

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE d'ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER CHIMIE DE L'ENVIRONNEMENT

Thème

Effet du traitement chimique et aérobie sur le rendement de PBM (Potentiel Biochimique Méthanogène) des déchets organiques du restaurant universitaire

Soutenu le : 23/05/2017

Présenté Par :

Melle. Ferdjellah Kelthoum

Melle. Omari Oum Kelthoum

Président:

Mme. Gaffour Hafida

Encadreur :

Dr. Slimane Kalloum

Co-encadreur :

Mr. Kamel Kaidi

Examineur:

Mr. Arroussi Abd Elaaziz

Année Universitaire 2016/2017

Remerciements :

*Nous exprimons d'abord mes profonds remerciements à mon **DIEU** qui
mes donné le courage et la volonté d'achever ce travail.*

*Nous souhaitons remercier notre encadreur **Dr S.Kalloum**, maître de
conférences à l'université d'Adrar, pour sa patience, ses précieux conseils, le
suivi et l'orientation dont nous avons pu bénéficier.*

*Mes profonds remerciements à **Mr K.KAIDI** et **Mr A. Tahri**, pour nous
avoir donné l'occasion d'accéder à l'espace de la recherche scientifique
pendant l'une des périodes le plus dures de notre formation. et d'avoir accepté
de juger notre travail.*

*Mes sentiments de reconnaissance vont également à **Mme H. Gaffour**,
maître de conférences à l'université d'Adrar, d'avoir accepté de juger ce
modeste travail d'assurer la présidence du jury.*

*Nous remercîments aussi aux **Mr A. Arroussi** maîtres de conférences à
l'université d'Adrar, qui mes font l'honneur d'accepter d'examiner notre travail.*

*Et remercîment vont également a **Mr A. BENSAID**, qu'il nous a donné
ses conseils et qui ont contribué au succès de ce travail.*

*Mes remercîment s'adressant aussi à **Mr. JALLOUL** et toute l'équipe du
laboratoire de la division de la biomasse au sein de l'unité.*

*Les remerciements ne seraient rien sans une mention particulière à
l'ensemble de nos professeurs et nos amis à l'Université Ahmed Draia d'Adrar.
Mes sentiments de reconnaissance et mes remerciements vont également à
l'encontre de toute personne qui a participé de près ou de loin directement ou
indirectement à la réalisation de ce travail*



Dédicace

Allah le bénéfique soit loué et qu'il nous guide sur la bonne voie

Ma lumière de mes yeux

Ma mère

Mon père

Mes frères: Cheikh, Mohammed, Boubakeur, et Zakaria

Mes sœurs: Fatima, Naima

Mes oncles, tantes, cousins, cousines

Tout ma famille : Ferdjellah et Zaid.

A mes chères amies

Tous mes enseignants

« Je réitère la bénédiction de DIEU pour continuer la mission qui M'a été confié

».





Je dédie ce mémoire à :

Mes parents :

Ma mère, qui œuvre pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes frères : Mohammed, Khalil, Ishak, Abd Elmalek.

Mes sœurs : Fatima, Naima, Aicha, Rahma.

*Aux petits enfants : Sadjia, Iman, Sarah, Najla, Meryem et Ahmed
Mes professeurs de département de science de la technologie qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.*

*A mes meilleurs amis : Djamila, Arbia, Kelthoum, Fatima, Razika,
Khadidja, Amina et Meryem*

Et en fin à ma famille: Omari, Bahmi, Boujamaaoui et Karimi

Résumé :

Les bioénergies sont au cœur de l'actualité internationale, la digestion anaérobie est l'une des solutions rentables couramment utilisée pour la production d'une énergie renouvelables est verte qui est le biogaz. Dans ce travail l'intérêt est porté sur l'étude de ce processus de la digestion anaérobie de la fraction organique des déchets ménagers du restaurant universitaire en particulier le suivit de potentiel Hydrogène (pH), qu'il est responsable de la stabilité des digesteurs ainsi que certain paramètres tels que le volume de biogaz produit, et le volume du méthane (potentiel biochimique méthanogène).

L'objectif principal de notre étude expérimentale est d'avoir l'effet de la durée d'aération et le traitement chimique sur l'efficacité de la digestion anaérobie particulièrement sur la production du méthane (CH₄).

L'expérience a été réalisée dans des bioréacteurs type batch d'une capacité de 01 litre avec un volume utile de 800 ml. Les digesteurs ont été opérés à la température mésophile (37°C) pendant une durée de 43 jours.

Les résultats obtenus ont montré que le digesteur d1 à une production considérable en volume du biogaz (601,55ml) comparée au digesteur d2 (496,2 ml) et très importante par rapport au digesteur d4 (256,8ml), avec une quantité en méthane de 423,43 ml, 282,26 ml et 205,7ml pour les digesteurs d1, d2 et d3 respectivement.

Les résultats obtenus dans ce travail montrent clairement que la meilleure durée de traitement chimique du substrat par NaOH (0.1N) donne un grand volume de biogaz qui contient dans le digesteur d1 (une journée de traitement). L'inflammabilité n'a été observé qu'à partir du 11^{ème} jour du lancement de l'expérience pour tous les digesteurs.

التلخيص :

في ظل سياسة التنمية المستدامة المتبعة في أغلبية دول العالم، تعتبر عملية التخمر واحدة من الحلول الفعالة المستعملة حالياً لإنتاج الطاقات المتجددة من بينها الغاز الحيوي. في هذه الدراسة يتم التركيز على دراسة عملية التخمر للككتلة العضوية للنفايات الصلبة للمطعم الجامعي، بحيث تقوم بتتبع درجة الحموضة المسؤولة عن استقرار عملية الهضم داخل المفاعل الحيوي. وبعض العوامل الأخرى مثل حجم الغاز الحيوي المنتج وحجم غاز الميثان. الهدف الرئيسي من الدراسة التجريبية هو معرفة مدى تأثير المعالجة الكيميائية الهوائية على فعالية عملية التخمر وبشكل خاص على كمية غاز الميثان المنتجة وكذا إعطاء قيمة طاقوية للنفايات العضوية للمطعم الجامعي. تم إجراء التجربة في مفاعلات حيوية محكمة الإغلاق بسعة 1 لتر (الحجم المستعمل 800 مل) موضوعة في حمام مائي (37 درجة مئوية) في فترة زمنية لم تتعدى 43 يوم. وأظهرت النتائج التي تحصلنا عليها :

- أن المفاعل الحيوي d1 يحتوي على كمية كبيرة من الغاز الحيوي (601.55مل) مقارنة بالمفاعلات الأخرى d2(496.2مل) و d4(256.8مل)، مع إنتاج كمية معتبرة من غاز الميثان 423.43 مل ، 282.26مل و 205.7مل بالنسبة للمفاعلات d1، d2، و d4 على التوالي ;
- أن أفضل فترة للمعالجة الكيميائية، بواسطة هيدروكسيد الصوديوم ، والتي تعطي أكبر كمية من الغاز الحيوي المنتجة في المفاعل d1 ;
- أن هناك قابلية لاشتعال الغاز المنتج منذ اليوم الحادي عشر.

SOMMAIRE

Liste des abréviations.....	I
Liste des figures.....	II
Liste des photos.....	III
Liste des tableaux.....	IV
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Analyse bibliographique	
I.1 : Introduction.....	3
I.2 : les principaux types de déchets.....	3
I.2.1: D’après leur origine.....	3
I.2.1.1: Les ménagers et assimilés.....	3
I.2.1.2 : Les déchets industrie.....	3
I.2.1.2.1: Les déchets industriels banals.....	3
I.2.1.2.2 : Les déchets industriels dangereux.....	4
I.2.2 : D’après leur nature.....	4
I.2.2.1: Déchets dangereux.....	4
I.2.2.2: Déchets inertes.....	4
I.2.2.3: Déchets ultimes.....	4
I.3: Déchets ménagers.....	5
I.3.1: Définition.....	5
I.3.2: La composition des déchets ménagers.....	5
I.3.3: Les modes d’élimination et de traitement des déchets ménagers.....	5
I.3.3.1: La mise en décharge.....	6
I.3.3.2: Le recyclage.....	6
I.3.3.3: Traitement thermique.....	6
I.3.3.3.1: L’incinération.....	6
I.3.3.3.2: Pyrolyse.....	7
I.3.3.3.3: Gazéification.....	8

I.3.3.4: Le traitement biologique	9
------------------------------------------------	----------

CHAPITRE II : Caractérisation de la mise en œuvre de la méthanisation

II.1: Introduction	10
II.2: Définition de la méthanisation	10
II.3: Historique de la méthanisation	11
II.4: Mise en œuvre de la méthanisation	12
II.5 : Les étapes de la méthanisation	13
II.5.1: Hydrolyse	14
II.5.2: L'acidogénèse	15
II.5.3: L'acétogénèse	15
II.5.3: La méthanogénèse	15
II.6: Les différents paramètres influençant la méthanisation	16
II.6.1: pH	16
II.6.2: La température	16
II.6.3: L'absence d'oxygène	17
II.6.4: Rapport C/N	18
II.6.5: Brassage	18
II.6.6: Pression partielle en hydrogène	19
II.6.7: Humidité	19
II.6.8: L'absence des inhibiteurs	19
II.6.9: Temps de rétention hydraulique	21
II.7: Les digesteurs	23
II.7.1: Définition	23
II.7.2: Classifications des différents types de digesteurs	24
II.7.2.1: Mode de l'alimentation	24
II.7.2.1.1: Les digesteurs discontinus	24
II.7.2.1.2: Les digesteurs continus	25
II.7.2.2: Classification selon le type du substrat	27
II.7.2.3: Classification selon le nombre d'étapes	27
II.8: Les avantages et les inconvénients de la digestion anaérobie	29
II.9: Conclusion	30

CHAPITRE III : Le biogaz

III.1: Introduction.....	31
III.2: Biogaz.....	31
III.2.1: Définition et Composition.....	31
III.2.2: Historique.....	32
III.2.3: Ressources de biogaz.....	33
III.2.4: Valeur énergétique.....	33
III.2.5: Purification du biogaz.....	34
III.2.6: Valorisation de biogaz.....	35
III.2.6.1: Valorisation thermique en chaudière.....	36
III.2.6.2: Valorisation électrique du biogaz.....	36
III.2.6.3: Valorisation en carburant automobile.....	36
III.2.6.4: Valorisation par injection dans le réseau de gaz de ville.....	37
III.3: Substrat.....	37
III.3.1: Les effluents d'élevage.....	37
III.3.2: Les eaux usées urbains.....	38
III.3.3: Les déchets agro-alimentaires.....	38
III.3.4: Les ordures ménagères.....	38
III.7: Conclusion.....	38

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV.1: Lieu de stage.....	40
IV.2: Organigramme de l'établissement.....	40
IV.3: Substrat utilisé.....	41
IV.4: Description du digesteur.....	41
IV.5: Mode d'opérateur.....	42
IV.6: Conditions de digestion.....	43
IV.7: Méthodes d'analyses.....	43
IV.7.1: Détermination de la matière sèche (MS).....	43
IV.7.2: Détermination de la teneur en matière organique (MO).....	44
IV.8: Les paramètres suivis.....	45
IV.8.1: paramètres de fonctionnement.....	46
IV.8.1.1: pH.....	46

IV.8.1.2: Volume de biogaz produit (totale)	46
IV.8.1.3: Volume de CH ₄ (le potentiel biochimique méthanogène)	47
IV.8.1.4: Dosage du titre alcalimétrique complet (TAC) et des acides gras volatils (AGV)	48
IV.8.2: Paramètres d'épuration.....	49
IV.8.2.1: Détermination de la DCO (totale et soluble)	49

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1: Caractérisation des substrats.....	53
V.2: Variation du pH.....	54
V.3: Production de volume du biogaz (totale)	55
V.4: Production de volume de CH ₄	56
V.5: L'inflammabilité du biogaz.....	56
Conclusion générale.....	58
Références.....	59

Liste des abréviations

ADEM: Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie

AGV : Acides Gras Volatiles

BMP : Biochemical methane Potentiel (en Anglais)

C/N : Rapport Carbone / Azote

DCO_T : La Demande Chimique en Oxygène Totale

DCO_S : La Demande Chimique en Oxygène Soluble

LCFA: Long Chain Fatty Acid (en Anglais)

MS : Matière Sèche

MO : Matière Organique

OHPA : des Organismes Acétogènes Producteurs obligés d'hydrogène

PBM : Potentiel Biochimie Méthanogène

PCI : Pouvoir Calorifique Inferieur

pH : le potentiel Hydrogène

TAC : Titre Alcalimétrique Complet

TRH : Temps de Réention Hydraulique

URER-MS : Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien

Liste des figures

Chapitre I	
Figure I.1: Recyclage des déchets organique.....	6
Figure I.2: Les différentes étapes d'incinération.....	7
Figure I.3: Principe de la Pyrolyse.....	8
Figure I.4: Principe de l'étagement réactionnel en gazéification.....	9
Chapitre II	
Figure II.1: Une vue générale d'un type de digesteur chinois produisant du biogaz.....	12
Figure II.2: Les principales étapes de la méthanisation.....	13
Figure II.3: Flux métabolique de la digestion anaérobie.....	14
Figure II.4: Différentes formes de digesteurs.....	23
Figure II.5: Représente un exemple de digesteur discontinu développé par le centr internationale de l'énergie et de l'hydraulique(burkina faso).....	25
Figure II.6: une installation de bio-digesteur type chinois.....	26
Figure II.7 : principe d'un réacteur homogène et exemple d'une installation	27
Figure II.8: Exemple de schéma de principe du digesteur à cellules (fermentation discontinue).....	28
Figure II.9: 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.....	29
Chapitre III	
Figure III.1: Equivalences énergétiques de 1 m ³ de méthane.....	34
Chapitre IV	
Figure IV.1: L'organigramme de l'URER_MS.....	40
Chapitre V	
Figure V.1: Variation du pH au cours du temps.....	54
Figure V.2: Les volumes de production du biogaz au cours du temps.....	55
Figure V.3: Productivité de CH ₄ au cours du temps.....	56

Liste des photos

Chapitre IV

Photo IV.1 : Substrats utilisés (broyées).....	41
Photo IV.2 : Photo et schéma du digesteur au niveau de laboratoire.....	42
Photo IV.3 : Les réacteurs dans un bain marie chauffé et régulé à 37°C (milieu aérobie).....	42
Photo IV.4 : Les réacteurs dans un bain marie chauffé et régulé à 37°C.....	43
Photo IV.5 : L'étuve utilisée.....	44
Photo IV.6 : Le four a moufle utilisé.....	45
Photo IV.7 : pH-mètre.....	46
Photo IV.8 : Photo et schéma de dispositif de la mesure de volume du biogaz produit.....	47
Photo IV.9 : Photo de dispositif de mesure du volume de méthane produit.....	48
Photo IV.10 : La centrifugation.....	50
Photo IV.11 : L'homogénéisation.....	51
Photo IV.12 : Photo du thermo-réacteur.....	51

Chapitre V

Photo V.1 : Test d'inflammabilité du biogaz produit.....	57
-----------------------------------------------------------------	-----------

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1: Comparaison de la digestion en condition thermophile et mésophile.....	17
Tableau II.2 : Effet de l'oxygène sur les différentes phases de la digestion anaérobie.....	18
Tableau II.3: Début de production de biogaz.....	19
Tableau II.4 : Concentration en ions provenant la stimulation ou l'inhibition de la méthanisation.....	21
Tableau II.5: Temps de rétention concernant le lagunage anaérobie.....	22
Tableau II.6: Différents exemples de TRH suivant le procédé de digestion.....	23

Chapitre III

Tableau III.1: Principaux composés autres que CH ₄ présents dans le biogaz et leurs effets.....	32
Tableau III.2: Les composés et leurs techniques d'élimination.....	35

Chapitre V

Tableau V.1 : Les caractéristiques initiales des substrats.....	53
------------------------------------------------------------------------	-----------



Introduction générale



INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières décennies, la gestion des déchets municipaux en Algérie est considérée comme une action prioritaire du ministère chargé de l'environnement. Pour cela, un ensemble de textes ont été adoptés. De fortes pressions sur l'environnement ont été enregistrées et la production de déchets ne cesse d'augmenter suite à l'accroissement de la population et à la croissance économique. Les quantités de déchets pourraient dépasser les 30 millions de tonnes en 2050 si aucune politique de prévention n'est mise en œuvre.[1] Cette situation se caractérise par une dégradation de plus en plus d'hygiène et de salubrité publique malgré la volonté et les grands efforts déployée par l'état.

La production des déchets et leurs accumulations est un problème majeur, en raison de leurs caractères polluants. Plusieurs filières existent pour le traitement de la valorisation de ces déchets. Parmi ces filières de traitement pour éliminer cette problématique, citons la digestion anaérobie ou méthanisation qui présente de nombreux intérêts environnementaux, économiques, sociaux et énergétiques, qui en résulte un produit qui est le biogaz.

Le biogaz issu de la méthanisation est valorisé depuis plusieurs décennies. En effet, cette filière de conversion retrouve un certain dynamisme du fait que les politiques de lutte contre le changement climatique s'appuient de plus en plus sur une intensification de la substitution des énergies renouvelable. De ce fait, la production, la récupération et la valorisation du biogaz, avec les déchets organique, sont appelées à jouer un rôle de premier plan.

De plus, la pollution liée à la dissémination des déchets organiques provenant des industries agro-alimentaire ou des collectivités (boues de station d'épuration, déchets verts), constitue une nuisance environnementale à prendre en charge pour la sauvegarde durable de l'environnement. De ce fait, le recours à la digestion anaérobie pour le traitement de ces déchets semble être une solution judicieuse. Par ailleurs, l'application d'un tel procédé de bioconversion offre la possibilité de traiter des déchets et de produire une énergie verte et renouvelable qui est le biogaz. Ce dernier est riche en méthane (CH_4) qui possède un pouvoir énergétique élevé et peut être utilisé dans de nombreuses applications (chauffage, cuisson), électricité (éclairage) et biocarburant. [1]

L'objectif de notre étude expérimentale pour voir une idée sur l'efficacité de l'effet du traitement chimique et le traitement aérobie sur la digestion anaérobie particulièrement sur la production du méthane (CH_4).

Pour mener à bien notre travail, nous avons opté pour un plan comporte cinq chapitres suivants :

- Une introduction générale de ce travail.
 - Un premier chapitre relatif à la synthèse bibliographique, sur les différents types des déchets et les différents modes de traitement des déchets ménagers.
 - un deuxième chapitre consiste à définir la méthanisation puis une historique de sa mise en ouvre est présenté. De plus une explication des différentes étapes de la digestion anaérobie à savoir l'hydrolyse, l'acidogène, l'acétogène et finalement la méthanogène est réalisée, avec en plus les populations bactériennes qui sont mise en jeu. De même, les principaux paramètres qui peuvent influencer le phénomène de la digestion anaérobie ainsi que les paramètres qui peuvent le contrôler sont présentés. Par ailleurs, les conditions physico-chimiques nécessaires au bon déroulement de ce processus sont énumérées avec la citation des avantages et des inconvénients de ce système de traitement.
 - Le troisième chapitre représente le biogaz, nous commençons par un historique de sa mise en ouvre est présenté. Une définition et sa composition, leurs différent ressources, sa valeur énergétique, leurs purifications et différents types de valorisation. Ainsi que les substrats essentiels utilisés pour un traitement de digestion anaérobie. Puis, on parle sur l'évaluation du potentiel méthanogène selon les caractéristiques chimiques ceux-ci visent à estimer de manière théorique la production de biogaz à partir de la masse de matière organique supposée biodégradable et d'un potentiel de génération de biogaz (ou de méthane).
 - Le quatrième chapitre est consacré aux matériels utilisés dans la partie expérimentale et les différentes techniques et les méthodes employées pour le suivi opérationnel des digesteurs.
 - Le dernier chapitre nous présentons et discutons les différents résultats obtenues.
- Enfin, ce mémoire sera achevé par une conclusion générale.



CHAPITRE I

Analyse bibliographique



Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1. Introduction

Les déchets sont définis par le projet de loi relatif à leur gestion et à leur élimination comme : tous résidus d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ou a l'obligation de s'en défaire dans le but de ne pas nuire à la collectivité et de protéger l'environnement.[2]

I.2. les principaux types 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 banals

Ils sont constitués des :

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

I.2.1.2.2. Les déchets industriels dangereux

Ils sont constitués des déchets organiques, des déchets minéraux liquides ou solides.

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 règles strictes. On distingue les [2] :

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

I.2.2. D'après leur nature

I.2.2.1. Déchets dangereux

Il s'agit de déchets qui, par leur nature, sont hautement polluants et susceptible de présenter un danger pour l'homme et/ou l'environnement. Ils nécessitent un traitement particulier et sécurisé, et répondent à la réglementation en vigueur, en raison de leur toxicité. [2]

I.2.2.2. Déchets inertes

Un déchet inerte est un déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique important. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles elles entrent en contact d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. [1]

I.2.2.3. Déchets ultimes

Ils sont les déchets résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. Ce sont des déchets qui ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique importante. [2]

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 habitat (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, épiluchures 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...].[3]

I.3.3. 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)]. [3]

I.3.3.1. 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. [4]

I.3.3.2. Le recyclage

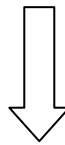
Le recyclage est la réintroduction directe d'un déchet dans le cycle de production dont il est issu, en remplacement totale ou partiel d'une matière première neuve. Par exemple, prendre une bouteille cassée, les refondre, et en faire des bouteilles neuves. [1]

Recyclage

Idée de sélection et de réparation

Pour une nouvelle production de

Qualité voisine



-rechapage des pneus

-régénération des huiles

-papier, verre,

-métaux...

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

I.3.3.3. Traitement thermique

I.3.3.3.1 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. [5]

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 solides minéraux (figure I.2). [5]

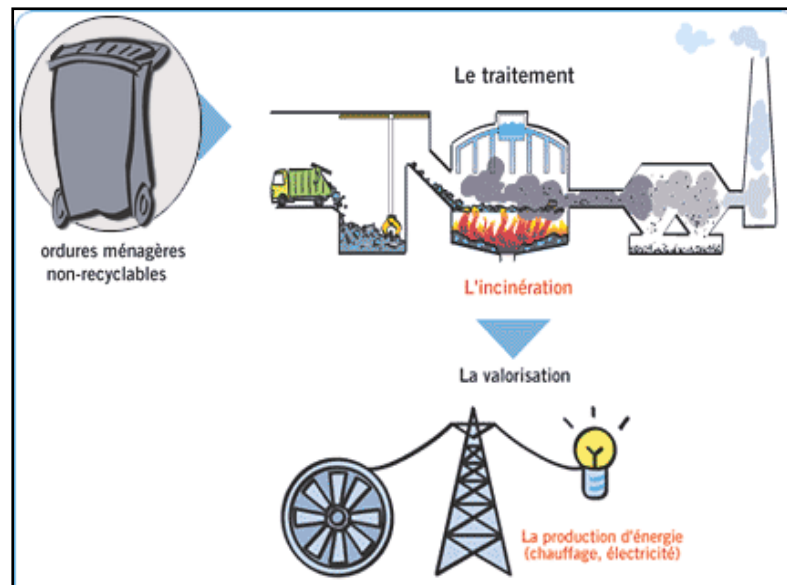


Figure I.2 : Les différentes étapes d'incinération. [6]

I.3.3.3.2 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. [6]

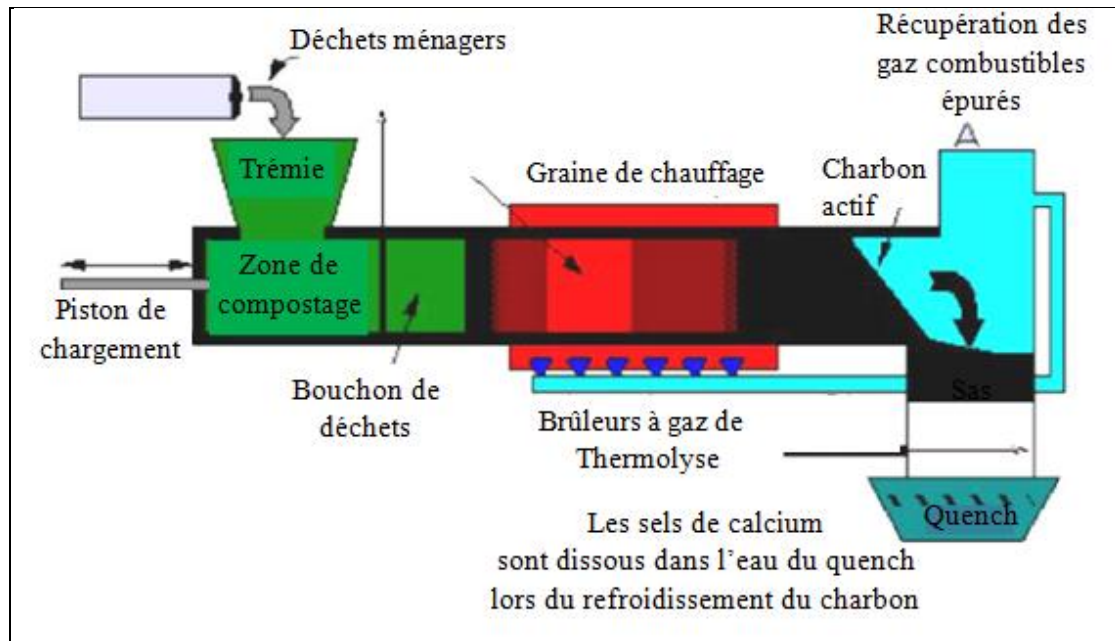


Figure I.3 : Principe de la Pyrolyse. [6]

I.3.3.3 Gazéification

La gazéification est une réaction thermochimique qui suit la pyrolyse, elle consiste à la transformation d'un combustible solide en un combustible gazeux (CO_2 , H_2 , CH_4 ...). Après épuration, 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. [6]

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. [7]

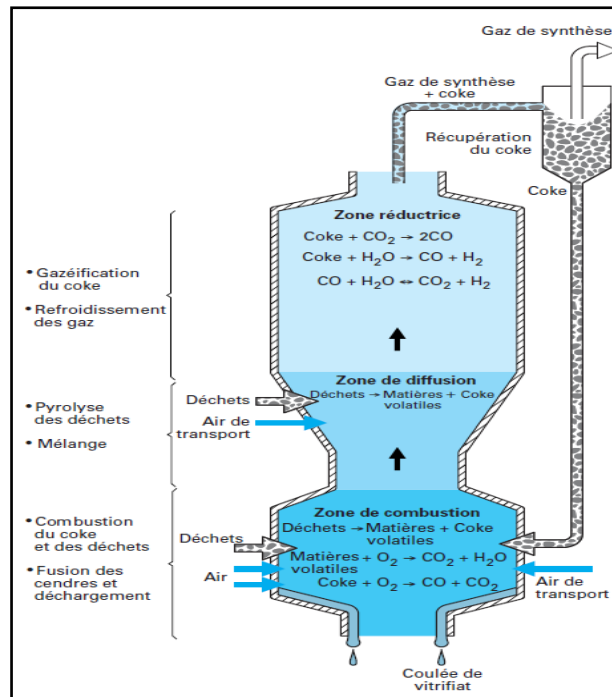


Figure I.4 : Principe de l'étagement réactionnel en gazéification. [6]

I.3.3.4. Le traitement biologique

Le traitement biologique utilise des micro-organismes vivants pour décomposer des déchets organiques, 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,...

[2]



CHAPITRE II

Caractérisation de la mise en œuvre de la méthanisation



Chapitre II : Caractérisation de la mise en œuvre de la méthanisation**II.1 Introduction**

Les pays industrialisés se préoccupent chaque jour un peu plus de l'environnement. D'où la recherche de moyens de production d'une énergie renouvelable et propre, de procédés de recyclage des déchets, mais aussi la volonté de trouver une solution permettant de juguler la pollution liée aux effluents des élevages intensifs. Parmi les différentes solutions envisagées, la méthanisation est fréquemment citée. La digestion anaérobie est, en effet souvent présentée comme une solution miraculeuse, Elle serait capable d'apporter une réponse à une très grande partie des problèmes posés par les effluents organiques, comme, par exemple, la nuisance olfactive et la pollution, en réduisant la charge organique. [8]

La méthanisation est une fermentation qui se déroule en anaérobiose, c'est-à-dire hors de toute présence d'air. L'un des processus de fermentation anaérobie, celui qui nous intéresse, est la fermentation qui aboutit à la formation d'un biogaz combustible, composé d'un mélange de gaz carbonique (CO₂) et de méthane inflammable (CH₄). [1]

II.2 Définition de la méthanisation

La méthanisation est un processus naturel, Elle est l'une des voies de dégradation des matières organique, qu'elles soient d'origine animale ou végétale. [1] Le principe de la méthanisation repose sur la dégradation de matières organiques en l'absence d'oxygène (digestion anaérobie) et a l'abri de la lumière par l'action combinée de plusieurs communautés de micro-organismes. C'est une technique qui conduit à la production d'un mélange gazeux appelé biogaz, source d'énergie renouvelable, dont le gaz principale est le méthane(CH₄) et d'un digestat utilisé comme fertilisant. [6]

La production de biogaz s'effectue dans l'environnement de façon naturelle (exemple : le gaz de marais-lieu de décomposition de matière végétales et animales ou l'on peut observer la formation des bulles à la surface de l'eau). Les bactéries qui réalisent ces réactions se trouvent à l'état naturel dans le lisier et dans les écosystèmes anaérobies ; elles se développent naturellement dans un milieu sans oxygène. Ainsi, tous les déchets organiques, à l'exception des déchets ligneux (déchets de bois), peuvent être traités par méthanisation, et notamment les déchets et effluents liquides. [6]

Matiere organique → CH₄ + CO₂

Equation 1

II.3. 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 carbonatrum », 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. [1]

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 III.1) ont été longtemps employées pour traiter les déchets animaux et agricoles dans le but principal de récupérer l'énergie pour faire cuire et allumer. [9]

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 anaérobie 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 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. [1]

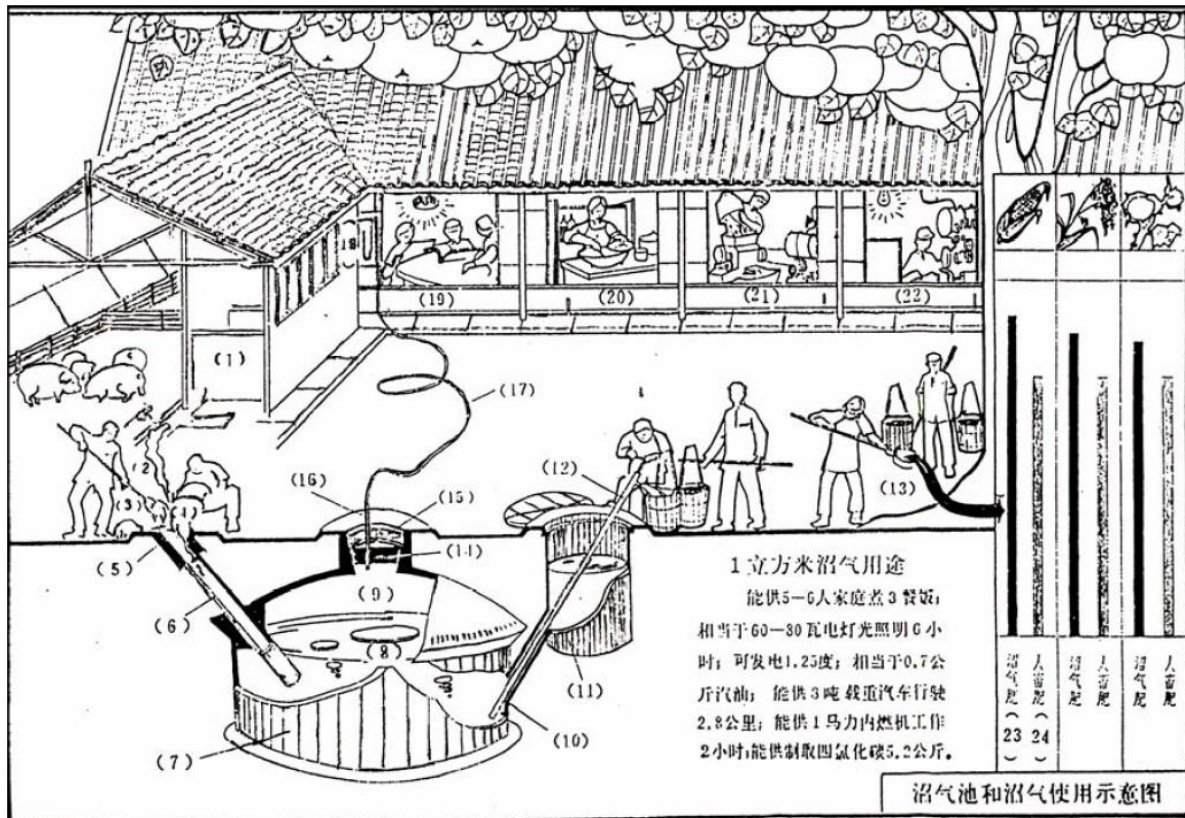


Figure II.1: Une vue générale d'un type de digesteur chinois produisant du biogaz pour faire cuire et s'allumer. L'image originale a été éditée dans le journal (Biogas in China) par National office for Biogas Development and Extension, Peoples Republic of China. [9]

II.4. 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". [10]

II.5. Les Etapes de la méthanisation

Le processus de biodégradation anaérobie de la matière organique se déroule en quatre étapes biochimiques peuvent être représentés par les figures III.1 et III.2.

Trois différentes familles de microorganismes sont les principales responsables de la transformation depuis des polymères organiques complexes, jusqu'au méthane, l'eau et le dioxyde de carbone.

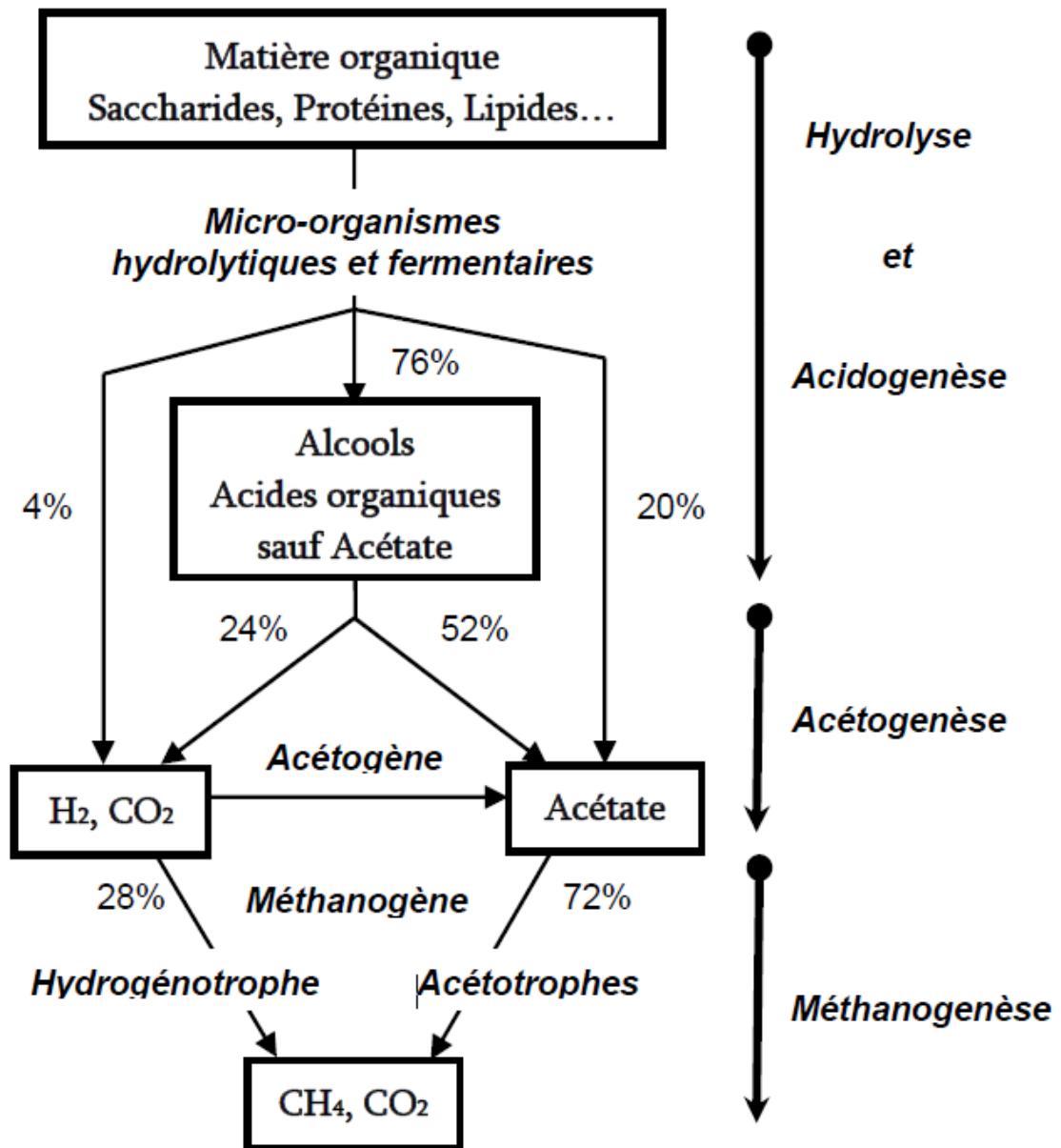


Figure II.2: les principales étapes de la méthanisation. [11]

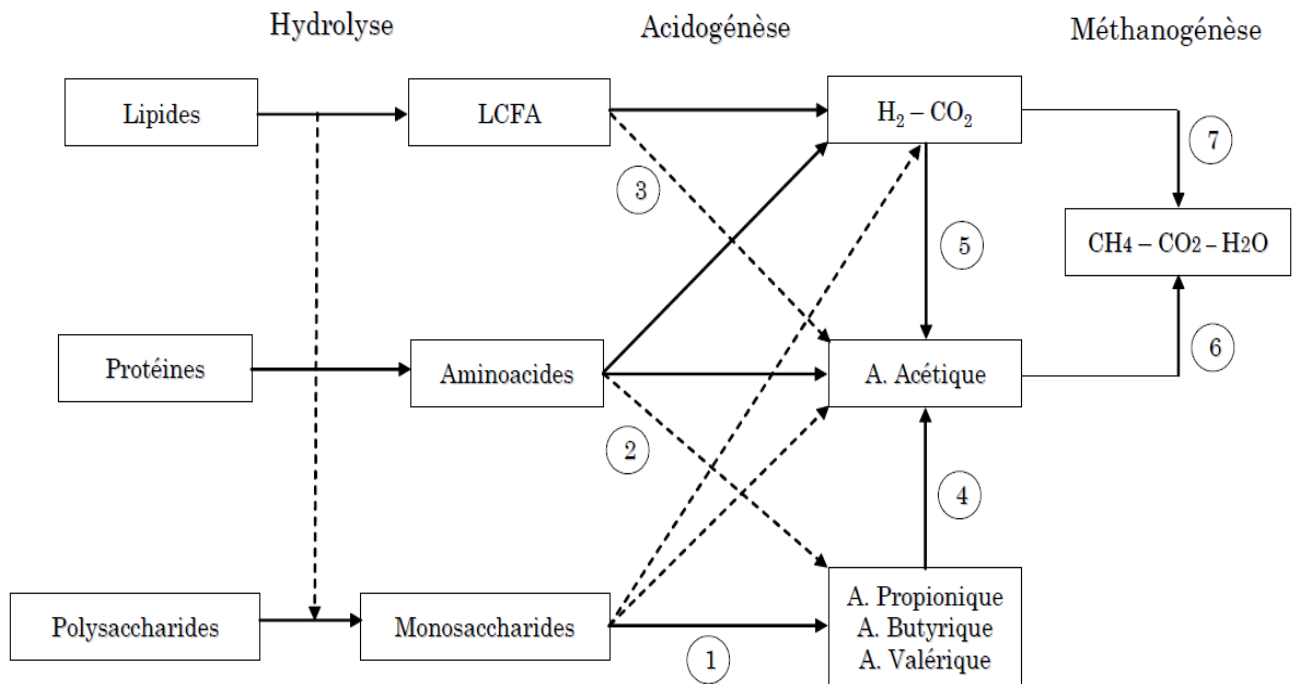


Figure II.3: Flux métabolique de la digestion anaérobie. [12]

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

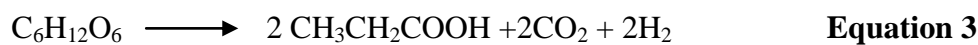
II.5.1. L'hydrolyse

La phase d'hydrolyse est la première étape de la digestion anaérobie, pendant laquelle la plupart des macromolécules complexes sont transformées en composés plus simples (monomères). Les lipides sont transformés en acides gras et en glycérol ou en autres alcools, les polysaccharides en acides, en aldéhydes et en alcools, après un stade intermédiaire en

monosaccharides et glucides, pendant que les protéines sont transformées en acide acétique et azote ammoniacal après un stade intermédiaire comme aminoacides. [12]

II.5.2. L'acidogénèse

Ensuite vient l'étape d'acidogénèse, pendant laquelle la plupart des composés organiques simples et des monomères organiques sont transformés en acides gras volatiles (A. Acétique, A. Propionique, A. Butyrique. A. Valérique), avec dans certains cas, une production d'hydrogène (Equation 1 et Equation 2).



Les organismes responsables de ces deux premières étapes de transformation sont les bactéries acidogènes et fermentaires comme *Clostridium sp* et *Bacillus sp*. [12]

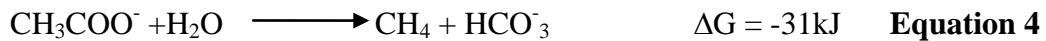
II.5.3. L'acétogénèse

La phase suivante correspond à l'acétogénèse où les acides gras volatils, et les substances de petite taille moléculaire, comme quelques alcools et aldéhydes, sont transformés en acide acétique (ou acétate) par des organismes acétogènes producteurs obligés d'hydrogène (OHPA) et des bactéries *homoacétogènes*. Il est alors possible d'avoir aussi un procédé d'oxydation de l'acétate jusqu'à H_2 et CO_2 par des bactéries spécifiques. Les *Syntrobacter sp* et les *Syntrophomonas sp* sont quelques organismes responsables de ces réactions. [12]

II.5.4. La méthanogénèse

Finalement à partir de l'acétate (ou de l'acide acétique) ou de l'hydrogène et du CO_2 , les organismes méthanogènes *acétoclastes* et les méthanogènes *hydrogénophiles* (microorganismes du type *Archaea*) produisent le méthane. Parmi les organismes qui ont ce type de métabolisme, on peut citer *Méthanosarcina*, *Méthanothrix* et *Méthanosaepta*. [12]

- Les méthanogènes *acétotrophes* convertissent l'acétate en dioxyde de carbone et en méthane. La décarboxylation de l'acétate fait intervenir deux réactions couplées, dont le bilan d'enthalpie libre rend thermodynamiquement possible la production de méthane. (L'équation 4) présente ce bilan. [12]



- Les méthanogènes *hydrogénotrophes* réduisent le dioxyde de carbone, les carbonates et les bicarbonates avec le dihydrogène pour former du méthane et de l'eau (Equation5). [9]



II.6. Les paramètres influençant la méthanisation

La digestion anaérobie doit se dérouler dans des conditions environnementales maîtrisées. Un certain nombre de paramètres doivent faire l'objet d'un suivi régulier pour s'assurer du bon fonctionnement du procédé.

II.6.1. 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 à 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. [6]

II.6.2. La température

La température influence les taux de croissance des espèces microbiennes de la digestion anaérobie. Or les réactions liées à ce processus sont athermiques. Il est donc indispensable d'apporter une source de chaleur extérieure pour pouvoir atteindre les conditions optimales de température. [13]

Les différents groupes bactériens responsables des étapes successives de méthanisation ont des températures optimales de fonctionnement différentes. On distingue trois niveaux de température pour le fonctionnement des méthaniseurs :

- **Psychrophile à basse température 5°C à 25°C [6] [13]:** utilisée normalement dans les méthaniseurs fonctionnant à la température ambiante. Cette technique exige des

longs temps de rétention, c'est la raison pour laquelle elle n'est plus utilisée en Europe. [6]

- **Mésophile à moyen température 25°C à 38°C [6] [25] [13]:** la plupart des digesteurs anaérobies européens opèrent dans cette gamme de température. [6]
- **Thermophile à haute température au dessus de 50°C jusqu'à 70°C [6] [25] [13] :** cette technique est moins utilisée en raison des besoins énergétiques importants pour maintenir la température dans le méthaniseur. Toutefois, il peut arriver que ce procédé soit utilisé en complément du procédé mésophile, puisque les matières organiques prioritairement dégradées ne sont pas nécessairement les mêmes dans les deux processus. [6]

Les avantages d'un régime thermophile par rapport à un régime mésophile sont une réduction du temps de séjour du procédé, une destruction des microorganismes pathogènes, une augmentation de la solubilité et de l'accessibilité des substrats. Les inconvénients sont une dépense énergétique importante pour le maintien de la température à 55°C, un potentiel d'instabilité plus élevé avec notamment un risque d'inhibition par l'ammoniac plus important. [13]

Tableau II.1: comparaison de la digestion en condition thermophile et mésophile. [13]

Critère	Digestion mésophile	Digestion thermophile
Charge organique	Faible	élevée
Destruction des pathogènes	Faible	élevée
Sensibilité aux composés toxiques	Faible	élevée
Sensibilité aux changements de T°	inférieure	supérieure
Vitesse réactionnelle	inférieures	supérieures
Coûts opérationnels	Faible	élevés
Maintien de la température	Moyenne difficile	difficile

II.6.3. 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. [8]

Tableau II.2: Effet de l’oxygène sur les différentes phases de la digestion anaérobie. [8]

Hydrolyse	Acidogénèse	Acétogénèse	méthanogénèse
- bactéries anaérobies strictes et facultatives ; - Type Escherichi, streptococcus, clostridium.	- bactéries anaérobies strictes et facultatives ; -type clostridium principalement.	- bactéries anaérobies strictes ; - type syntrobacter, syntrophys ou syntro-phomonas.	-bactéries anaérobies strictes, groupes des archae ; -type méthano-bactériales, méthano-coccales, méthano-microbiales

II.6.4. Rapport C/N

Le carbone et l’azote sont des éléments essentiels à la nutrition des microorganismes, ainsi que le phosphore et le soufre. Le carbone est primordial pour les bactéries en tant que source d’énergie et l’azote autant qu’élément de structure cellulaire. 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 et d’autres substrats celluloses. [14] Pour un fonctionnement optimum d’un réacteur à chargement continu, les bactéries ont besoin d’un rapport C/N convenable pour leur métabolisme le rapport C/N idéal est de 30. [8]

En effet les bactéries ont besoin de trente fois plus de carbone que d’azote. Si ce rapport n’est pas maintenu on observe un défaut de croissance des bactéries ou bien une accumulation des nutriments est donc un changement des caractéristiques biochimiques du milieu. Un rapport C/N adéquat est donc important pour avoir un bon fonctionnement de la digestion anaérobie. [8]

II.6.5. 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. [8] 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. [14]

II.6.6. 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'acidogénèse (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_2 au fur et à mesure de sa production. [13]

II.6.7. Humidité

Pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable surtout à la multiplication des microorganismes, d'après **Marache**, [8] une humidité minimale de 60 à 70% est nécessaire à la méthanisation.

De sa part **Laskri et al.** [15] a pu montrer que le taux de dilution est un facteur favorisant; une augmentation du taux de dilution mène à une augmentation importante du volume du biogaz produit.

Tableau II.3: Début de production du biogaz [15]

Taux de dilution (%)	90%	80%	60%	40%
Début de production de biogaz (j)	40	40	67	113

II.6.8. 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 : [16]

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 [1]

b- Ammoniaque :

D'après **Hansen et al.** Et **Chen et al.** [13] 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 micro-organismes méthanogènes. [14]

D'après **Anderson et al.**, [13] l'ammoniaque libre a été reconnu plus toxique que l'ion ammonium (CH_4^+). En générale, les taux d'ammoniac 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**, [13] 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. [9]

d- Métaux lourds :

Certains d'entre eux sont toxiques pour les organismes anaérobies, même à de faibles concentrations. **Mosey et al.**, [13] 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. [16]

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 [8]

Tableau II.4: Concentrations en ions provenant la stimulation ou l'inhibition de la Méthanisation. [8]

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

II.6.9. Temps de rétention hydraulique (TRH) :

C'est le temps de séjour moyen du substrat dans le réacteur. [14] C'est-à-dire le rapport du volume utile du fermenteur sur le débit volumique du substrat. [8] 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. [17]

Tableau II.5: Temps de rétention concernant le lagunage anaérobie. [17]

Temps de rétention (j)	Remarques
2 à 5	Réduction du DBO ₅ escompté de 60 à 70%
5	Réduction du DBO ₅ escompté de 70%
0.5	Le minimum pour le dimensionnement en Afrique du sud.
5 à 30	-Critères du Texas. Avec une réduction de DBO ₅ espérée de plus de 50%.
10	-valeur minimale à Montana. Avec une réduction de DBO ₅ espérée de 70%.
5 à 10	-critère d'Iowa. Avec une réduction de DBO ₅ escomptée à 60%.
5	- critère du Nebraska. Avec une réduction de DBO ₅ escomptée à 75%.
3 à 5	
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	-En été.
5	- En hiver.
1 à 5	-pour une température de plus de 20°C : un jour, réduction de DBO ₅ espérée 50%. 2.5 jour, réduction de DBO ₅ espérée 60%. un jour, réduction de DBO ₅ espérée 50%. 5 jours, réduction de DBO ₅ espérée 70%. - Au-delà la réduction de DBO ₅ 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 anaérobie. Ces micro-organismes ont des vitesses de croissance différentes. [16]

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. [14]

Tableau II.6: différents exemples de TRH suivant le procédé de digestions [8]

Procédé	TRH
Réacteurs homogènes conventionnels	10 à 40 j minimum
Digesteurs infiniment mélangés	10 à 20 j
Réacteurs de seconde génération : contact anaérobie	6 à 8 j
Réacteurs à cellules fixées	1 à 4 j suivant le substrat

II.7. Les digesteurs

II.7.1. définition

Le digesteur, cœur où se réalise la méthanisation, et aussi appelé fermenteur ou bioréacteur anaérobie. Il est une simple cuve fermée, étanche et isolé thermiquement, dans laquelle 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. [16]

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. [16]

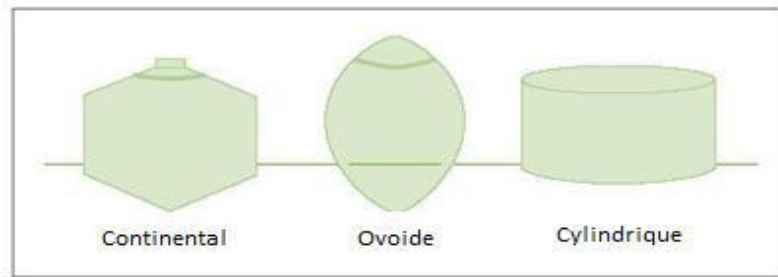


Figure II.4 : Différentes formes de digesteurs. [16]

II.7.2. Classifications des différents types de digesteurs

II.7.2.1. 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.7.2.1.1. les digesteurs discontinus

La cuve de fermentation est chargée, dans les réacteurs discontinus, en une seule fois, avant la fermentation et est déchargée, comme celle-ci est finie. Les substrats peuvent être immergés ou non. Une préfermentation aérobie est effectuée pendant quelques jours, afin de dégrader les molécules peu polymérisées, qui peuvent acidifier le milieu. C'est un procédé utilisé, surtout, pour un substrat tel que des fumées pailleuses ou des ordures ménagères. [8]

a. Des exemples de réacteurs discontinus

➤ Le procédé de Ducellier-Isman

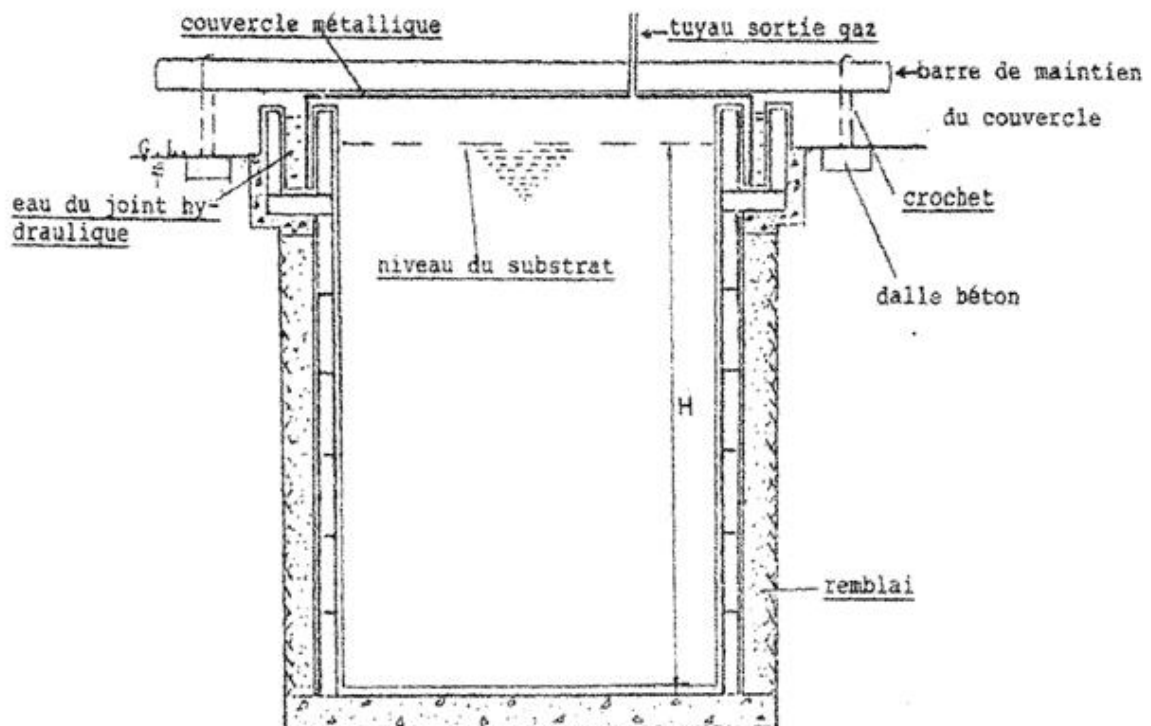
Ce digesteur est composé d'une cuve de 10 à 50 m³ avec une cloche servant de gazomètre au-dessus. L'étanchéité est assurée par l'eau qui sert de joints gazeux. La présence d'eau entre le couvercle et le corps de la cuve forme un joint hydraulique, empêchant le gaz s'échapper. [8]

Une étape initiale de fermentation aérobie de 4 à 7 jours est nécessaire pour faire monter la température et éviter l'acidification du milieu. La fermentation aérobie produit du biogaz pendant deux mois avec une moyenne de 0.17 m³/jour. [8]

Ce procédé a été amélioré, pour la méthanisation des résidus d'élevage, avec une préfermentation aérobie de 2 jours par insufflation d'air. Le démarrage s'effectue grâce au mélange du substrat à fermenter et d'une partie de celui de la cuve précédente. La productivité monte à des niveaux de 0.8 à 0.9 m³/jour. [8]

➤ Les réacteurs non immergés avec recirculation des liquides

C'est une amélioration du procédé **Ducellier-Isman**. Cette amélioration est obtenue par un arrosage séquentiel de la masse en fermentation (voir la figure III.3) qui représente un exemple de digesteur discontinu développé par le centre internationale de l'énergie et de l'hydraulique(burkina faso). [8]



FigureII.5: représente un exemple de digesteur discontinu développé par le centre internationale de l'énergie et de l'hydraulique(burkina faso). [8]

II.7.2.1.2. Les digesteurs continus

Les réacteurs continus sont réalimentés quotidiennement avec une quantité spécifique de substrat. Cette introduction est accompagnée par la vidange d'un volume égale d'effluent. Ce procédé réclame des conditions de fonctionnement plus précis que pour les réacteurs discontinus. Il faut une alimentation régulière, un contrôle de pH, de la température et un brassage, si nécessaire. [8]

a. Exemples de digesteur continus

➤ Les réacteurs de type chinois

Les réacteurs de type chinois sont essentiellement sphériques et sont alimentés, au moins une fois par jour. Ils sont d'un volume de 6 à 8 m³. Leur productivité est de 0.15 à 0.3 m³/jour.

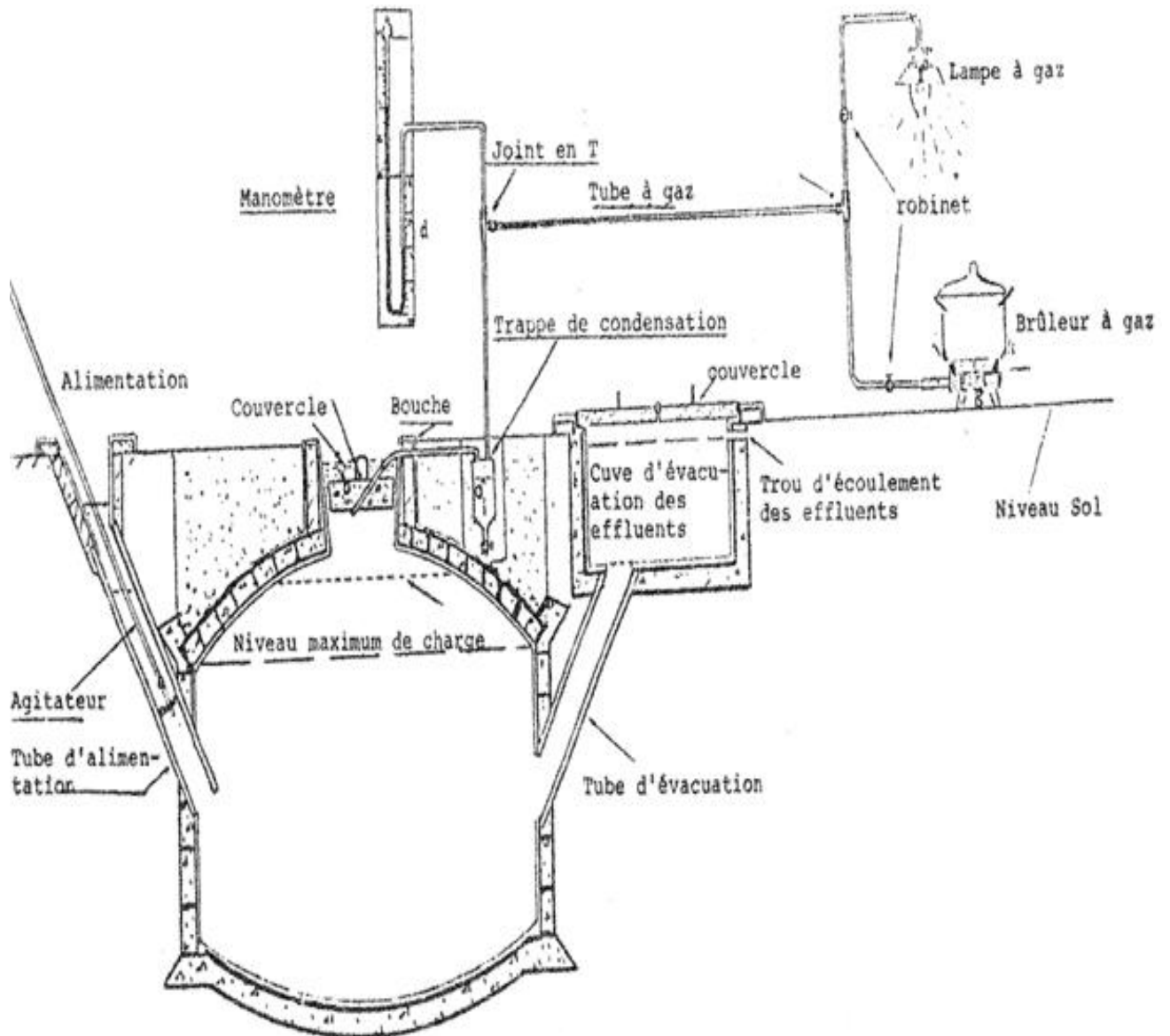


Figure II.6 : une installation de bio-digester type chinois. [8]

➤ Les réacteurs homogènes

Ce sont des réacteurs de la seconde génération, qui traitent surtout des effluents liquides. Ils ont un temps de séjour des liquides plus faibles que les autres réacteurs continus.

Les temps de séjour dans les réacteurs homogènes sont de l'ordre de l'heure. Il faut donc, pour retenir les micro-organismes dans les réacteurs, penser à des mécanismes comme la formation de granules, la décantation, la fixation sur un support. [8]

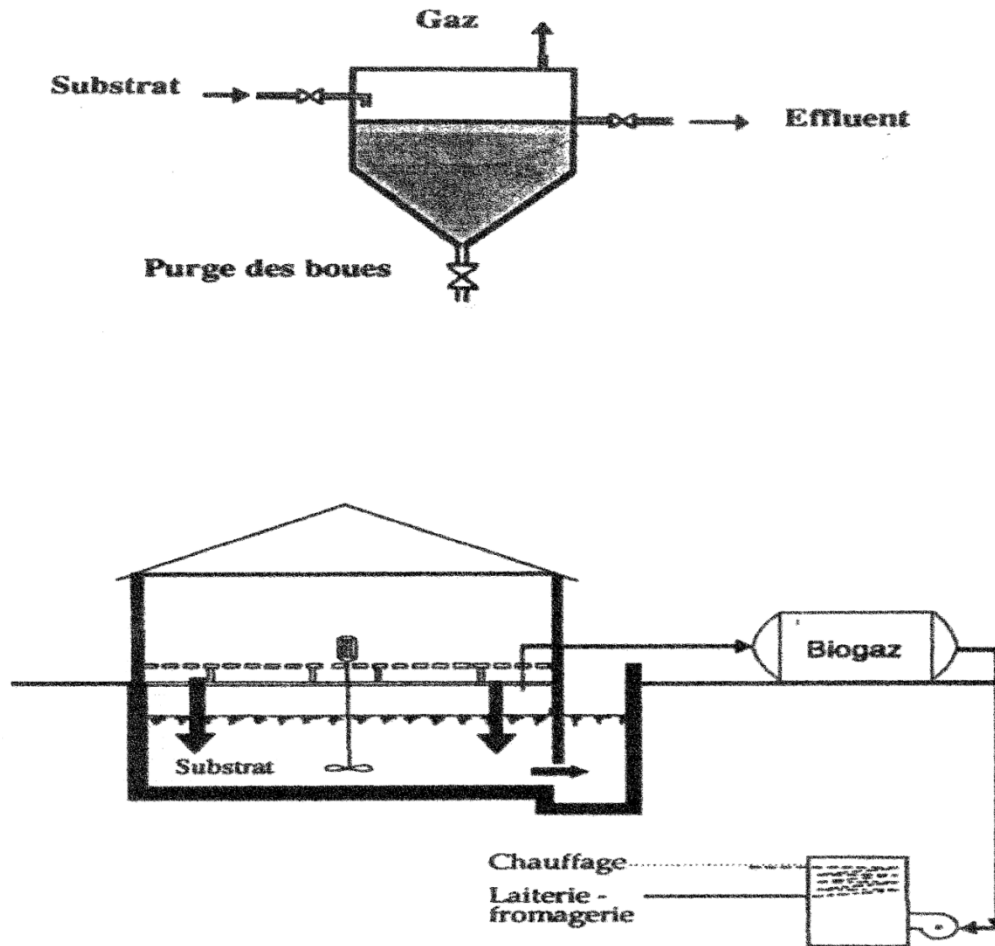


Figure II.7 : principe d'un réacteur homogène et exemple d'une installation. [8]

II.7.2.2. 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%. [16]

II.7.2.3. Classification selon le nombre d'étapes :

Selon les phases méthanogènes et l'acidogénèse se déroulent dans le même réacteur ou dans deux cuves séparées. [16]

II.7.2.3.1 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). [18]

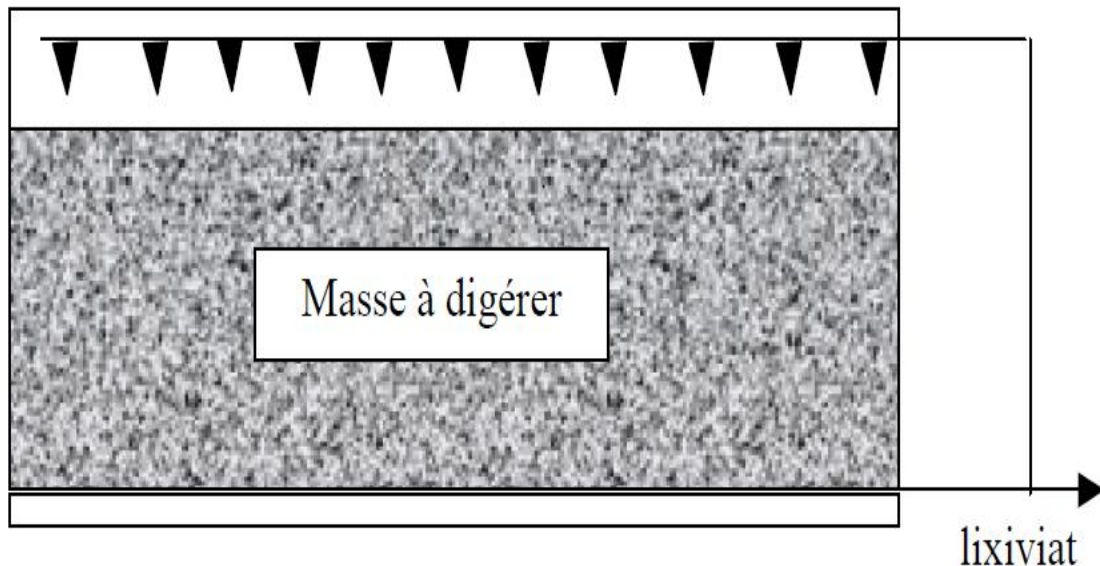


Figure II.8: Exemple de schéma de principe du digesteur à cellules (fermentation discontinue). [18]

II.7.2.3.2 Le procédé en bi-étape

Ce type de digesteur sépare la phase d'hydrolyse et l'acidogénèse dans une première étape, et la méthanogénèse dans une seconde étape. [19] La recirculation de la phase liquide présente l'avantage de ne pas nécessiter constamment l'ajout d'eau réchauffée, [16] La technologie à deux étapes peut être utilisée aussi pour méthaniser des déchets solides. [20]

Dans le réacteur d'acidogénèse on réalise une hydrolyse et une acidogénèse, ce qui liquéfie la matière organique solide et la transforme en AGV, et dans le second on a la méthanisation de ce lixiviat, [20] 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 méthanogénèses liée à la présence des acides gras volatils lorsque l'étape d'acidogénèse n'est pas complètement terminée. [16]

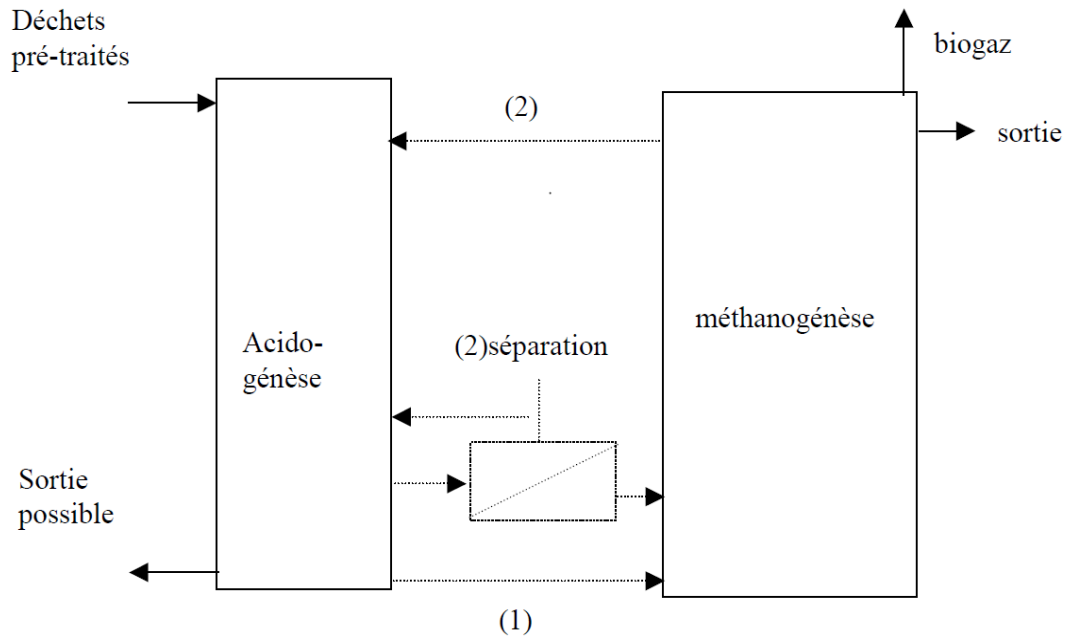


Figure II.9 : Stratégies de mise en œuvre de la digestion anaérobie en deux étapes : (1) couplage direct, (2) séparation des liquides et des solides avec recirculation du lixiviat épuré.

[18]

II.8. Les avantages et les inconvénients de la digestion anaérobie

Les avantages de la digestion anaérobie sont :

- la production du biogaz peut être utilisée comme sources d'énergies renouvelables pour générer trois types d'énergie : chaleur, électricité ou biocarburant;
- Un intérêt agronomique, lié à une concentration importante en azote ammoniacal (NH_4^+) et en phosphates (PO_4^{-3}) due à la lyse de la matière organique ;
- Une demande en énergie plus faible que les procédés aérobies et pas d'apport en oxygène ;
- de faibles impacts environnementaux (stabilisation de la matière organique, réduction des nuisances olfactives, réduction des émissions de gaz à effet de serre...);
- La possibilité de traiter des charges organiques élevées : de 2 à plus de 80 kg de DCO par mètre cube de réacteur et par jour avec des taux d'épuration de 80 à 98%.
- Elle génère un compost qui conserve en grande partie le potentiel fertilisant de la matière de départ.

Cependant, elle comporte aussi quelques inconvénients :

- Une forte sensibilité aux variations de charges et aux composés toxiques ;
- Une dégradation plus lente que pour les procédés aérobies ;
- Des coûts d'investissement importants ;
- Du fait de la faible vitesse de croissance bactérienne, la cinétique d'épuration est lente et les périodes de démarrage des réacteurs relativement longues;
- Les populations microbiennes sont sensibles aux perturbations, en particulier à l'oxygène et aux métaux lourds.

II.9.Conclusion

La méthanisation , en tant que technique de traitement des effluents organiques, présente de nombreux avantages. Elle produit un engrais de bonne qualité et un gaz combustible tout en résolvant en partie de problème de la pollution des effluents organiques.

Comme la digestion anaérobie conduit à une très faible transformation de matière organique en biomasse, la principale forme d'élimination réelle de la matière organique initiale est la formation du méthane, qui peut sortir du système sous forme gazeuse. Pour la formation de méthane, il existe donc seulement deux mécanismes, l'un à partir de l'acide acétique, l'autre à partir de l'hydrogène et du CO₂. Les acides jouent un rôle primordial dans le procédé anaérobie, car c'est à partir de ceux-ci qu'est possible la dernière étape de la digestion anaérobie, mais à de fortes concentrations ils peuvent conduire à une diminution importante du pH du système, l'activité méthanogène étant alors sévèrement inhibée.



CHAPITRE III

Le biogaz



Chapitre III : Généralité sur le biogaz

III.1. Introduction

L'énergie est au cœur des civilisations modernes, les transports, l'industrie, l'agriculture, le résidentiel ont maintenant des besoins supérieurs d'énergie, et la demande pour un confort accru se poursuit, d'après certains spécialistes la demande mondiale d'énergie devrait doubler.

Comment assainir l'environnement, ménager les ressources et trouver de nouveaux combustibles? Ces problèmes paraissent de prime abord n'avoir aucun lien commun. Leurs solutions sont toutefois liées, comme sont en train de le découvrir les nombreux pays qui tentent d'exploiter la technologie du biogaz. Mélange de méthane et d'anhydride carbonique, le biogaz résulte de la fermentation des substances organiques.

Le biogaz généré par la décomposition de la matière organique issue des déchets d'ordures ménagères (OM) est une source de nuisance olfactive. C'est aussi un risque en raison de la présence de méthane, qui représente 60% de la composition du biogaz, gaz explosif à l'air dans un seuil compris entre 5 et 15%. Il est donc nécessaire d'éviter tout risque de migration hors de son lieu de formation.

III.2. biogaz

III.2.1. Définition et Composition

Le biogaz est un gaz produit par fermentation de matière organique végétale ou animale dans un milieu en raréfaction d'air, il est plus léger que l'air, sa densité par rapport à l'air est 0,7. [16]

Le biogaz est composé généralement de 60% en CH_4 et de 40% en CO_2 . Ces valeurs peuvent varier de $\pm 10\%$ en fonction des conditions de mise en œuvre. [10]

Selon la qualité du substrat, le gaz peut contenir plus ou moins d'hydrogène sulfuré (H_2S).

Il existe plusieurs sources possibles d'émission du biogaz avec chacune leurs caractéristiques. On peut également trouver d'autres composés sous forme de traces (Tableau III.1) [16]

Tableau III.1 : Principaux composés autres que CH₄ présents dans le biogaz et leurs effets [16]

Composés	Concentrations	Effets
Dioxyde de carbone CO₂	25 à 50 % en vol	Diminution de la capacité calorifique Augmentation de l'indice de méthane Source de corrosion si le gaz contient de l'eau Dégradation des piles à combustible alcalines
Sulfure d'hydrogène H₂S	0 à 1 % en vol	Corrosif pour l'équipement Source de SO ₂ et H ₂ SO ₄ lors de la combustion Poison de catalyseurs
Azote N₂	0 à 5 % en vol	Diminution de pouvoir calorifique Augmentation de l'effet cliquetis des moteurs
Eau H₂O	1 à 5 % en vol	Source indirecte de corrosion Source de condensation dans les parties froides pouvant endommager l'instrumentation
Poussières	-	Diminution de l'efficacité des catalyseurs

III.2.1. 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. [21]

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. [21]

1808- Sir Humphrey Davy a constaté que le méthane est présent dans les gaz qui sont formé par la digestion anaérobie du fumier. [21]

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. [21]

1895 – le biogaz est utilisé pour illuminer les rues à Exeter, en Angleterre. [21]

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. [21]

1957 - Un inventeur britannique, Bates, modifie sa voiture fonctionnant au biogaz produit à partir de lisier de porc. 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 pendant 17ans. [21]

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. [21]

III.2.3. 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.

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. [22]

III.2.4. 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 m³ 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 m³ de biogaz, contenant 70% de méthane et de 30% de gaz carbonique, libère par combustion environ 6000 Kcal. [16]

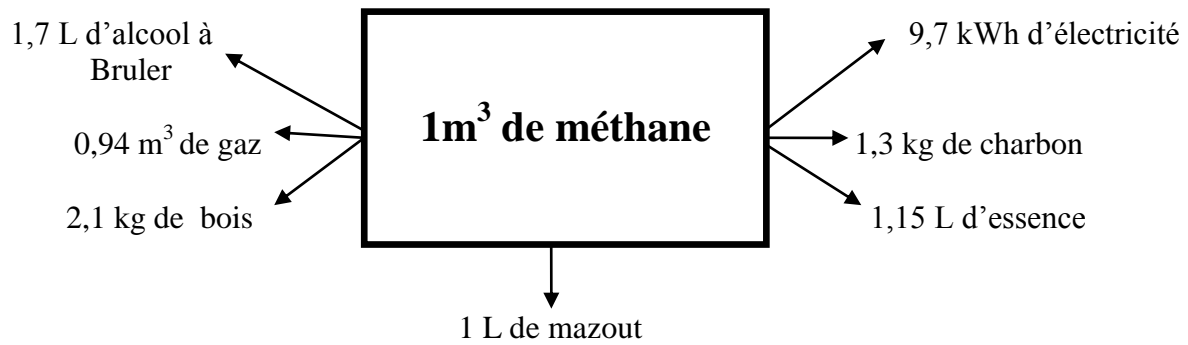


Figure III.1 : Equivalences énergétiques de 1 m³ de méthane. [16]

La variabilité de la quantité du gaz suivant le substrat fermenté est important : De 55% à 75% de CH₄. Sur une installation donnée, en l'absence d'accident de fermentation, la composition du biogaz est stable. [23]

III.2.5. Purification du biogaz

On distingue dans l'étape de purification du biogaz, le traitement qui consiste à éliminer les composés toxiques et corrosifs (H₂O, H₂S, CO₂). [16]

Le biogaz produit nécessite en suite une 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 H₂S.

Le procédé le plus efficace pour éliminer l'H₂S 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 CO₂, il faut faire barboter le biogaz dans une solution de chaux qui fixera le gaz carbonique. [24]

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 ...). [10]

Le tableau (III.3) regroupe les différents composés toxiques et leurs techniques d'élimination : [16]

Tableau III.2 : Les composés et leurs techniques d'élimination

Composés à éliminer	Techniques
eau	élimination de la vapeur d'eau à l'aide d'un purgeur (piège à l'eau)
souffre	adsorption sur charbon actif, ajout de chlorure de fer, le passage du biogaz dans un filtre d'oxyde de fer
Organohalogénés	adsorption sur charbon actif
CO ₂	barbotage du biogaz dans une solution de chaux

III.2.6. Valorisation de biogaz

De nos jours, l'énergie produit par le biogaz qui est généré par fermentation est utilisée uniquement dans les installations de couplage chaleur-énergie. La valeur énergétique moyenne du biogaz est de 5 à 10KWh /Nm³, (fonction de sa teneur en méthane). [25]

De ce fait, le biogaz se prête bien à différentes valorisations énergétiques. En fonction de sa composition intrinsèque et de l'utilisation que l'on souhaite en faire, il pourra être utilisé brut ou épuré.

Chaque (kWh) utilise à partir de biogaz permet d'économiser les ressources en énergie fossile. D'où l'intérêt écologique de contrôler et d'organiser de façon industrielle la fabrication de ce biogaz soit par voie de méthanisation en réacteur, soit par récupération du biogaz de décharge.

Le biogaz peut être valorisé pour produire de l'énergie thermique et / ou électrique. Tout comme un combustible fossile, il peut être caractérisé par son pouvoir calorifique inférieur (PCI). [25]

Le PCI d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de quantité du combustible. En effet, le PCI du CH₄ est de 36.5 MJ/m³ ou 9.94kWh/Nm³. Le PCI du biogaz est proportionnel à sa teneur en CH₄ : [3]

$$\text{PCI biogaz} = Q \times 35,5 \text{ MJ/m}^3 = Q \times 9,95 \text{ kWh/m}^3 \quad \text{Equation 6}$$

Ou :

Q: représente le pourcentage de CH₄ dans le biogaz.

A titre de comparaison, le pouvoir calorifique de 1 Nm³ de biogaz comprenant 60% de méthane vaut environ 22MJ.

Jusqu'à ces dernières années, le biogaz produit dans les décharges publiques et parfois dans les fermenteurs, était le plus souvent considéré comme un sous-produit de la décomposition organique, et ne donnait que rarement lieu à une valorisation. Depuis dix ans, l'amélioration des techniques de mise en décharge ainsi que des performances des fermenteurs anaérobies a conduit à un net avantageux la récupération de l'énergie 'biogaz'.

On distingue quatre types de valorisation :

- Valorisation thermique en chaudière ;
- Valorisation électrique ;
- Valorisation en carburant automobile ;
- Valorisation par injection dans le réseau de gaz de ville. [25][3]

III.2.6.1. Valorisation thermique en chaudière

Sur chacune de nos installations de valorisation de biogaz, une torchère de sécurité est installée afin notamment de brûler le biogaz en cas d'intervention sur la chaudière ou sur le cogénérateur biogaz. Par ailleurs, lorsque le biogaz est chargé en (H₂S), des systèmes d'épuration par injection d'air sont installés sur les réacteurs.

De plus, dans le cas de la cogénération biogaz, nous pouvons également étudier différentes possibilités de valorisation de la chaleur et notamment des réseaux de chaleur, du séchage de boues, des unités de séchage de fourrage en grange, des serres,... [26]

III.2.6.2. Valorisation électrique du biogaz

La méthanisation en tant que technique de production d'énergie renouvelable, bénéficiant d'une obligation d'achat d'électricité produite à partir de biogaz et d'une tarification spécifique avec un contrat de 15 ans. Le tarif d'achat comprend :

- Un tarif de base fixé selon la puissance de l'installation de méthanisation ;
- Une prime à l'efficacité énergétique définie selon le pourcentage de valorisation de l'énergie dans le biogaz ;
- Une prime à la méthanisation de 20€/MWh [26]

III.2.6.3. Valorisation en carburant automobile

Il est possible techniquement d'utiliser le biogaz comme comburant. Cependant, cette valorisation peut difficilement être envisageable dans des installations de méthanisation à la ferme. [27]

En effet, l'utilisation du biogaz comme comburant automobile demande une excellente qualité de pureté du gaz. Il doit contenir un minimum de 96% de méthane. Il ne doit pas contenir d'eau, de soufre, d'organo-halogénés, de carbone et de métaux. Il est nécessaire également de le comprimer, ce qui rend son épuration totale indispensable afin de ne comprimer que le méthane.

L'investissement nécessaire est donc très élevé et n'est envisageable que sur des installations de grande dimension. [21]

III.2.6.4. 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 CO₂, H₂S, O₂, H₂O et les composés halogènes. [28]

III.3. substrat

Les substrats qui peuvent faire l'objet d'un traitement par digestion anaérobie sont essentiellement : [29]

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

III.3.1. 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.

III.3.2. Les eaux usées urbains

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 [30]** et **Effebi [17]** ont consacré leurs premières recherches essentiellement sur ce type de substrat pour le procédé de la méthanisation.

III.3.3. Les déchets agro-alimentaires

La charge organique constitutive des eaux résiduaires de l'industrie agro-alimentaire 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.[23]

III.3.4. 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.

Nous décrivons un peu plus loin, plus en détail, un procédé fondé sur plusieurs expériences industrielles en vraie grandeur. [23]

III.4. Conclusion

La valorisation des déchets permet de produire de l'énergie renouvelable sous forme de biogaz, tout en réduisant une partie importante de la charge organique polluante de ces déchets et de les stabiliser.

Le biogaz produit a une valeur énergétique proche du gaz naturel, donc il peut facilement être valorisé dans les applications domestiques comme la cuisson, jusqu'à la production d'électricité.



Chapitre IV

Matériels et méthodes



Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV.1 Lieu de stage

Ce stage est réalisé au niveau du laboratoire de division thermique de l'Unité de recherche en énergie renouvelable en milieu saharien URER_MS à Adrar, durant la période 31/01/2017 au 02/03/2017.

IV.2 Organigramme de l'établissement

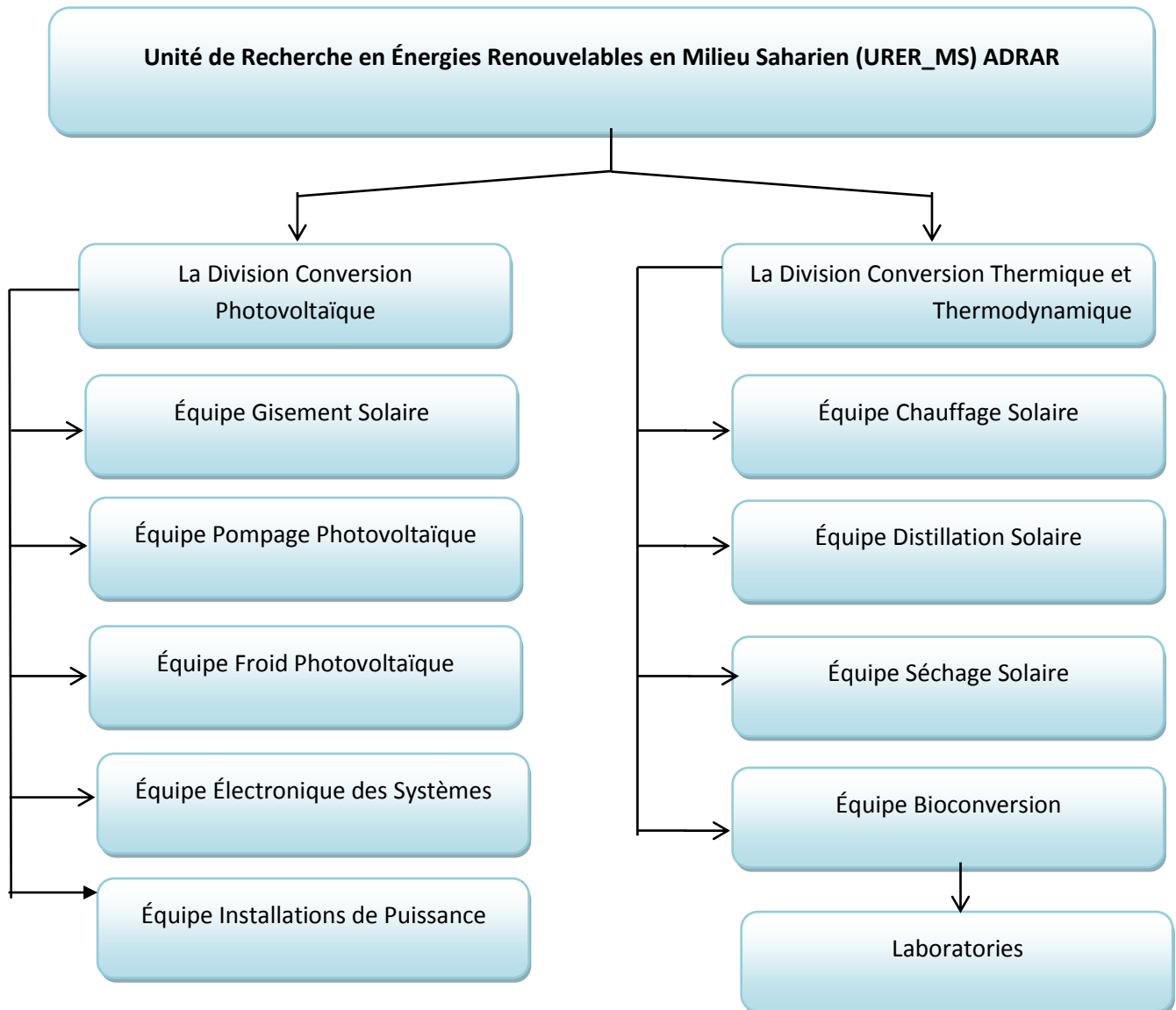


Figure IV.1: L'organigramme de l'URER_MS.

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'ensemble des dispositifs expérimentaux et toutes les méthodes d'analyses utilisées.

IV.3 Substrat utilisé

Le substrat utilisé dans cette étude pour l'alimentation de digesteur, est constitué des déchets ménagers qui sont principalement composés des déchets de cuisine, tels que le riz, le couscous, les épiluchures de la betterave, de pomme de terre et de carotte.

Nous avons effectué un prétraitement physique par un broyage mécanique des substrats, Afin d'optimiser les cinétiques de production du biogaz et de réduire le temps de séjour et pour assurer une homogénéisation de l'échantillon.



Photo IV.1: Substrats utilisés (broyés).

IV.4 Description du digesteur

Les essais ont été réalisés dans des digesteurs de type discontinu (Batch), ces digesteurs en verre, très simple (Photo IV.2), permettant d'assurer l'anaérobiose de milieu de culture. Les réacteurs ont muni de deux trous, le premier pour le prélèvement des échantillons liquides à l'aide d'une seringue, et l'autre pour assurer l'échappement du gaz pour la mesure du volume de biogaz produit. Le volume total de chaque digesteur est de 1 litre avec un volume utile de 800 ml. Nous avons laissé un petit volume au-dessus du niveau du liquide pour protéger la sortie de gaz et maintenir l'anaérobiose. Le digesteur utilisé est alimenté avec les déchets, la concentration du substrat est de l'ordre de 9 g MO.

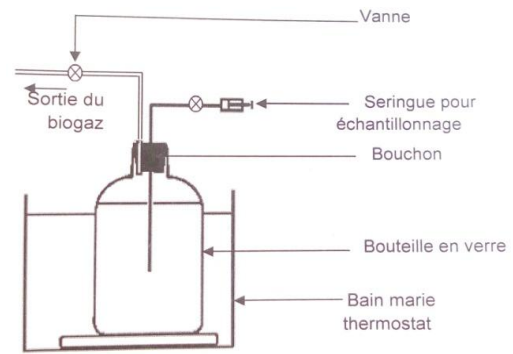


Photo IV.2 : Photo et schéma du digesteur au niveau de laboratoire.

IV.5 Mode d'opérateur

L'objectif de notre étude expérimentale pour voir l'effet du traitement chimique et le traitement aérobie sur l'efficacité de la digestion anaérobie particulièrement sur la production du méthane (CH_4). Pour cela, nous avons lancés neuf (09) digesteurs et trois autres témoins, ces derniers contient 9 gramme de MO du substrat, et les autres contient 9 gramme de MO plus 200ml de NaOH (0,1N), on les laisse en milieu aérobie pendent 24 heures dans un bain marie à une température de 37°C.

Pour lancer ces digesteurs, on ajoute 600 ml d'eau physiologie (pour les neuf digesteurs) et 800 ml d'eau physiologie pour les digesteurs témoins, sa s'effectué suivant trois étapes sont :

Le 1^{ère} jour : lancé les digesteurs (1,2 et 3) et les trois digesteurs témoins;

Le 2^{ème} jour : lancé les digesteurs (4,5 et 6) ;

Le 4^{ème} jour : lancé les digesteurs (7,8 et 9).



Photo IV.3 : Les réacteurs dans un bain marie chauffé et régulé à 37°C (milieu aérobie)

IV.6 Conditions de digestion

Les réacteurs sont maintenus à une température de 37°C (plage mésophile) dans un bain marie chauffé et régulé par un thermostat et agité manuellement en le secouant une à deux fois par jour pour assurer un bon contact entre les bactéries et les déchets dans le milieu. [32]



Photo IV.4 : Les réacteurs dans un bain marie chauffé et régulé à 37°C.

IV.7 Méthodes d'analyses

IV.7.1 Détermination de la matière sèche (MS)

a) Matériels utilisés

- Etuve réglée à 105°C ;
- Creusets ;
- Dessiccateur ;
- Spatule ;
- Balance électronique de précision.

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 (M_1), 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.



Photo IV.5 : l'étuve utilisée.

La matière sèche s'obtient selon la méthode de Michaud [33] :

$$MS\% = \left(\frac{M_2}{M_1} \right) \times 100 \quad \text{Equation 15}$$

Avec :

M : masse de la creusé ;

M_1 : masse de l'échantillon avant dessiccation ;

M_2 : masse de l'échantillon après dessiccation.

IV.7.2-Détermination de la teneur en matière organique (MO)

a) Matériels utilisés

- Four à moufle ;
- creusé ;
- Balance électronique de précision ;
- dessiccateur.

b) Méthode

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. [25] La masse de la matière organique est obtenue par différence entre la masse de matière sèche et la masse de matière minérale.



Figure IV.6: le four a moufle utilisé.

Le calcul de MO, s'obtient selon la méthode de Michaud [33]:

$$MO\% = \left(\frac{M_2 - M_3}{M_2} \right) \times 100 \quad \text{Equation 16}$$

Avec :

M_2 : la masse d'échantillon après dessiccation ;

M_3 : la masse d'échantillon après calcination.

IV.8 Les paramètres suivis

Le contrôle des digesteurs est nécessaire pour assurer la réussite de l'opération. A cause de la complexité du processus de la digestion anaérobie due à la sensibilité des groupes micro-organismes à plusieurs facteurs, il est important de pouvoir détecter le déséquilibre de processus au début et donc l'action peut être prise à temps pour empêcher l'échec du processus. Pour cela pendant la durée de la digestion, nous avons suivi deux types de paramètres, qui sont les suivants :

a- Paramètres du fonctionnement ;

Dans cette étude on a suivi les paramètres qui nous renseignent sur le fonctionnement du réacteur tels que le pH, et le volume du biogaz total, le volume de CH_4 , AGV et TAC.

b- Paramètres d'épuration ;

Le paramètre le plus répandu qui peut nous donner une idée sur les matières polluantes, et donc donner une idée sur le taux d'épuration du substrat étudié. Ce paramètre est :

La demande chimique en oxygène (DCO).

La demande chimique en oxygène est retenue mondialement comme critère d'évaluation et apparait dans toutes les études concernant les rejets et les déchets [18].

IV.8.1 Paramètres de fonctionnement**IV.8.1.1 pH**

Le pH est un facteur facile à mesurer, le changement du pH peut être un indicateur, et la cause du déséquilibre du processus, puisque les micro-organismes peuvent fonctionner seulement dans une plage spécifique de pH (entre 6 et 7).

a) Matériels

- pH-mètre ;
- Bécher ;



Photo IV.7 : pH-mètre.

IV.8.1.2 Volume de biogaz produit (totale)

La production du biogaz est le but principal de la digestion anaérobie. Durant le déroulement du processus de digestion anaérobie le volume du biogaz produit est mesuré de façon régulière.

a) Matériels

- Burette graduée ;
- Flacon ;
- Support ;
- Des tuyaux.

b) Solutions

- NaCl (10g/l) pH=2.

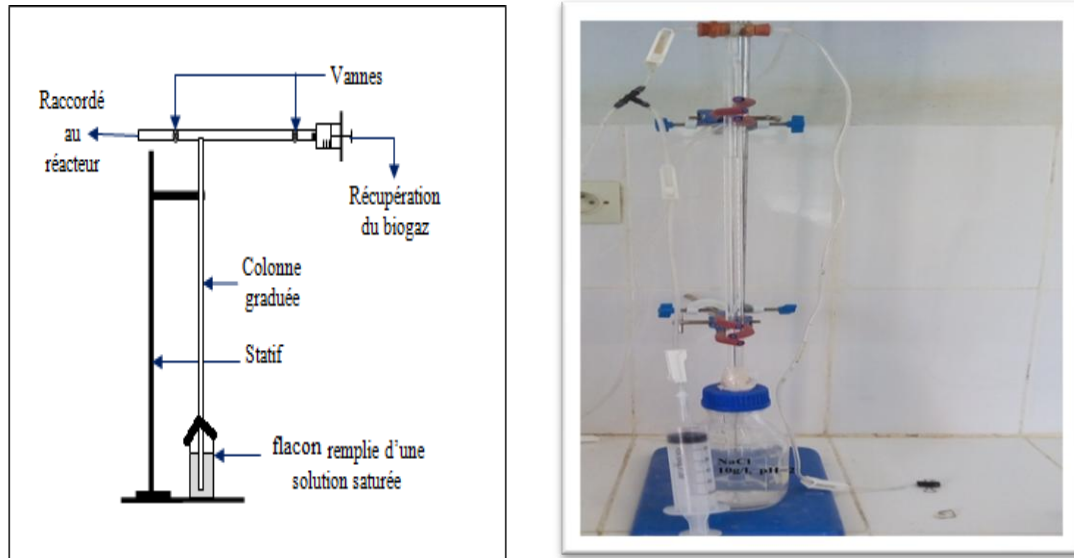


Photo IV.8 : Photo et schéma de dispositif de mesure du volume du biogaz produit.

c) Méthode

Les productions gazeuses sont suivies avec des fréquences journalières, le volume de biogaz est mesuré à l'aide d'un système hydraulique (déplacement du liquide), ou le gaz produit en sortie du digesteur, passe dans une burette graduée plongée dans une solution saturée (NaCl 10g/l, pH=2) (aucune réaction chimique entre le biogaz produit et cette solution), ce qui va déplacer le niveau du liquide contenu dans la burette et indique ainsi le volume du biogaz produit.

IV.8.1.3 Volume de CH₄ (le potentiel biochimique méthanogène)

Le PBM c'est la quantité maximale de méthane qu'elles sont susceptibles de produire lors de dégradation des matières organiques. Cette mesure permet également d'accéder à la biodégradabilité du produit considéré. [10]

a) Matériel

- Burette graduée ;
- Flacon ;
- Support ;
- Des tuyaux.

b) Solution

- NaOH (3%)

c) Méthode

Le volume de CH₄ est mesuré à l'aide d'un système hydraulique qui est basée sur la méthode de déplacement du liquide, ou le gaz produit en sortie du digesteur, passe dans un flacon remplie

avec solution (NaOH (3%)) qui piègeras le CO₂ contenu dans le biogaz et laisse passer le CH₄ qui est noté comme volume final de méthane produit.

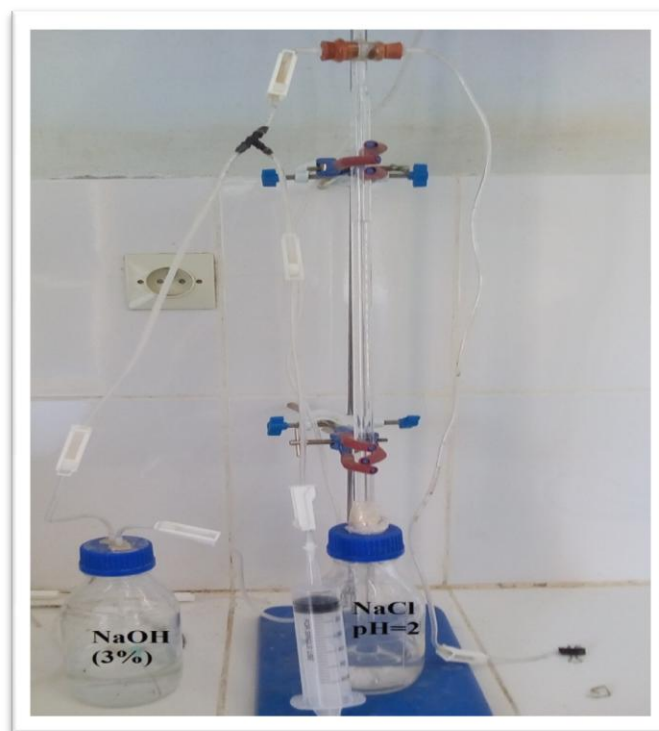


Photo IV.9 : Photo de dispositif de mesure du volume de méthane produit.

IV.8.1.4 Dosage du titre alcalimétrique complet (TAC) et des acides gras volatils (AGV)

Le titre alcalimétrique complet (TAC) représente la teneur des carbonates et bicarbonates, responsables du pouvoir tampon du fermenteur vis-à-vis des acides organiques et acides gras volatils. Cette alcalinité permet au pH de rester aux alentours de la neutralité malgré la présence d'acides.

Le contrôle des acides gras volatils (AGV), stade intermédiaire obligatoire de la fermentation méthanique, est indispensable. L'accumulation de ces acides provoque un ralentissement de l'activité des bactéries méthanogènes et peut même bloquer le processus fermentaire.

Ces deux paramètres sont quotidiennement dosés pour contrôler le bon fonctionnement de la digestion anaérobie pendant la première semaine, puis ils sont dosés deux fois par semaine, et également dans le cas où une chute du pH est observée. Plusieurs auteurs [34] utilisent le rapport AGV/TAC inférieur à 0.5 comme indice de bon déroulement de la fermentation méthanique.

Quand il y'a accumulation des acides gras volatils dans le milieu, il y'a une chute de pH (pH<5), qu'il faut réajuster par l'adjonction d'une quantité de bicarbonate. Le dosage de TAC et AGV est réalisé selon la méthode décrite par S.Leclercq et al. [35]

➤ **Mesure du titre alcalimétrique complet (TAC)**

Après centrifugation de l'échantillon pendant 10 min, on prend un volume précis dont, on mesure le Ph initial, puis à l'aide d'une burette au 1/10 ml, on acidifie avec de l'acide sulfurique (H₂SO₄) 0.1 N jusqu'à pH=4, soit V ml :

$$\text{TAC} = \frac{V \times 0.1 \times 1000}{V_e} \text{ meq/l} \quad \text{Equation 17}$$

Ou

$$\text{TAC} = \frac{V \times 0.1 \times 1000}{V_e} \times 0.05 \text{ g/l de CaCO}_3 \quad \text{Equation 18}$$

V_e : volume de la prise d'essai

➤ **Mesure des acides gras volatils (AGV) :**

Pour mesurer les acides gras volatils nous continuons à acidifier, à l'aide de l'acide sulfurique (H₂SO₄) 0.1 N, la prise d'essai jusqu'à pH=3.5. Le liquide est ensuite bouilli pendant 3 min, puis on laisse refroidir.

Le liquide refroidi est porté sous l'électrode du pH-mètre tout en versant sous agitation de la soude (NaOH) 0.1N jusqu'à pH=4, soit V₂ le volume obtenu.

En continuant à verser de la soude jusqu'à pH=7 puis on note V₃ le nouveau volume.

$$\text{Acidité volatile} = \frac{(V_3 - V_2) \times 0.1 \times 1000}{V_e} \text{ meq/l} \quad \text{Equation 19}$$

Ou

$$\text{Acidité volatile d'acideacétique} = \frac{(V_3 - V_2) \times 0.1 \times 1000}{V_e} \times 0.06 \text{ g/l} \quad \text{Equation 20}$$

IV.8.2 paramètres d'épuration

IV.8.2.1 Détermination de la DCO (totale et soluble)

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.

a) Matériels utilisés :

- Centrifugeuse ;
- Pipette ;
- Bécher ;
- Tubes d'essai ;
- Burette ;
- Thermo-réacteur.

b) Méthode :

Ce dosage est réalisé par l'emploi de la méthode au bichromate de potassium.

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.

On note DCO_S la demande chimique en oxygène soluble obtenu après centrifugation de l'échantillon et DCO_T la demande chimique en oxygène totale obtenu après l'homogénéisation.



Photo IV.10 : La centrifugation.

- a- Photo de la centrifugeuse utilisée ;
- b- Echantillon avant la centrifugation ;
- c- Echantillon après la centrifugation.

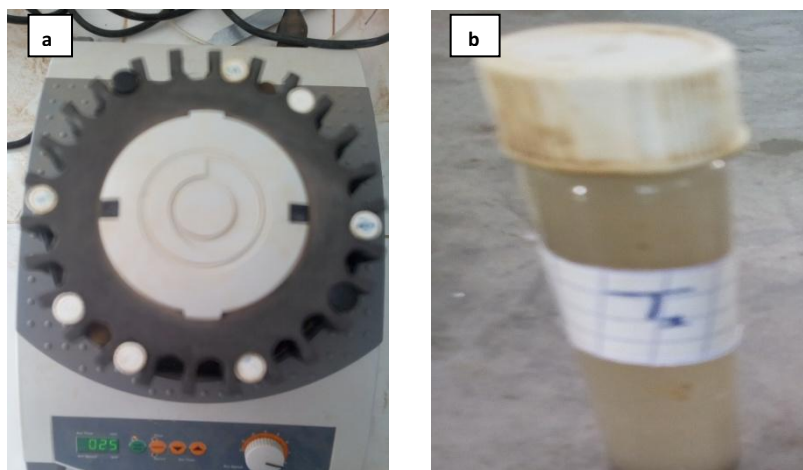


Photo IV.11 : l'homogénéisation.

- a- Photo d'homogénéisateur ;
- b- Echantillon après l'homogénéisation.

Les matières organiques contenues dans l'échantillon sont oxydées, en milieu acide (H_2SO_4), en présence de sulfate d'argent (Ag_2SO_4) comme catalyseur, et de sulfate de mercure (HgSO_4) pour éviter l'interférence des chlorures, par le bichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), chauffées à 150°C , pendant 2 heures dans un thermo réacteur.



Photo IV.12: Photo du thermo réacteur.

Après refroidissement, la DCO est déterminée par dosage en retour : de bichromate de potassium est dosé à l'aide d'une solution de sulfate fer ammonium [sel de Mohr $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$], après la détermination de leur titre, en présence de quelques gouttes de ferroïne comme

indicateur coloré. L'oxydation de la matière produit des ions Cr^{3+} , donnant une coloration rouge violacé.

La DCO est exprimé par la relation suivante :

$$DCO = [(V_T - V_E) \times 8000 \times T \times D] / V_e \quad \text{Equation 21}$$

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 : la prise d'essai de l'échantillon.



Chapitre V

Résultats et discussions



Chapitre V : Résultats et discussions

V.1. Caractéristiques du substrat :

La digestion des substrats à durée 40 jours et les caractéristiques initiales sont reportées dans le tableau(V.1).

Tableau V.1 : les caractéristiques initiales des substrats

Les paramètres	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour	Témoin
pH	4,65	4,44	4,34	5,59
AGV (g/l)	0,026	0,08	0,16	0,12
TAC (g/l)	0,03	0,02	0,06	0,05
%MS	27	27	27	27
%MO	92,57	92,57	92,57	92,57
DCO Totale (mg/l)	7936	7936	5333	7936
DCO Soluble (mg/l)	5291	5291	2666	7936

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté une forte charge organique contenue dans notre échantillon, malgré sa teneur faible en matière sèche.

Pour le lancement de la digestion anaérobie, nous avons choisi un taux de dilution égale à 9g/l de MO, ce choisit est basé selon des travaux déjà entrepris au paravent par **Tahri et al [36]**, qui a démontré que la phase d'hydrolyse acidogénèse, pour la concentration de 9% est atteinte rapidement, ainsi que le volume de biogaz obtenu s'enflamme très tôt et donne une meilleur productivité.

Après le choix du taux de dilution, nous avons lancé la réaction de la digestion substrat dans des réacteurs de capacités de 1litre. L'expérience se poursuit jusqu'à l'observation d'un faible volume de biogaz produit.

V.2 Variation du pH :

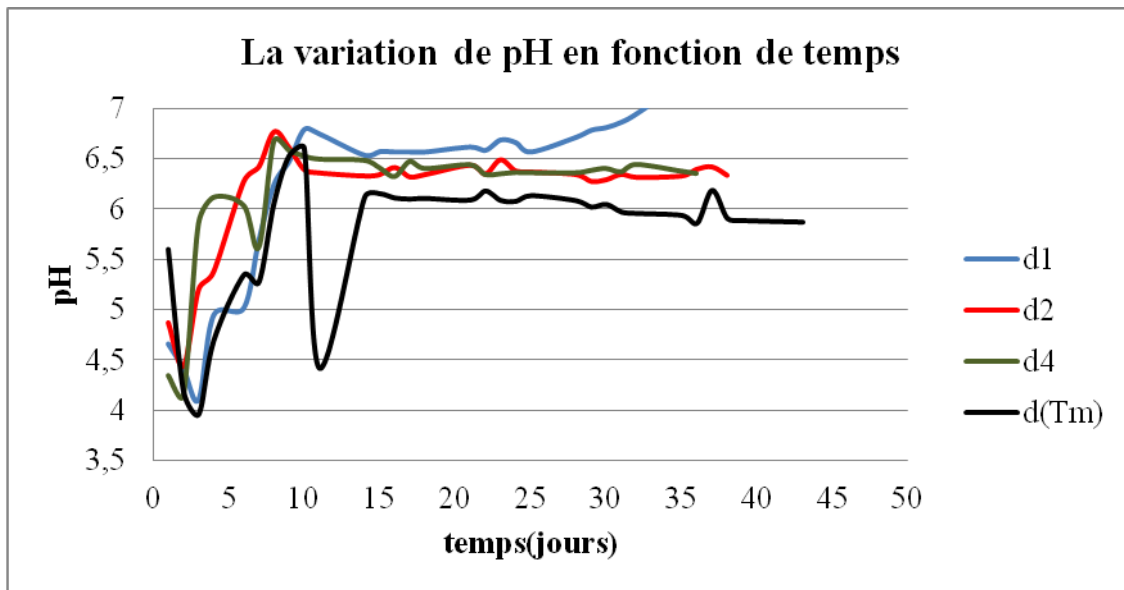


Figure V.1 : Variation du pH au cours du temps

Tels que :

d1 : représente le digesteur qui a été lancé le premier jour ;

d2 : représente le digesteur qui a été lancé le deuxième jour ;

d4 : représente le digesteur qui a été lancé le quatrième jour ;

d(Tm): représente le digesteur témoin.

On peut remarquer que le pH varie au cours de la méthanisation, la courbe d'évolution du pH, peut être divisée en trois grandes parties :

1^{ère} partie : Durant les quatre premiers jours, nous remarquons qu'il y a une chute rapide du pH tels que :

Les digesteurs de premier jour (de 4,65 à 4,10), les digesteurs de deuxième jour (de 4,87 à 4,44) et les digesteurs de quatrième jour (de 4,34 à 4,14). Cette diminution est due à la décomposition de substrat et la formation des acides gras comme l'acide lactate, butyrate,...etc et leurs accumulations dans le milieu. [37]

2^{ème} partie : A partir du quatrième jour, nous avons ajusté le pH avec une solution d'hydroxyde de sodium afin de rendre sa valeur proche de 7 (valeur optimale pour la digestion anaérobie), après l'ajustement, le pH diminue et reste au voisinage de 6 jusqu'au onzième jour, cela est dû à la continuité de la production des acides. [38]

3^{ème} partie : Après le onzième jour, un deuxième ajustement du pH a été effectué. Mais cette fois-ci le pH reste stable après l'ajustement au voisinage de 7 jusqu'à la fin de

l'expérience. Cela peut être expliqué par la consommation des Acides Gras Volatils (AGV) et l'épuisement de la matière organique. [37]

V.3 Production de volume du biogaz (totale) :

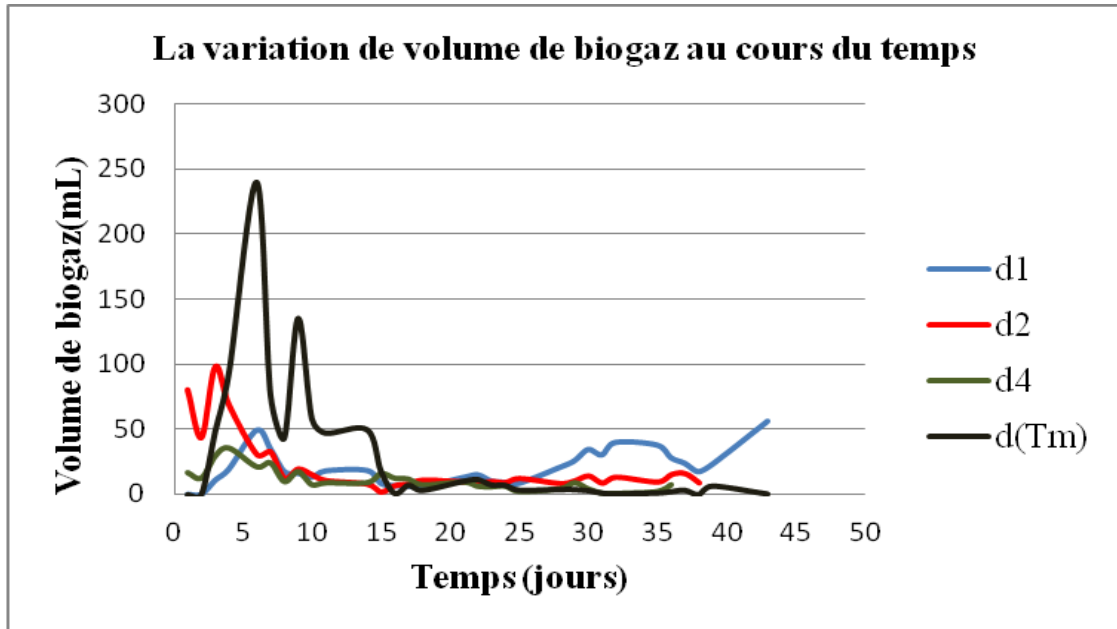


Figure V.2 : Le volume journalier de production de biogaz au cours du temps.

La production du biogaz a été contrôlée par la mesure quotidienne du volume de biogaz produit pour chaque digesteur, La figure (V.2), montre qu'il ya une production de biogaz en fonction du temps. A travers ces résultats obtenus nous n'avons constaté que les digesteurs de premier jour à une production importante (601,55ml) par rapport à celle des digesteurs de deuxième jour (496,2ml) et par rapport les digesteurs de quatrième jour (256,8ml). La différence de productivité de biogaz est proportionnelle à la quantité de la matière organique introduite. Ces mêmes constatations ont été rapportées par plusieurs auteurs dans leurs travaux de recherche sur la digestion anaérobie.

Tous les volumes produits dans les trois digesteurs restes moins important que le volume produit dans le digesteur témoin surtout dans les premières quinze jours.

V.4 Production de volume de CH₄:

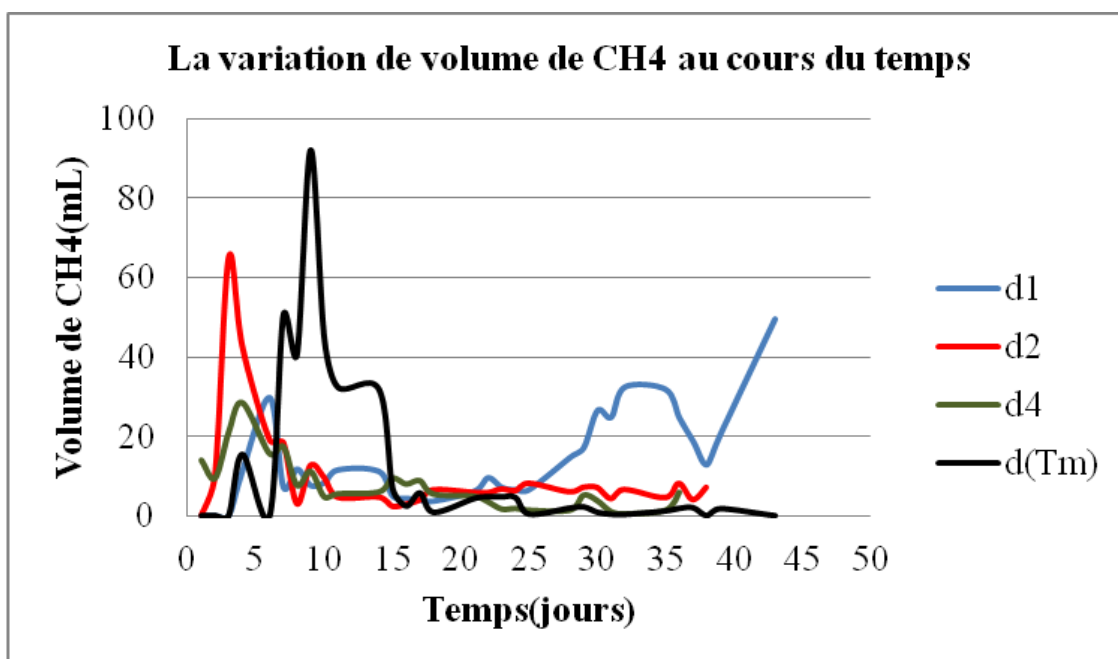


Figure V.3 Productivité de CH₄ au cours du temps.

La production de méthane a été contrôlée par la mesure quotidienne du volume de méthane produit pour chaque digesteur, la figure (V.4), montre qu'il ya une production de méthane en fonction du temps. A travers ces résultats obtenus nous n'avons constaté que les digesteurs de premier jour à une production importante (423,43 ml) par rapport à celle des digesteurs de deuxième jour (282,26ml) et par rapport les digesteurs de quatrième jour (205,7ml).

Mais le volume de CH₄ produit dans le digesteur témoin rester toujours plus grand que les volumes produits dans les trois digesteurs d1, d2, d4. (compatible avec la production de biogaz)

V.5 Inflammabilité du biogaz

La production du gaz étant mise en évidence, nous avons eu le souci de déterminer la qualité de ce biogaz. Les moyens d'analyse étant absents, nous nous sommes basés sur la littérature qui indique qu'un taux de 45% [25] de méthane est suffisant pour une combustion du biogaz produit lors du processus d'une digestion anaérobie.

Les tentatives, de brûler le biogaz produit, n'ont été satisfaisantes qu'à partir des onzièmes jours de digestion (Photo V.1), ce qui veut dire, et selon la littérature, que la composition de notre biogaz est telle qu'il est possible de le valoriser. [25]

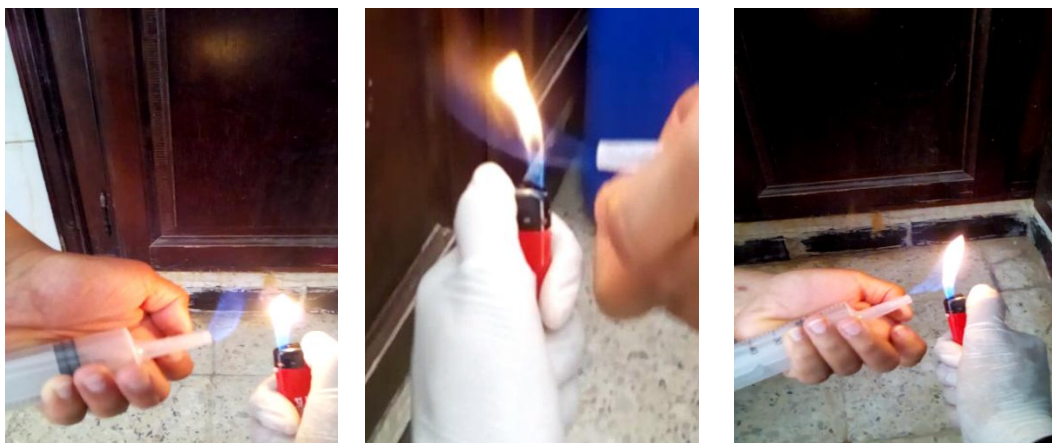


Photo V.1 : Test d'inflammabilité du biogaz produit.



Conclusion générale



CONCLUSION GENERALE

Les résultats obtenus ont permis de démontrer la possibilité de produire du biogaz à partir des déchets organiques du restaurant universitaire et dans des conditions favorables au développement de la flore bactérienne responsable de la méthanisation.

Dans cette expérience nous avons étudié le test de potentiel méthanogène ou **BMP** (Biochemical Methane Potential), qui a permis de déterminer la production maximale de méthane dans nos échantillons.

Les variations du **pH** enregistrées durant la digestion de déchet (après ajustement) ont été dans le domaine de développement des bactéries méthanogènes, ce qui a favorisé l'aboutissement à la dernière étape de la fermentation qui est la méthanogène.

Dans cette étude on a eu une production considérable de volume de biogaz dont le volume le plus important était produit par le digesteur **d1**, celui qui était lancé après une journée d'aération, et les volumes de biogaz moins importants sont produits par les réacteurs **d2** et **d4**, et tous les volumes produits dans les trois digesteurs restent moins importants que le volume produit dans le digesteur témoin.

Par conséquent la quantité de méthane **CH₄** produite dans l'expérience était importante dans les trois digesteurs mais plus importante dans le digesteur **d1** que les digesteurs **d2** et **d4**, mais le volume de **CH₄** produits dans le digesteur témoin reste toujours plus grand que les volumes produits dans les trois digesteurs **d1**, **d2** et **d4** ce qui est compatible avec les volumes de production de biogaz.

Les résultats obtenus dans ce travail montrent clairement que la meilleure durée de traitement chimique du substrat par **NaOH (0.1N)** donne un grand volume de biogaz qui est contenu dans le digesteur **d1** (une journée de traitement).

En fin et à la lumière de ce travail on peut dire que la valorisation des déchets organiques du restaurant universitaire de l'université africaine d'ADRAR, est possible par la digestion anaérobie, par cela nous recommandons de l'installation des digesteurs de grande échelle dans les cités universitaires pour l'obtention du méthane et l'utiliser dans la vie quotidienne (chauffage, éclairage, cuisson...), et pour protéger l'environnement contre l'effet nocif de ces déchets.



Références



Références

- [1] : Ahmed Addou, ‘développement durable, traitement des déchets, valorisation, élimination’ professeur de chimie de l’environnement à l’université de Mostaganem, mai 2009.
- [2] : M. Benyoucef, K. Takoura, A. Bayoucef, ‘la méthanisation des déchets organiques de la ville d’Adrar’, mémoire de licence, université d’Adrar, 2012-2013.
- [3] : A. Tahri, ‘production du biogaz à partir des déchets ménagers de la ville d’Adrar, influence de pH et ensemencement’, mémoire master, université d’Adrar, 2014.
- [4] : Charlotte Rigaud-illustration : Claire Laffargue, ‘Biogaz : ce qu’il faut savoir’, Systèmes Solaires – Le Journal Des Energies Renouvelables n°179, 2007.
- [5] : 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.
- [6] : K.Kaidi, ‘Etude comparative de la digestion anaérobie de différents déchets organiques’, mémoire licence, université d’Adrar, 2013.
- [7] : SengaKiesses, ‘Valorisation énergétique des déchets de bois traités par voies thermochimiques (pyrolyse et hydrolifaction)’, thèse de doctorat, université Nantes Angers la Mans, 2013.
- [8] : 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.
- [9] : K. DERBAL, ‘digestion anaérobie des déchets solides mélanges avec les boues de station d’épuration’, Thèse de doctorat, université Mentouri Constantine.
- [10] : R. Moletta, ‘la méthanisation’ 2^{ed} édition, France, avril 2011.
- [11] : 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.
- [12] : M. SalvadorRodríguez 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.

- [13] : 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 Montpelier, 2009.
- [14] : A. Dahou, 'la production de biogaz à partir de lagunage de la wilaya d'Adrar', mémoire de magistère, université KasdiMerbah, Ouargla, 2010.
- [15]: 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, 2007.
- [16] : I. Boutouta, 'valorisation énergétique des déchets solides urbains de la ville de Blida', mémoire master, université Saad Dahleb de Blida, 2011-2012.
- [17] : K. Effibi, 'Lagunage anaérobie : modélisation combinant la décantation primaire et la dégradation anaérobie, Thèse de doctorat, université de Liège Campus d'ARLON, mars 2009.
- [18]: R. Moletta ' la méthanisation :La digestion anaérobie des déchets municipaux' rédaction 2003.
- [19]: A. Saidi, B. Abada, 'La bio-méthanisation : une solution pour un développement durable', revue des énergies renouvelables, CER'07 Oujda, 2007.
- [20]: R. Moletta ' la méthanisation :Technologies du traitement des effluents par méthanisation' rédaction 2002.
- [21] : A. El-Kerbi, S. Kahlaoui, 'digestion anaérobie des déchets de matière organique', mémoire de licence, université d'Adrar, juin 2011.
- [22] :T.Héteu, J. Martin, 'conversion biochimique de la biomasse', aspects technologiques et environnement, 2003.
- [23] :Bertan de la farge, 'le biogaz procédés de fermentation méthaniques' Masson, Paris, 1995.
- [24] : H. Rebouh et F. Benlounes, le montage : un terrain à explorer, a exploité. Un renversement de tendance, USTHB, le laboratoire de recherche en géographie et a management de territoire, Alger, 11,12 et 13/04/2001.
- [25] :S. Kalloum, ' la digestion anaérobie des boues de la station d'épuration de la ville d'ADRAR : une opportunité environnementale et énergétique', Mémoire de Magister, Ecole Normale Supérieur de L'enseignement Technique d'Oran, 2006.

[26] :Jean-Michel Groult, ‘la production de biogaz’, les éditions Egueuler, 8, rue blanche, Paris 2008.

[27] : L. Mellouki, A. Boubakeur, ‘étude théorique de la digestion anaérobie de la matière organique fermentescible d’une décharge publique’, mémoire de licence, université d’Adrar, Juin 2012.

[28] : L. Angélique, ‘bio méthanisation’, rapport, université de Liège, 2011.

[29]: ‘la méthanisation à la ferme’, guide pratique, ADEM (agence de l’environnement et de la maîtrise de l’énergie), septembre 2011.

[30]: A. Mottet, ‘recherche anaérobie des déchets solides ménagers avec les boues de stations d’épuration’, thèse de doctorat, universitéMentousi, Constantine, 2010.

[31]: S3d solutions déchets & Développement durable, ‘mesure du potentiel méthane ou BMP (Biochemical Méthane Potentiel)’, France.

[32] : Léonard MindeleUkondalemba et *al.* ‘La valorisation des déchets ménagers organiques et des boues de vidange de fosses septiques par digestion anaérobie’, 2015.

[33] : S. Michaud, ‘Etude hydrodynamique et biologique d’un procédé de méthanisation à biofilm : le réacteur à lit turbule inverse’, Thèse de doctorat, L’institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2001.

[34] : S. Kalloum et *al.*, ‘la digestion anaérobie des boues des stations d’épuration des eaux usées : une opportunité énergétique et environnementale’, Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien, URER_MS, ADRAR.

[35] : S. Leclercq, V. A. Jacq et E. Tine, ‘Essais de valorisation de sous produits de brasserie par fermentation méthanique-procédé contact anaérobie’, 1985.

[36] : A. Tahri et *al.*, ‘Production de biogaz à partir des déchets de la pomme de terre’, Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien, URER_MS, ADRAR, Mai 2016.

[37] : M. Djaafri et *al.*, ‘Amélioration de la digestion anaérobie des déchets ménagers (déchets de restaurant) en utilisant un prétraitement physique’, Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien, URER_MS, ADRAR, 2014.

[38] : S. Kalloum et *al.*, ‘Etude de l’influence du pH sur la Production du Biogaz à partir des Déchets Ménagers’, Revue des Energies Renouvelables, 2007.