielle de CO <sub>2</sub>	
PT	pression totale.	
qC	débit volumique de CO <sub>2</sub> .	$mmol.jours^{-1}.L^{-1}$ de réacteur
qM	débit volumique de CH <sub>4</sub> .	$mmol.jours^{-1}.L^{-1}$ de réacteur
S1	concentration en substrat dans le réacteur.	$g.L^{-1}$
S1in	concentration entrante en substrat.	$g.L^{-1}$
S2	concentration en AGV dans le réacteur.	$mmol.L^{-1}$
S2in	concentration entrante en AGV.	$g.L^{-1}$
X1	concentration de la population acidogène.	$g.L^{-1}$
X2	concentration de la population méthanogène.	$g.L^{-1}$
Z	alcalinité total dans le réacteur.	$g.L^{-1}$
Zin	alcalinité entrante dans le réacteur.	$mmol.L^{-1}$
$\mu_1$	taux de croissance de la population acidogène	$mmol.L^{-1}$ .
$\mu_{1max}$	taux de croissance maximal de la population acidogène.	$jours^{-1}$
$\mu_2$	taux de croissance de la population méthanogène	$jours^{-1}$
$\mu_{2max}$	taux de croissance maximal de la population méthanogène.	$jours^{-1}$
Kb	constante d'acidité des bicarbonates.	$jours^{-1}$