

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POLULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Chimie Industrielle

Mémoire présenté en vue de l'obtention de diplôme de
Master

En Génie Chimique
Option : Génie Catalytique

Présenté par :

BOUTOUTA IMANE

Valorisation énergétique des déchets solides urbains de la ville de Blida

Encadré par :

- M^r B.CHEKNANE
- M^r M.DJAAFRI

Année universitaire : 2011/2012

Blida,



REMERCIEMENTS

- ❖ *Avant toute chose, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné courage, patience et force durant toutes ces années d'études.*
- ❖ *Que serait une thèse sans un directeur de thèse, j'ai eu la chance de bénéficier d'un très bon encadrement, je tiens donc à remercier chaleureusement mon encadreur Dr.CHEKNANE Omar. Un grand merci pour tout : votre patience, votre générosité et surtout votre confiance et tous vos conseils qui m'ont permis de prendre les bonnes directions. Je tiens ensuite à exprimer ma gratitude aux membres du jury*
- ❖ *J'adresse ma profonde reconnaissance à Mme. KHOUDJA Houria, pour son aide et ses conseils durant le déroulement de ce travail et aussi à Mme SEBTI Aicha, qui je la souhaite la réussite dans sa vie professionnelle.*
- ❖ *Ce travail a été réalisé au sein de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien à Adrar (URER), et il n'aurait pas pu être réalisé sans le soutien et l'aide de nombreuses personnes. Donc c'est avec plaisir que je tiens à remercier plus particulièrement le directeur général de l'unité : Dr. M.HAMOUDA pour son accueil chaleureux et pour la confiance qu'il m'a accordé, à Mr. M.DJAAFRI pour son encadrement et tous ses conseils avisés et pour son suivi avec intérêt le déroulement de cette étude, je remercie également toute l'équipe du laboratoire de la division de la biomasse au sein de l'unité.*

Je voudrais remercier particulièrement les personnes qui m'ont aidé lors de mon stage à Adrar :

- ❖ *Un grand merci à DAHOU Amine pour son aide plus que précieuse et son amitié et toute sa famille, je ne peux pas oublier mes amis de toujours, avec lesquelles j'ai partagé des bons moments Wiam, Asma, Zeinab, Wafa, et toutes les autres, aussi à mes chers amis Houitchi toufik, Nassima et sa sœur Nafissa.*
- ❖ *Les remerciements ne seraient rien sans une mention particulière à l'ensemble de mes professeurs et mes amis à l'Université de Saad Dahlab.*
- ❖ *Pour faire tout ceci n'aurait pas été possible sans l'amour et le soutien de ma famille. Mon père, Ma mère, Mon frère et Mes sœurs et Mes chères tentes, merci de tout cœur pour les petites ou grandes choses que vous avez fait pour moi.*
- ❖ *Enfin, j'adresse une pensée amicale à toutes les personnes qui je n'ai pas citées et qui ont de près ou de loin m'ont aidé.*



الملخص :

في ظل سياسة التنمية المستدامة المتبعة في أغلبية دول العالم، تعتبر الموارد البيولوجية واحدة من الحلول الناجعة و المستعملة حاليا. من بين أساليب ترمين الكتلة الحيوية هي عملية التخمير، و هي عبارة عن عملية طبيعية تقوم على تحويل الكتلة الحيوية إلى طاقة. في هذه الدراسة يتم التركيز على دراسة عملية التخمير للكتلة العضوية للنفايات الصلبة المنزلية لولاية البلدية، و كذا رصد بعض المعايير كاستقرار الرقم الهيدروجيني، DCO , DBO_5 , و حجم الغاز المنتج. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو الترمين الطاقوي للكتلة الحيوية بإنتاج غاز حيوي غني بالميثان. كانت التجارب ناجحة في الحد من DCO و DBO_5 بنسبة % 76,33 و % 48 على التوالي، مع إنتاج غاز حيوي غني بالميثان قابل للاشتعال الذي تجاوز حجمه 4700 مل.

المفاتيح : التخمير بغياب الأكسجين، الغاز الحيوي، النفايات الحضرية الصلبة، ولاية البلدية، الترمين الطاقوي، DCO , DBO_5 .

Résumé :

Les bioénergies sont au cœur de l'actualité internationale, la biomasse est l'une des solutions rentables couramment utilisée. Parmi les différents modes de valorisation de la biomasse est la digestion anaérobie. Dans ce travail l'intérêt est porté sur l'étude de ce processus sur la fraction organique des déchets ménagers de la ville de Blida et le suivi de certains paramètres de stabilité du digesteur tels que le pH, DCO , DBO_5 , et le volume du biogaz produit. L'objectif principal de cette étude est de donner une valeur énergétique aux déchets ménagers par la production d'un biogaz riche en méthane. Les essais étaient concluants par la réduction de la DCO et la DBO_5 avec un taux de 76.33% et 48% respectivement, avec l'obtention du biogaz inflammable qui a dépassé son volume 4700 ml riche en méthane.

Mots clés : digestion anaérobie, biogaz, déchets solides urbains, wilaya de Blida, valorisation énergétique, DCO , DBO_5 .

Abstract:

Since the sustainable development is adopted in the majority of countries in the world, biological resources are one of the effective solutions currently used. Among the different methods of valuing biomass is anaerobic digestion, natural process of the biomass transformation into energy. In this research the focus is on the study of this process of the organic fraction of household waste of the city of Blida and monitoring of certain parameters such as stability of the digester pH, COD, BOD₅, and the volume of biogas produced. The main objective of this study is the valorization of biomass by production of biogas rich in methane. The tests were successful by reducing the COD and BOD₅ with a rate of 76.33% and 48% respectively, and the award of 4700 ml of biogas flammable rich in methane.

Key words: anaerobic digestion, biogas, urban solid waste, Blida, energetic valorization, DCO , DBO_5 .

ABREVIATION

ADEM	<i>Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie</i>
AGLC	<i>Acide Gras à Longue Chaine</i>
AGV	<i>Acide Gras Volatile</i>
A.O.A.C	<i>Association of Official Agricultural Chemists</i>
CET	<i>Centre d'Enfouissement Technique</i>
C/N	<i>Rapport Carbone / Azote</i>
COV	<i>Composés organique volatils</i>
CPG	<i>Chromatographie à Phase Gazeuse</i>
DCO	<i>Demande Chimique en Oxygène</i>
DSU	<i>Déchets solides urbains</i>
DBO ₅	<i>Demande Biologique en Oxygène de cinq jours</i>
Gwh	<i>Gigawatt-heure</i>
hab	<i>habitant</i>
J	<i>Jour</i>
J.C	<i>Jésus-Christ,</i>
K cal	<i>Kilo calorie</i>
M	<i>Masse</i>
MS	<i>Matière Sèche</i>
MO	<i>Matière Organique</i>
MATE	<i>Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement</i>
PC	<i>Pouvoir Calorifique</i>
PED	<i>Pays En Développement</i>

PI	<i>Pays Industrialisés</i>
ppm	<i>Partie par million</i>
spp	<i>Subspecies</i>
TRH	<i>Temps de Rétention Hydraulique</i>
Twh	<i>Térawatt-heure</i>
V	<i>Volume</i>
% V	<i>pourcentage en Volume</i>

Table des matières

RESUME

REMERCIEMENTS

Table des matières

Table des figures

Liste de tableaux

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : Mise au point bibliographique	
I.1. Energie renouvelable.....	4
I.2. Biomasse.....	5
I.2.1. Définition.....	5
I.2.2. Ressources de la biomasse	5
I.2.3. Procédés de conversion de la biomasse	6
I.2.3.1. Processus thermochimique.....	6
I.2.3.2. Processus biochimique	7
I.3. Méthanisation	7
I.3.1. Définition	7
I.3.2. Historique	8
I.3.3. Etapes de la méthanisation	11
I.3.3.1. Hydrolyse.....	11
I.3.3.2. Acidogénèse.....	12
I.3.3.3. Acétogénèse.....	13
I.3.3.4. Méthanogénèse	13
I.4. Digesteur	14
I.4.1. Classification des différents types de digesteurs.....	15
a. Le mode de l'alimentation.....	15
b. Le type de substrat	16
c. Le nombre d'étapes	16

I.5. Substrat	17
I.5.1. Déchets d'élevages.....	19
I.5.2. Eaux usées	20
I.5.3. Déchets des industries	20
I.5.4. Déchets ménagers	22
a- Composition des déchets ménagers.....	23
b- Modes d'élimination et de traitement des déchets en Algérie	24
I.6. Différents paramètres influençant la méthanisation	24
I.6.1. Température	26
I.6.2. pH	28
I.6.3. Absence de l'oxygène	28
I.6.4. Rapport C / N	29
I.6.5. Brassage.....	29
I.6.6. Pression partielle en hydrogène	30
I.6.7. Humidité	31
I.6.8. Temps de rétention hydraulique (TRH)	31
I.6.9. Absence des inhibiteurs	31
a. Oxydants	32
b. Ammoniaque	32
c. Acides volatils	32
d. Métaux lourds	32
e. Cations	32
I.7. Biogaz	33
I.7.1. Définition et composition	33
I.7.2. Valeur énergétique	34
I.7.3. Purification du biogaz	35
I.8. Les avantages et inconvénients de la digestion anaérobie	37

CHAPITRE II :

1- Matériel et méthodes

II.1.1. Origine et caractérisation du substrat utilisé	39
--	----

II.1.2. Prétraitement du substrat	40
II.1.3. Description du digesteur et dispositif utilisé	42
II.1.4. Conditions opératoires	43
II.1.5. Méthodes d'analyses	43
II.1.5.1. Détermination de taux la matière sèche (MS)	43
II.1.5.2. Détermination de la teneur en matière organique (MO)	44
II.1.5.3. Paramètre suivis	46
II.5.3.1. pH	47
II.5.3.2. Volume de biogaz produit	48
II.5.3.3. La détermination de la DCO	49
II.5.3.4. La détermination de la DBO ₅	51
II.1.5.4. Inflammabilité du biogaz	53
II.1.5.5. Composition du biogaz produit	53

2- Résultats et discussion

II.2.1. Caractérisation du substrat :	
a- Taux de la matière sèche	54
b- Taux d'humidité	54
c- Taux de la matière organique du substrat avant la digestion	54
d- Taux de la matière organique du substrat avant la digestion	54
II.2.2. Description du digesteur au cours de la méthanisation	55
II.2.3. Évolution des paramètres de fonctionnement :	
II.2.3.1. Évolution du pH	57
II.2.3.2. Production de biogaz.....	58
II.2.3.3. Inflammabilité du biogaz	60
II.2.3.4. La détermination de différentes phases de la méthanisation	61
II.2.4. Évolution des paramètres d'épuration	61
II.2.4.1. Variation de la demande chimique en oxygène (DCO)	63
II.2.4.2. Variation de la demande biochimique en oxygène pendant cinq jours (DBO ₅)	64
II.2.5. Composition du biogaz produit	65
CONCLUSION	66
REFERENCES	

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Répartition des ressources de production d'énergie mondiale en 2012	1
Figure I.1 : Production mondiale de l'électricité basée sur les énergies renouvelables	4
Figure I.2 : Potentiel technique de production de l'énergie à partir de la biomasse	5
Figure I.3 : Processus de conversion thermochimique, leurs produits intermédiaires et leur utilisation finale	6
Figure I.4 : Histoire de la méthanisation	9
Figure I.5 : Schéma simplifié de la digestion anaérobie de produits organiques	10
Figure I.6 : Différentes formes de digesteurs	14
Figure I.7 : Système de chauffage à l'intérieur d'un digesteur	14
Figure I.8 : Exemple d'un digesteur construit en inox	14
Figure I.9 : Réacteur continu infiniment mélangé pour les effluents d'élevage	15
Figure I.10 : Installation au biogaz avec plusieurs digesteurs infiniment mélangé	16
Figure I.11 : L'évolution du potentiel méthanogène pour des différents types de substrats..	17
Figure I.12 : Quelques exemples de matières entrantes	18
Figure I.13 : Production des déchets solides urbains par rapport à la densité	22
Figure I.14 : Composition des déchets ménagers (Algérie)	22
Figure I.15 : Modes d'élimination des déchets en Algérie	23
Figure I.16 : Décharge sauvage d'Oued Bou Arfa.....	23
Figure I.17 :Taux de production de biogaz en fonction de la température	24

Figure I.18 : Effet de l'oxygène sur les différentes phases de la digestion anaérobie	28
Figure I.19 : Equivalences énergétiques de 1 m ³ de méthane	36
Figure I.20 : Différentes voies de valorisation du biogaz	37
Figure II.1 : Photo du substrat utilisé	39
Figure II.2 : Photo du substrat après le découpage et le séchage	39
Figure II.3 : Photo de digesteur utilisé vide	40
Figure II.4 : Photo de digesteur rempli avec le substrat et l'eau	41
Figure II.5 : Photo des réacteurs dans un bain marie chauffé et régulé à 37°C	42
Figure II.6 : Photo de l'étuve utilisée	43
Figure II.7 : Echantillon après dessiccation.....	42
Figure II.8 : Photo du Four à moufle	44
Figure II.9 : Photo de pH- mètre utilisé	46
Figure II.10 : Photo de dispositif de mesure du volume du biogaz produit	47
Figure II.11 : Centrifugation	48
Figure II.12 : Photo du Thermo réacteur	49
Figure II.13 : Photo du système utilisé pour la mesure de la DBO ₅	51
Figure II.14 : Teste d'inflammabilité du biogaz	52
Figure II.15 : Photo d'une bouteille remplie avec le biogaz	54
Figure II.16 : Changement du substrat au cour de la digestion anaérobie	56
Figure II.17 : Evolution du pH en fonction du temps	57
Figure II.18 : Cinétique de production cumulée du biogaz.....	58

Figure II.19 : Cinétique de Production journalière du biogaz	59
Figure II.20 : Teste d'inflammabilité du biogaz produit.....	60
Figure II.21 : Détermination des différentes phases de la méthanisation.....	62
Figure II.22 : Variation de la de la DCO en fonction du temps.....	63
Figure II.23 : Variation de la de la DBO ₅ en fonction du temps.....	64
Figure II.24 : Résultat donnée par CPG lors d'analyse du gaz naturel	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Principaux groupes microbiens impliqués dans l'étape d'hydrolyse.....	11
Tableau I.2 : Métabolites des bactéries fermentaires de la digestion anaérobie.....	12
Tableau I.3 : Bactéries acétogènes de la digestion anaérobie	13
Tableau I.4 : Valeurs indicatives des rendements de production pour quelques déchets d'élevages	19
Tableau I.5 : Potentialités de production de biogaz à partir des différents types de déchets agro-industriels	20
Tableau I.6 : Caractéristiques quantitatives et qualitatives des déchets ménagers dans les PED et les PI	21
Tableau I.7 : Evolution des quantités des déchets par habitant	21
Tableau I.8 : Comparaison de la digestion en conditions mésophiles et thermophiles	26
Tableau I.9 : Effet du pH décrit dans la littérature sur la digestion anaérobie	28
Tableau I.10 : Début de production du biogaz en fonction du taux de dilution	30
Tableau I.11 : Temps de rétention concernant le lagunage anaérobie	31
Tableau I.12 : Différents exemples de TRH suivant le procédé de digestion anaérobie employé	32
Tableau I.13 : Concentrations en ions provenant la stimulation ou l'inhibition de la méthanisation	33
Tableau I.14 : Principaux composés autres que CH ₄ présents dans le biogaz et leurs effets	
Tableau I.15 : Comparaison du biogaz selon ses origines.....	35
Tableau I.16 : Composés à éliminer par traitement selon le mode de valorisation du	

biogaz.....	36
Tableau I.17 : Les composés et leur technique d'élimination	37
Tableau II.1 : Suivi de l'inflammabilité du biogaz.	61
Tableau II.2 : Taux des différents composés du biogaz produit	65
Tableau II.3 : Taux des différents composés du gaz naturel	65

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, voire tripler à l'horizon 2050.

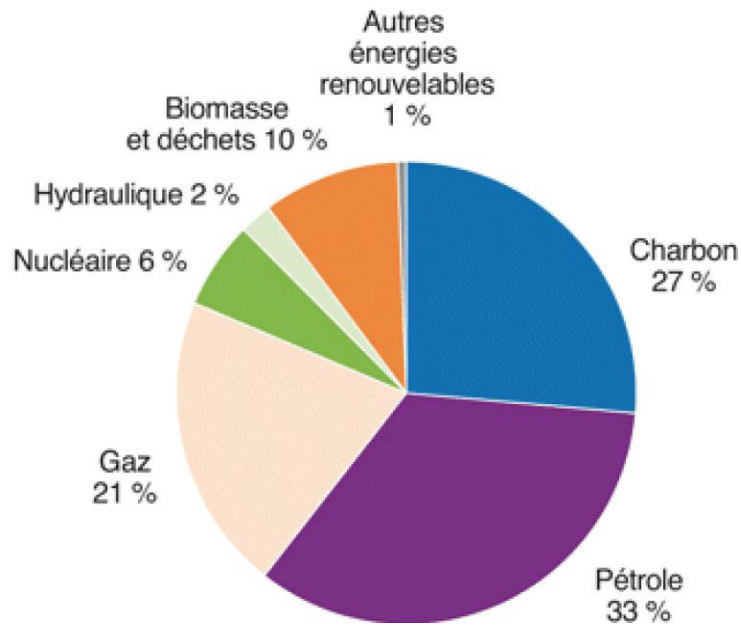


Figure 1 : Répartition des ressources de production d'énergie mondiale en 2012. [1]

D'après la (figure.1), on remarque que les combustibles fossiles sont la source la plus utilisée (81%) [2], mais partant du postulat, unanimement admis par l'ensemble de la communauté universelle, le pétrole qui représente 33 % des énergies fossiles est appelé à disparaître et que la perspective de son épuisement est inévitable, ainsi plusieurs auteurs ont montré l'impact de ce type d'énergies sur l'environnement car les changements climatiques sont causés par l'utilisation actuelle de l'énergie [3]. D'après le rapport de Bataille et al., la production d'électricité et l'ensemble de la branche énergie ont été responsables de 40% des émissions mondiales de CO₂ [2]. Cette situation fait apparaître combien il est urgent de trouver de nouvelles sources énergétiques alternatives, propres et inépuisables, ces énergies ne sont autres que les énergies renouvelables. Elles consistent à utiliser directement les éléments naturels (Soleil, vent, eau...etc.).

Depuis le sommet de Kyoto (1997) et de Johannesburg (2002) et puis celui de Poznan en 2008, la communauté internationale a pris conscience progressivement des enjeux du développement durable et de la nécessité de transformer nos repères culturels, nos modes de vie et nos stratégies de recherche et de développement pour les relever. Tous les pays ont été invités à élaborer des stratégies de développement durable afin de mettre en plus des politiques globales cohérentes [4]. Le concept du développement durable peut se résumer en trois "E" : Environnement, Energie et Economie, donc pour assurer un développement durable il faut pour cela trouver un juste équilibre entre prospérité économique, besoin énergétique et protection de l'environnement.

Actuellement nos modes de production et de consommation se traduisent par une exploitation excessive et croissante des ressources naturelles, ils affectent le climat, la diversité biologique, et conduit à une augmentation du gisement de déchets, au cours des deux dernières décennies, la question de la gestion des déchets est devenue de plus en plus complexe autant pour les pays du Nord que pour ceux du Sud.

En Algérie la pollution de l'eau, de l'air et des sols par les déchets municipaux, industriels et agricoles est en nette d'évolution de jour en jour. Plusieurs décharges sauvages sont apparues. Ceci génère des impacts négatifs directs sur l'environnement par la création des polluants et constitue des risques majeurs pour la santé de la population, cela pousse les gouvernements et les industries à rechercher des solutions technologiques permettant un traitement efficace et moins coûteux des déchets. Parmi les différentes solutions envisagées d'un côté en matière de traitement et valorisation des déchets organiques et d'un autre côté pour une production d'une énergie propre est le procédé de la méthanisation. Ce dernier fait aujourd'hui l'objet d'un fort regain d'intérêt, suite aux chocs pétroliers des années 70 la méthanisation s'est fortement développée en Europe. Ce procédé est considérée comme la technologie la plus avantageuse pour le traitement des déchets et capable d'apporter une réponse à une très grande partie des problèmes posés par les effluents organiques, tout en réduisant une partie importante de la charge organique polluante de ces déchets. Elle permet de valoriser les différents types de déchets (déchets urbains, boues d'épuration, déchets d'élevages et agricoles et déchets industriels) et de produire de l'énergie renouvelable sous forme de biogaz. C'est pour cela elle est présentée comme une solution miraculeuse qui s'intègre dans un cercle vertueux du développement durable.

Le but de notre travail c'est donner une valeur énergétique à la biomasse, pour cela nous avons réalisé une simple expérience biologique qui a résulté un gaz inflammable riche en méthane. 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.

Pour mener à bien notre travail, nous avons opté pour le plan suivant :

- Une introduction générale de ce travail.
- Un premier chapitre relatif à la synthèse bibliographique, sur les énergies renouvelables et les différents processus de valorisation de la biomasse, plus particulièrement le processus de la méthanisation qui est l'objectif de notre étude, un historique de sa mise en oeuvre est présenté rappelant les différents types de déchets qui peuvent être valorisés par le procédé de digestion anaérobie. De plus une explication des différentes étapes de la digestion anaérobie à savoir l'hydrolyse, l'acidogène, l'acétogène et finalement la méthanogène, avec en plus les populations bactériennes qui sont mises 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.
- Un deuxième chapitre est consacré aux matériels utilisés dans la partie expérimentale et les différentes techniques et les méthodes employées pour le suivi opérationnel des digesteurs, ainsi que les résultats obtenus.

Enfin, ce mémoire sera achevé par une conclusion générale.

CHAPITRE I : Mise au point bibliographique

I.1. Energie renouvelable :

L'énergie renouvelable est toute énergie qui provient d'une source naturelle renouvelable (eau, soleil, vent, croissance végétale...). Les énergies renouvelables sont aussi appelées énergies vertes, puisque elles n'exercent que peu d'impacts négatifs sur l'environnement et la santé humaine, en particulier, leur exploitation ne donne pas lieu à des émissions de gaz à effet de serre ou à des déchets dangereux [6].

Toutes les ressources renouvelables sont en forte croissance, la figure (I.1) donne un aperçu sur la répartition de la production d'électricité entre les différentes sources renouvelables ainsi que leurs prévisions pour les années à venir [7].

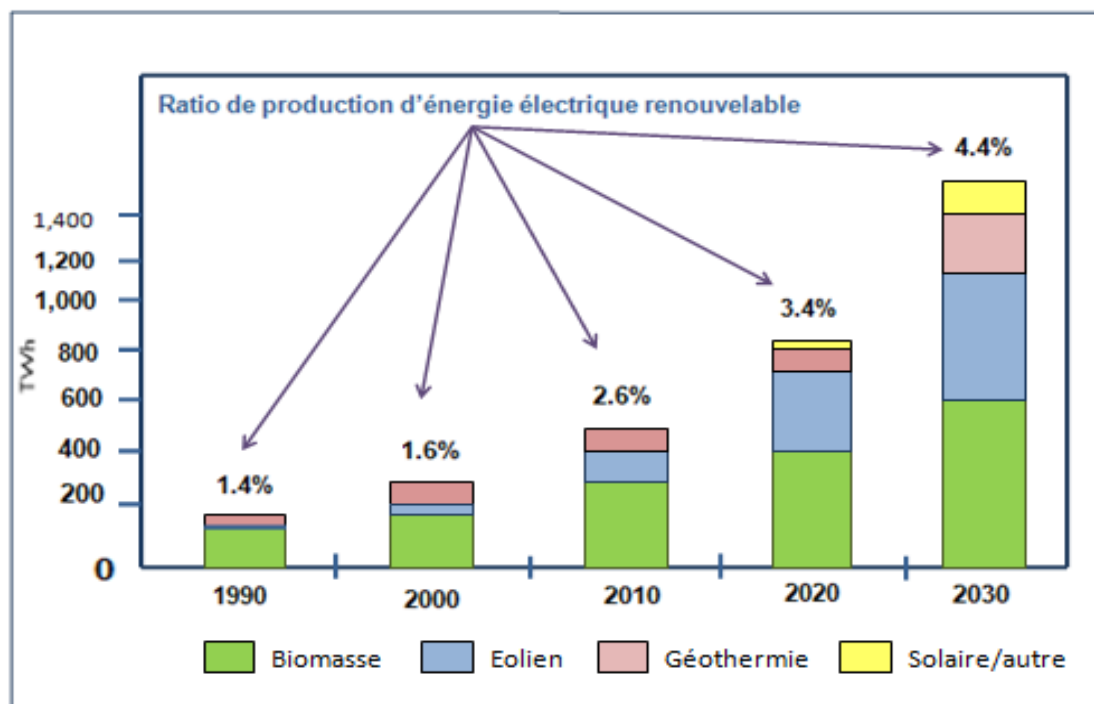


Figure I.1 : Production mondiale de l'électricité basée sur les énergies renouvelables [7].

Ces énergies ne couvrent encore que 20% de la consommation mondiale en énergie, mais elles semblent la solution d'avenir, et les prochaines années s'annoncent prometteuses pour ces énergies propres. Les recherches et les investissements sont en croissance dans les différents pays et l'après-pétrole reste une réalité qui s'incruste dans les esprits, une évidence qui s'impose d'elle-même et les pays sont de plus en plus nombreux à réfléchir, sérieusement à cette éventualité, mais la question qui se pose est ce que notre pays participe vraiment à cette compétition mondiale dans ce domaine ?

I.2. Biomasse :

I.2.1. Définition :

Il existe plusieurs manières de stocker et convertir l'énergie, la biomasse est considérée comme la plus ancienne des ressources énergétiques de l'humanité et utilisée jusqu'à nos jours, elle désigne toute matière d'origine végétale ou animale de la surface terrestre [8]. Chaque année grâce à la photosynthèse, les plantes utilisent l'énergie solaire pour capturer le gaz carbonique et le stocker sous forme d'hydrate de carbone [9]. Elles stockent environ 10 fois la présente consommation annuelle d'énergie [8]. D'après Abassi et al., [10], la biomasse contribue environ 14% de l'approvisionnement en énergie primaire dans le monde après le pétrole et le gaz naturel.

I.2.2. Ressources de la biomasse :

Les ressources de la biomasse sont variées, la première ressource utilisée est le bois et ses déchets (64 %) [8], les déchets sont la deuxième source de bioénergie, ces déchets regroupent les déchets urbains et industriels, déchets d'agriculture, ainsi que les déjections animales [7]. De leur part Chiniweth et Belkadi [11; 8] ont montré que la biomasse marine est aussi considérée comme une source potentielle d'énergie.

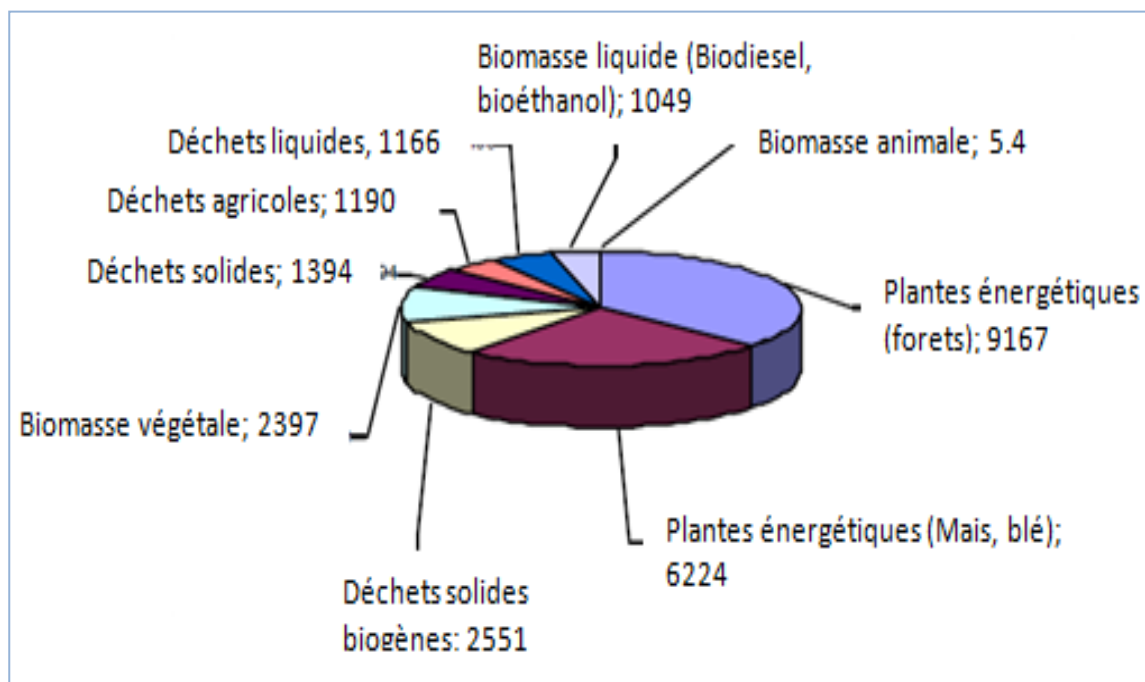


Figure I.2 : Potentiel technique de production de l'énergie à partir de la biomasse (GWth/an) [12].

I.2.3. Procédés de conversion de la biomasse :

Selon Goayal et al., [13], il existe deux processus pour la conversion de la biomasse en produits énergétiques sous forme liquide, gaz ou solide qui sont :

- Processus thermochimiques.
- Processus biochimiques.

I.2.3.1. Processus thermochimique :

D'après Cantrell et al., [14], la conversion thermochimique est un processus de reformage à haute température qui coupe les liaisons de la matière organique et transforme ses intermédiaires en charbon, gaz de synthèse ou bio-huile, voici un schéma qui représente les différents processus thermochimiques.

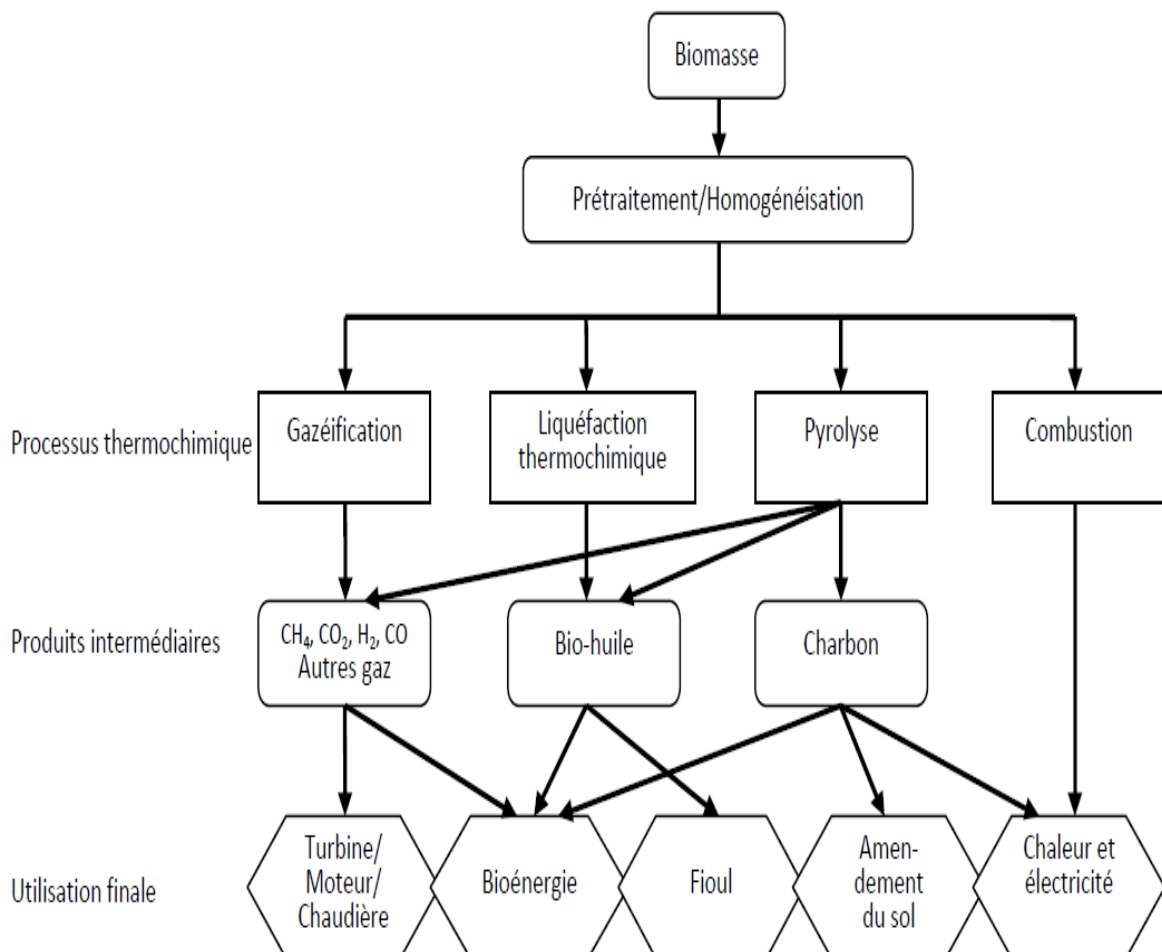


Figure I.3 : Principaux processus de conversion thermochimique, leurs produits intermédiaires et leur utilisation finale [8].

I.2.3.2. Processus biochimique :

Il existe plusieurs processus de conversion biochimique, tel que le processus étudié à l'échelle laboratoire qui utilise les microorganismes photosynthétiques, comme les algues et les processus fermentatifs pour la production du bio-hydrogène. Il existe également la production biologique du méthanol à travers la conversion enzymatique du gaz carbonique et du méthane qui sont produit par la digestion anaérobie [8]. De sa part Demibas [15] a montré l'efficacité de la fermentation alcoolique, qui utilise les végétaux qui contiennent le sucre (cane à sucre, le blé, betterave à sucre.....) pour produire de l'éthanol par la voie biologique. Mais le traitement des matières organiques utilisant la technologie biologique est dominé par la digestion anaérobie ou bien la méthanisation avec une production à grande échelle du biogaz combustible [16].

I.3. Méthanisation :**I.3.1. Définition :**

La méthanisation, ou encor appelée «digestion anaérobie » est la transformation en absence d'oxygène à l'aide des populations bactériennes qui sont en interaction de la matière organique en un biogaz composé principalement de méthane (CH₄) et de gaz carbonique (CO₂).En plus de ces produits, on peut trouver aussi sous forme de traces de l'azote (N₂), de l'hydrogène sulfuré (H₂S) et de l'ammoniac (NH₃) faisant intervenir essentiellement [17 ; 18 ; 19]. Cette technologie permettant efficacement la production d'une énergie propre et renouvelable et aussi l'une des voies de dégradation des matières organiques qu'elles soient d'origines végétales ou animales [20 ; 21].

La digestion est conduite dans des enceintes confinées, appelées digesteurs, à l'intérieur des quelles les réactions de fermentation sont optimisées et contrôlées [17], Gaëlle Le Guen [22] a constaté que la matière organique entrante peut être dégradée jusqu'à 80 %.

I.3.2. Historique :

Des études historiques indiquent que l'utilisation du biogaz était par les Assyriens dix siècles avant J.C. La redécouverte de la méthanisation remonte au dix-huitième siècle, précisément en 1776, lorsqu'Alessandro Volta, un physicien italien, remarque la présence d'un gaz émis par les vases en putréfaction d'un marais (le lac Maggiore au nord de l'Italie). Il a étudié ensuite ce gaz, et il l'a appelé « gaz des marais ». En 1787 Antoine Lavoisier a appelé ce gaz « gaz hydrogène carboné » et ce n'est qu'en 1865 que le terme méthane fut proposé et confirmé en 1892 par un congrès international de nomenclature chimique (C.I.N.C)

Dès le début du dix-neuvième siècle en 1808, Sir Humphry Davy, physicien et chimiste britannique, a étudié la fermentation anaérobie du fumier et la première installation de méthanisation a été construite en 1859 dans une colonie britannique à Bombay en Inde. Plusieurs agronomes et biologistes ont essayé de travailler sur ce sujet bien que les moyens de recherche étaient timides pendant le dix-neuvième siècle. C'est pourquoi nous nous contentons de citer ces derniers travaux.

Après la première guerre mondiale, la méthanisation a émergé en tant que source énergétique en raison de la rareté et de la cherté des sources locales. En particulier, la méthanisation des boues de stations d'épuration urbaines a été conduite par les travaux de l'Allemand Karl Imhoff qui s'est intéressé à la valorisation du biogaz. En parallèle, Ducellier et Isman ; enseignants à l'école nationale d'agriculture d'Alger, ont travaillé sur la méthanisation du fumier et des effluents de l'élevage. La méthanisation dans le milieu agricole a ainsi connu une révolution après la seconde guerre mondiale, durant les années cinquante et soixante cette technologie a reculé rapidement et a été presque oubliée avec l'arrivée des sources énergétiques fossiles moins coûteuses et facilement disponibles.

Cependant, concernant le traitement dans les stations d'épuration, la méthanisation a gardé son rôle comme une technique efficace pour le traitement et la stabilisation des boues urbaines, surtout en Allemagne. Le choc pétrolier de 1973 et l'inquiétude d'une possible pénurie d'énergie fossile ont montré la nécessité de chercher d'autres sources énergétiques renouvelables ou alternatives au pétrole. De fait, l'intérêt des énergéticiens s'est à nouveau porté sur la méthanisation comme une des solutions à ces problèmes.

La méthanisation est retombée dans l'oubli au milieu des années quatre-vingt suite à la baisse du prix du pétrole, les installations de la méthanisation ont perdu leur rentabilité et les projets envisagés se sont arrêtés. À partir des dernières années du vingtième siècle, la méthanisation resurgit comme étant une technique efficace pour le traitement des polluants. En particulier, avec la prise de conscience internationale du besoin croissant de protéger l'environnement et de développer des solutions aux problématiques « énergie-eau-déchets » dans un contexte de changement global.

Les fluctuations du prix du pétrole et les soucis continus dans les zones de production ont contribué aussi à réveiller les intérêts vers la digestion anaérobie. Surtout, avec les avancements technologiques dans ce domaine comme la multiplication des applications de valorisation puisque le biogaz est convertible en pratiquement toutes les formes utiles d'énergie. Nous présentons dans la (figure I.4) [23], quelques éléments de l'histoire de la méthanisation depuis sa redécouverte et sa formalisation par Alessandro Volta en 1776 jusqu'à nos jours.

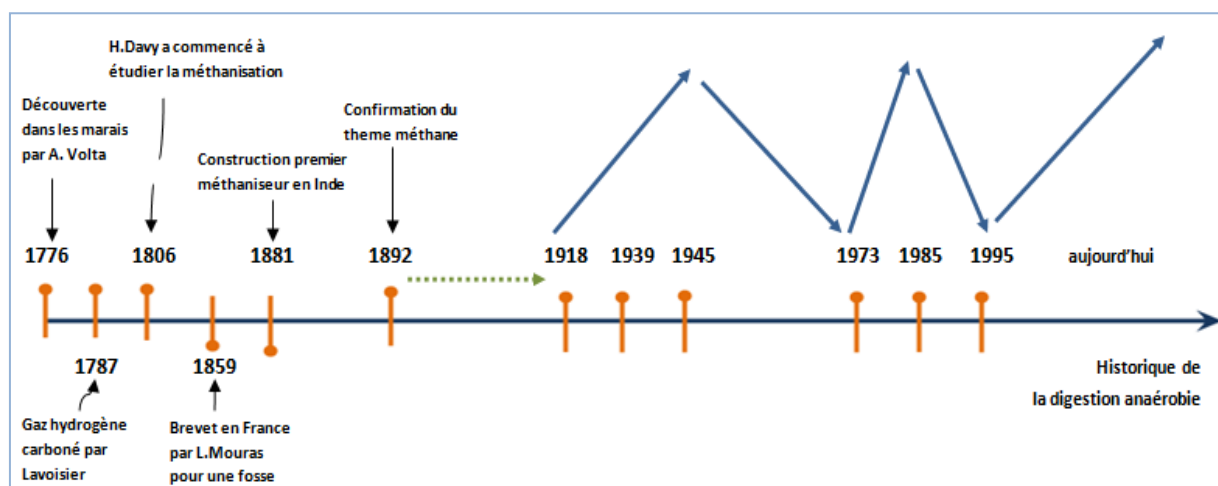


Figure I.4 : Histoire de la méthanisation [23].

La méthanisation émerge maintenant comme une technique efficace et économique dans de nombreux pays surtout en Europe et dans plusieurs secteurs avec la production d'un carburant gazeux, utilisé comme carburant ou injecté après épuration dans le réseau du gaz naturel. De nos jours le pays qui concentre le plus d'unités de méthanisation est l'Allemagne avec plus de 4000 unités, le second pays est l'Autriche avec 200 unités. D'après un article d'ADEM (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) en 2011 [24], les unités de traitement mécano-biologiques installées dans une quinzaine de pays européens permettent de traiter autour de 8.5 millions de tonnes de déchets par an.

1.3.3. Etapes de la méthanisation :

La digestion anaérobie est donc un processus microbiologique naturel qui peut être décomposé selon Wheatley [25] en 4 étapes. Dans chacune de ces étapes, une catégorie bien précise de bactéries entre en jeu. En 1978, Kaspar [26], proposait déjà un schéma représentant les flux des différents substrats pendant la dégradation anaérobie de la matière organique particulaire. Voici une version modifiée de schéma simplifié est représenté sur la figure (I.5).

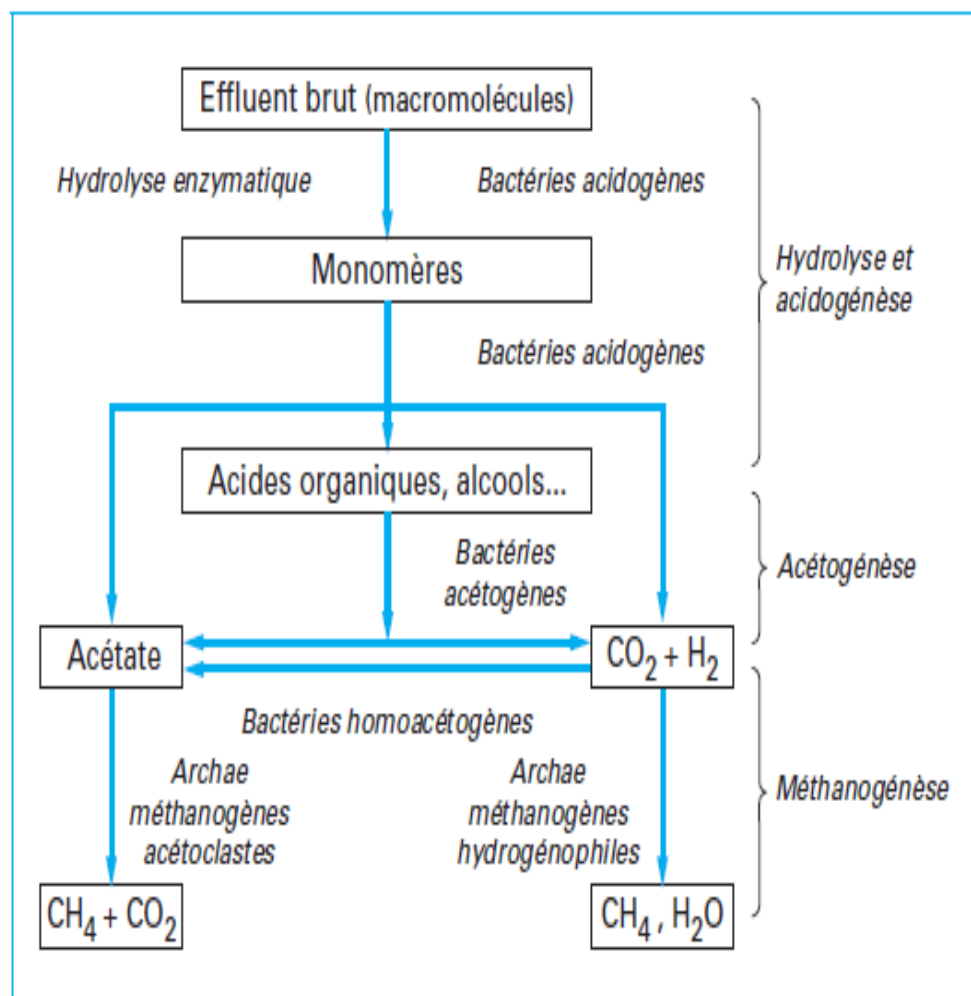


Figure I.5 : Schéma simplifié de la digestion anaérobie [26].

I.3.3.1. Hydrolyse :

L'hydrolyse est la première étape de conversion de la matière organique durant laquelle les macromolécules qui composent la matière organique se dégradent en petites molécules solubles [27 ; 28]. Selon le substrat utilisé, les produits d'hydrolyse sont différents [25]. D'après Vidal et al., l'hydrolyse des lipides libère du glycérol, des acides gras volatils (AGV) et des acides gras à longues chaînes (AGLC). Et selon Palmisano et Barlaz [18] l'hydrolyse des protéines, libère des polypeptides et des acides aminés. L'hydrolyse n'est pas un mécanisme obligatoire de la fermentation méthanique, mais une étape obligatoire pour la solubilisation des complexes organiques insolubles non disponibles pour les microorganismes. Riviere [29], a montré certains groupes connus qui sont récapitulés en fonction du substrat dégradé dans le tableau suivant :

Tableau I.1 : Principaux groupes microbiens impliqués dans l'étape d'hydrolyse [29] :

Substrat hydrolysé	Groupes microbiens impliqués
Cellulose	Acetivibrio cellulolyticus Bacterioides succinogenes Butyrivibrio fibrisolvens Bactériodes spp. Clostridium spp.
Lipides	Anaerovibrio lipolytica Syntrophomonas spp. Bacillus spp.
Protéines	Bacteroides spp. Peptococcus spp. Clostridium spp. Butyrivibrio spp.
Composés azotés	Clostridium Bifidobacterium spp. Micrococcus aerogenes

I.3.3.2. Acidogénèse :

Kôkôh Rose [18], a défini cette étape par la transformation des molécules simples produites lors de l'hydrolyse (acides aminés, sucres, acides gras longues chaînes) en composés organiques simples à courte chaîne (2 à 6 carbones) et en acides gras volatils (AGV) de faible masse moléculaire tels que les acides lactique, acétique et propionique. Les composés neutres des alcools (éthanol, méthanol), de glycérol et d'acétone, l'eau, le dihydrogène, le dioxyde de carbone sont également produits. Les bactéries qui participent à cette étape peuvent être anaérobies strictes ou facultatives avec un temps de duplication très court (de 30 minutes à quelques heures), Moletta et al., a regroupé les principaux genres connus ainsi que les métabolites produits dans le tableau (I.2).

Tableau I.2 : Métabolites des bactéries fermentaires de la digestion anaérobie. [29]

Métabolites	Espèces
Acétate	acetivibrio spp. Acetobacterium spp. Clostridium spp. Pelobacter spp.
Butyrate	Butyrivibrio spp. Fusobacterium spp.
Lactate	Lactobacillus spp. Streptococcus spp.
Acétate, propionate	Propionibacterium spp. Veillonella spp.
Acétate, lactate	Bifidobacterium spp .
Acétate, lactate, formate	Ruminococcus spp.

Selon Mottet [29], la vitesse de cette étape est très élevée, le métabolisme plus rapide de ce groupe trophique entraîne une accumulation d'intermédiaires en particulier d'hydrogène et d'acétate. D'après Jarvis *et al.*, [17] ; ces métabolites ont une action inhibitrice sur les micro-organismes acétogènes et méthanogènes et peuvent être responsables de l'arrêt de la digestion anaérobie. Les études faites par Williams [25] ont montré que le biogaz produit au cours de cette phase tout comme lors de l'hydrolyse, est principalement composé de CO₂ (80%) et de H₂ (20%).

I.3.3.3. Acétogénèse :

Dans cette étape, les micro-organismes transforment les acides gras volatils et les alcools de l'étape précédente en hydrogène, gaz carbonique et acétates. L'hydrogène sulfuré se forme également lors de cette phase de transformation [27], c'est ici qu'interviennent des bactéries réductrices acétogènes et des bactéries sulfato-réductrices, consommant respectivement le CO₂ et les AGV, en présence de sulfate, de l'hydrogène sulfuré (H₂S).

Tableau I.3 : Bactéries acétogènes de la digestion anaérobie. [29]

Groupe		Espèce
Syntrophes		Syntrophomonas spp. Syntrophobacter spp. Syntrophus sp. Syntrotrophococcus spp.
Acétogène non syntrophes	sous-groupe 1 : fermentation du substrat → acétate	Butyribacterium spp. Peptococcus glycinophilus
	sous-groupe 2 : H ₂ + CO ₂ → acétate	Acetoanaerobiunoterae Acetobacterium spp. Clostridium spp. Eubacterium limosum Sporomusa spp.

I.3.3.4. Méthanogénèse :

Elle représente la dernière étape de la méthanisation ou le méthane apparaît. Les molécules à un ou deux atomes de carbone, l'acétate, l'hydrogène, et le bicarbonate sont converties en méthane par des micro-organismes méthanogènes [27]. En général, 70 % du CH₄ produit lors de la digestion anaérobie proviennent de la dégradation de l'acide acétique par les méthanogènes acétoclastes [29].

I.4. Digesteur :

Le digesteur, cœur où se réalise la méthanisation, appelé aussi fermenteur ou bioréacteur anaérobie. Il existe plusieurs formes de digesteur (ovoïde, cylindrique, ou bien continental), généralement construit en béton avec une protection interne en résine époxy mais pour les digesteurs de grande taille, l'acier vitrifié s'avère souvent plus compétitif.

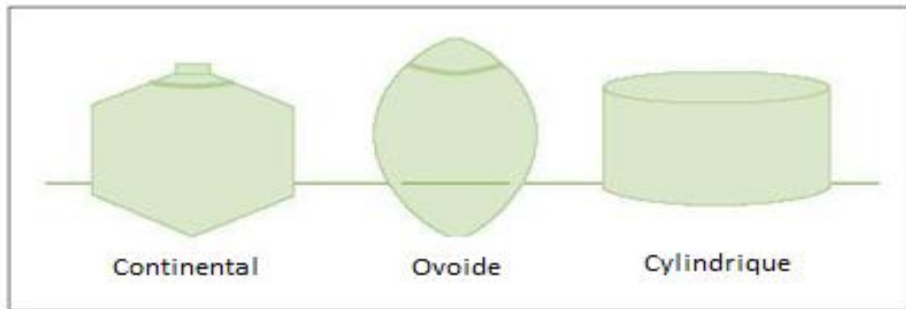


Figure I.6 : Différentes formes de digesteurs.

Le digesteur est constitué d'une cuve fermée, étanche à l'air et de préférence isolée thermiquement de l'extérieur dans laquelle les microorganismes se côtoient pour dégrader chimiquement et biologiquement les effluents organiques. Il peut être équipé d'un système de chauffage, d'un système d'agitation, d'un système de prélèvement et d'un système de mesure de teneur en gaz, de dispositifs permettant le contrôle de différents paramètres : la température, le pH, la pression ...etc.



Figure I.7 : Système de chauffage à l'intérieur d'un digesteur.



Figure I.8 : Exemple d'un digesteur construit en inox.

I.4.1. Classification des différents types de digesteurs :

Le choix du digesteur varie en fonction du type de déchets à traiter et de l'application projetée, on peut classer les digesteurs selon :

- a- Le mode de l'alimentation : batch ou continu;
- b- Le type de substrat : solide, semi solide ou liquide ;
- c- Le nombre d'étapes : mono ou bi étapes.

a- Le mode de l'alimentation :

i. Le digesteur batch ou discontinu :

Il a l'avantage d'une construction simple, le mode opératoire consiste à remplir le digesteur avec les substances organiques et laisser digérer, à la fin de la digestion, le digestat est évacué et le processus peut recommencer. Ces systèmes rustiques et d'une grande simplicité technique. Ils sont avantageux pour traiter les déchets solides comme les fumiers, les résidus agricoles, ou les ordures ménagères. La production de biogaz n'est pas régulière : au début de cycle, la production de biogaz est lente puis elle s'accélère, et atteint un taux maximal au milieu du processus de dégradation et chute enfin de cycle lorsque seuls les éléments difficilement digestibles restent dans le digesteur.

ii. Le digesteur continu :

Le substrat introduit de manière continue est digéré et déplacé soit mécaniquement soit sous la pression de nouveaux intrants vers la sortie sous forme de digestat. Le fonctionnement en continu, est bien adapté aux installations de grande taille.



Figure I.9 : Réacteur en continu pour les effluents d'élevage.

b- Classification selon le type de substrat :

- i. Solide : La teneur en matière sèche est supérieure de 15 %.
- ii. Semi solide ou pâteux : La teneur en matière sèche entre 5 et 15%.
- iii. Liquide : La teneur de la matière sèche est inférieure de 5%.



Figure I.10 : Installation de biogaz avec plusieurs digesteurs infiniment mélangés.

c- Classification selon le nombre d'étapes :

Selon les phases méthanogènes et l'acidogènes se déroulent dans le même réacteur ou dans 2 cuves séparées.

i. Le procédé en mono-étape :

Toutes les étapes de la digestion ont lieu dans la même enceinte, ils sont exploitables en continu ou en batch et principalement appliqués pour des substrats allant jusqu'à 40% de MS.

ii. Le procédé en bi-étape :

Ce type de digesteur sépare la phase d'hydrolyse et l'acidogènes dans une première étape, et la méthanogénèse dans une seconde étape [30]. La recirculation de la phase liquide présente l'avantage de ne pas nécessiter constamment l'ajout d'eau réchauffée. L'avantage des procédés bi-étape réside dans le fait que la décomposition de la matière solide est de l'ordre de quelques jours. Cette séparation des phases, réduit le risque d'intoxication des cellules méthanogènes liée à la présence des acides gras volatils lorsque l'étape d'acidogénèse n'est pas complètement terminée [31].

I.5. Substrat :

D'après certains auteurs, en particulier Moletta et al., [32]; plusieurs critères de la matière méthanisée sont à considérer :

- Le potentiel méthanogène comme important critère (c'est le volume maximal de méthane produit par une tonne de matière fraîche, plus le taux de matière organique est élevé, plus le volume de biogaz produit sera important, les graisses sont plus méthanogènes que les protéines ou les hydrates de carbone [21], voici un graphe qui montre le potentiel méthanogène pour des différents types de substrat (fig. I.11).

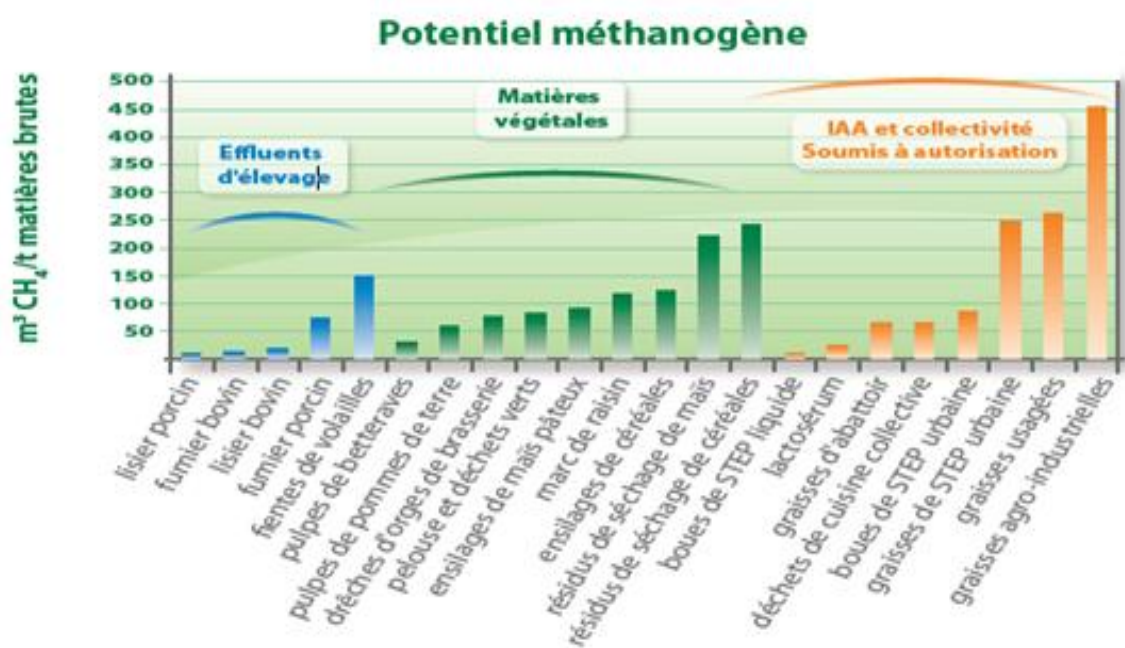


Figure I.11 : Evolution du potentiel méthanogène pour des différents types de substrats [21].

- La facilité de dégradation par les enzymes de la molécule ;
- Son accessibilité (solubilisation, hydrolyse.....) ;
- Sa toxicité pour le vivant.

Donc les substrats qui peuvent faire l'objet d'un traitement par digestion anaérobie sont essentiellement [21] :

- i. Les effluents d'élevage ;
- ii. Les eaux usées urbaines ;
- iii. Les déchets agro-alimentaires ;
- iv. La fraction organique des ordures ménagères.



Figure I.12 : Quelques exemples de matières entrantes [21].

a- fumier de bovin b- déchets de légumes et de fruits c- déchets de pâtisserie

Les interdits qui ne peuvent pas être destinés à la méthanisation [21]:

- Les ligneux (bois, branchage) : selon Chynoweth et al., [21], la lignine est non ou très faiblement consommée en digestion anaérobie. Or, dans les composés d'origine végétale, la lignine incruste plus ou moins la cellulose et les hémicelluloses ce qui peut limiter d'autant leur hydrolyse.
- Les inertes tels que les sables, les matières plastiques (non biodégradables) : ils peuvent perturber le fonctionnement du digesteur (sédimentation et/ou blocage des pompes).
- Les métaux lourds et les composés des produits organiques (pesticides, antibiotiques...) : ils perturbent le métabolisme des bactéries.

Dans les paragraphes qui se suivent, nous nous intéressons à détailler les différents substrats les plus utilisés dans le procédé de la méthanisation, en se basant sur les déchets ménagers qui font l'objet de la présente étude.

I.5.1. Déchets d'élevages :

Les déchets d'animaux d'élevage comme les porcs, les bovins, la volaille et les ovins, représentent une production importante de la matière organique digestible ce qui a été démontré par Kusch et al., [33] et Igoud et al., [34] et d'autres études. Ces déchets ont un potentiel méthanogène relativement faible mais elles apportent des bactéries fraîches. Une tonne d'effluents d'élevage permettrait de produire 100 à 300 kWh [21].

Tableau I.4 : Valeurs indicatives des rendements de production pour quelques déchets d'élevages [35].

Substrat	MS (%)	Rendement production (m ³ /t substrat)
Lisier de porcs	6	22
Lisier de bovins	8	21
Lisier de volailles	10 à 60	40 à 160
Fumier de porcs	20 à 25	45 à 60
Fumier de bovins	25 à 30	140 à 168
Fumiers de volailles	10 à 29	20 à 180
Fumiers d'équidés	28	35
Fumier d'ovins	15 à 25	50 à 74

I.5.2. Eaux usées :

Les différents systèmes d'épuration des eaux usées par voie aérobie produisent des boues récupérées au niveau des décanteurs, 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. Afin de réduire les nuisances olfactives et les volumes c'est ainsi que plusieurs auteurs Riviere [17], Mottet [29] et Effebe [18] ont consacré leurs premières recherches essentiellement sur ce type de substrat pour le procédé de la méthanisation.

I.5.3. Déchets des industries :

Les principales industries productrices des effluents polluants sont les industries laitières, les conserveries de légumes ou de fruits, les brasseries, les industries de la pomme de terre, les industries des pâtes et de papiers

Le tableau (I.5) suivant montre les potentialités de production de biogaz à partir des différents types de déchets agro-industriels.

Tableau I.5 : Potentialités de production de biogaz à partir des différents types de déchets agro-industriels [27].

Types de déchets	m ³ biogaz/kg matières organiques
Industrie laitière	0.60
Production et transformation de légumes	0.60
Transformation de la viande	0.50
Industrie sucrière	0.65
Moulins à céréales	0.40
Élaboration du café et du thé	0.60
Industrie papetière	0.35

I.5.4. Déchets solides urbains (DSU) :

Un résidu de la vie urbaine devient déchet à partir du moment où il a perdu une valeur d'usage pour la production. Les déchets ménagers constituent une source intéressante de substrat de fermentation anaérobie [36 ; 37].

D'après Ben Ammar [36], contrairement aux pays industrialisés où les déchets sont homogènes à l'intérieur d'un même pays et d'une même ville, les quantités et les qualités des déchets produits dans les pays en développement connaissent d'extrêmes variations selon le mode et le niveau de vie, le tissu urbain et la structure économique et industrielle.

Tableau I.6 : Caractéristiques quantitatives et qualitatives des déchets ménagers dans les pays en développement et les pays industrialisés [36] :

	PED	PI
Production de déchets ménagers (Kg/hab.jour)	0,1 à 1,8	1 à 1,5
Humidité (% du poids brut)	60 à 80 %	25 à 35 %
Matières organiques putrescibles (% du poids brut)	60 à 85 %	10 à 40 %
Matières recyclables (% du poids brut)	2 à 15 %	40 à 60 %

La réalité algérienne est marquée par un accroissement des flux de déchets conjugué à une poussée démographique et une saturation des infrastructures urbaines d'élimination des déchets. D'après l'étude faite par Kehila et al., [38], les déchets solides en Algérie sont essentiellement composés par des ordures ménagères avec un tonnage supérieur à 8.5 millions de tonnes en 2009 pour une population de 35 millions d'habitants, et la densité des déchets entrants évaluée (sur plusieurs sites) se situe entre 0,31 et 0,35 T/m³. Ces déchets ménagers dépasseront en 2020 les 12 millions de tonnes par an, alors qu'il est prévu 17 millions de tonnes à l'horizon 2030.

Tableau I.7 : Evolution des quantités des déchets par habitant : [38 ; 39 ; 40]

Année	Taux de génération Kg/h/j		
	1980*	2002**	2005**
Villes moyennes	0,5	0,6	0,8
Grandes villes	0,76	0,9	1,2

Les quantités de déchets en Algérie sont passées de 2.25 millions de tonnes en 1980 à 7.68 millions de tonnes en 2000. Dans le même contexte, une étude de MATE sur l'état de l'environnement en Algérie a indiqué que la production de déchets par habitant dans le milieu urbain est passée de 0.76 kg/jour en 1980 à 0.9 kg/jour en 2002, pour arriver à 1.2 kg/jour en moyenne en 2005 [41]. D'après Loudjani [42], l'Algérie génère chaque année 10 à 12 millions de tonnes de déchets ménagers. Le grand Blida avec ses quartes communes, Ouled Yaiche, Beni Mered, Beni Temou et Bouarfa génèrent quotidiennement plus de 3000 tonnes de déchets ménagers assimilés (DMA) pour près de 300.000 habitants. Les chiffres avancés par la direction de l'environnement de la wilaya de Blida font état qu'un habitant produit 0.7 Kg de déchets par jour [43].

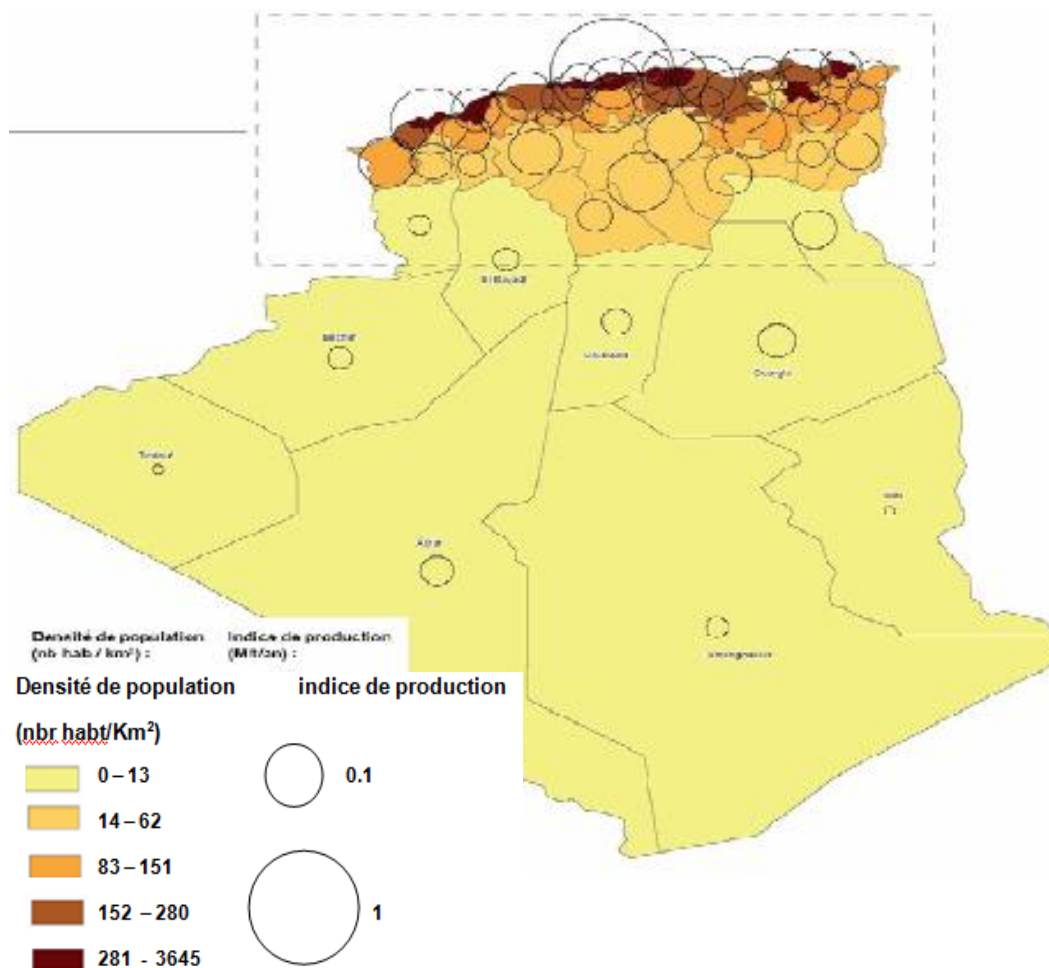


Figure I.13 : Production des déchets solides urbains par rapport à la densité [11].

a- Composition des déchets ménagers :

Le graphique suivant fournit des données sur la composition des déchets solides produits en Algérie. Les principaux composants d'après l'étude de Youcef Kehila et al., [38] sont : les résidus alimentaires (organiques) avec un taux moyen de 70% , cette composition reflète le mode de consommation des ménages algériens qui est basée dans une grande partie sur les produits frais (fruits et légumes) conjuguée à l'absence de tradition de produits de conserves.

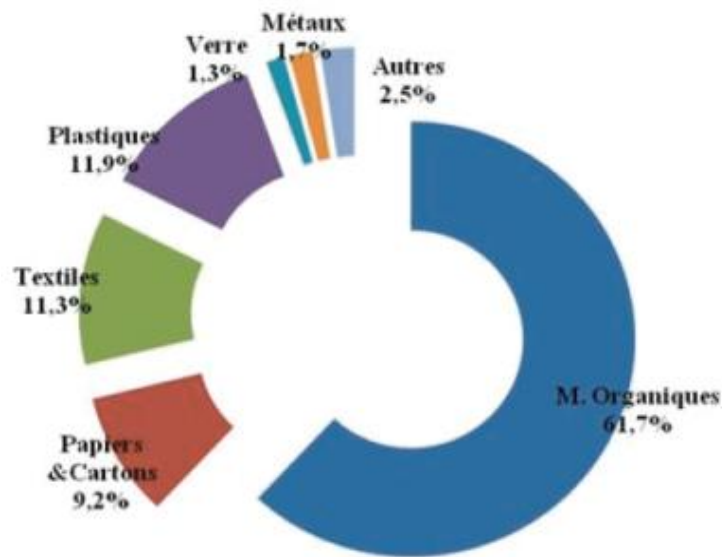


Figure I.14 : Composition des déchets ménagers (Algérie) [38].

Le taux d'humidité des déchets ménagers produits en Algérie, reste assez élevé en comparaison avec les pays développés, c'est dire l'importance des légumes et fruits dans notre consommation quotidienne, la moyenne statistique de l'humidité de toutes les fractions, selon Mezouari et al., [38] est au dessus de 50%.

b- Modes d'élimination et de traitement des déchets en Algérie :

En général, l'élimination reste la solution appliquée à 97 % des déchets, les déchets destinés à l'élimination sont mis en décharges sauvages à 57 %, brûlés à l'air libre dans des décharges publiques ou communales non contrôlées (30 %), en décharge contrôlée et dans les CET (10%) [38].

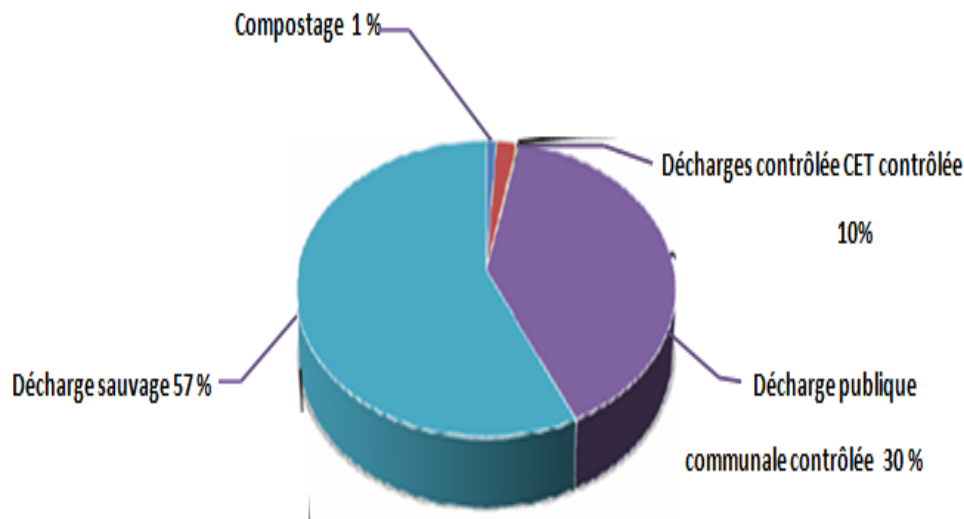


Figure I.15 : Modes d'élimination des déchets en Algérie [38].

Selon une enquête menée par les services du MATE, le nombre de décharges sauvages est passé de 2 000 en 1980 à 3 130 en 2007 sur les 48 wilayas avec une superficie de l'ordre de 150 000 h [42], et les quantités destinées à être valorisées sont trop faibles, seulement 2 % par le recyclage et 1 % par le compostage [38].



Figure I.16 : Décharge sauvage d'Oued Bou Arfa.

I.6. Différents paramètres influençant la méthanisation :

La digestion anaérobie correspond donc à un enchaînement de réactions chimiques dépendantes les unes des autres. Cette succession de réactions n'est possible que grâce à la population bactérienne, qui se développe dans le milieu. Ces bactéries réalisent ces réactions chimiques et maintiennent les conditions de vie nécessaires à leur survie. Mais le milieu, où se déroule la digestion anaérobie, est un écosystème très fragile et très spécifique. Les différents paramètres influençant la digestion anaérobie sont détaillés dans les paragraphes qui se suivent.

I.6.1. Température :

L'ensemble des auteurs (Husted, Massé et al., Sommer et al., Umetsu et al., Haeussermann et al., Park et al., Weiske et al.) s'accorde pour relier l'augmentation de la production du méthane avec l'augmentation de la température au stockage. Selon Mottet et d'autres auteurs, la digestion anaérobie peut se réaliser sous trois gammes de température, de 15 à 25°C, nous avons une fermentation psychrophile, de 25 à 45°C, nous sommes en présence d'une fermentation mésophile et de 55 à 65°C ; la fermentation est dite thermophile. Mais selon Marache [20], ces températures de fonctionnement dépendent surtout du réacteur (le digesteur) qui est prévu pour fonctionner dans une de ces gammes de températures. La figure suivante présente le taux de production de biogaz en fonction de la température et du temps de séjour selon Lagrange :

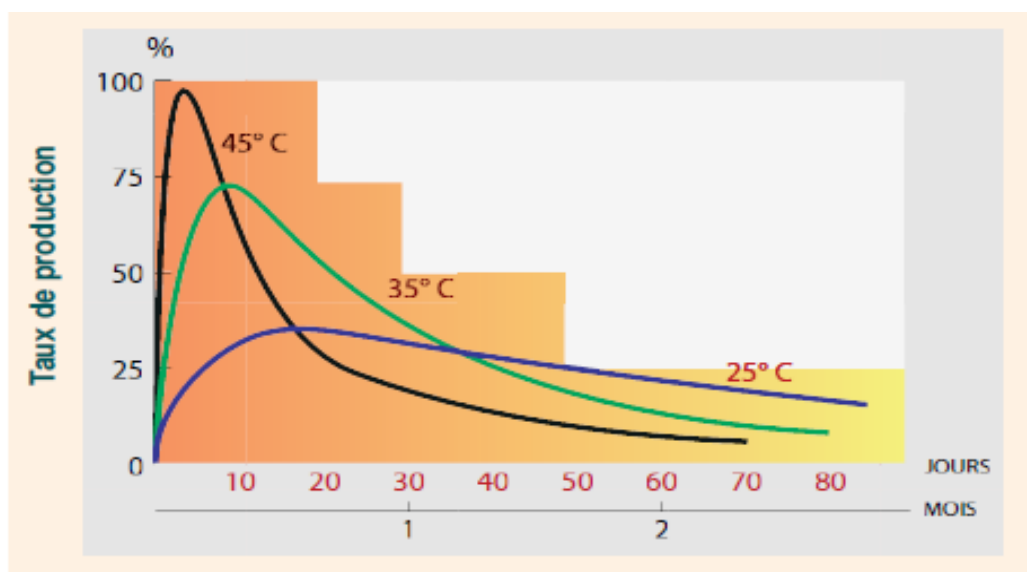


Figure I.17 : Taux de production de biogaz en fonction de la température [21].

La stabilité de la température est essentielle pour un bon déroulement de la fermentation méthanique ; or les marges de fluctuations tolérables sont plus étroites en zone thermophile qu'en zone mésophile ($\pm 2.8^{\circ}\text{C}$ à 38°C ; $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ à 49°C et seulement $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ à 52°C). Ceci implique qu'en zone thermophile, la température de fermentation doit être rigoureusement contrôlée et homogène dans tout le réacteur. Cet équilibre thermique, facilement réalisable au stade pilote, mais beaucoup plus difficile à obtenir dans les grandes unités [27]. Dans l'écart des températures mésophiles, pour une hausse de 1°C la production de gaz augmente de 5% [20]. Toutefois de fréquentes chutes de température peuvent déséquilibrer les populations microbiennes. Les variations de température peuvent être contraignantes pour la digestion mésophile (35°C) ou thermophile (55°C) [44].

Les avantages d'un régime thermophile aussi 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 , ci-dessous un tableau qui représente une comparaison entre la digestion mésophile et thermophile d'après Geradi [29] :

Tableau I.8 : Comparaison de la digestion en conditions mésophiles et thermophiles [29] :

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

Le phénomène de méthanisation est peu oxydatif alors peu exothermique. Donc, Pour favoriser l'activité microbienne [45] et pour fonctionner dans les différentes gammes de températures, les digesteurs ont besoin d'un apport de chaleur extérieure fourni par un chauffage externe. Or, plus il est nécessaire de chauffer le digesteur, plus le coût augmente. Donc la température de fonctionnement d'un digesteur est choisie suivant le but de l'installation de méthanisation par un compromis entre la productivité en gaz et le coût de production [20].

I.6.2. pH :

Riviere [17] a considéré que le pH est l'un des paramètres indicateurs qu'il faut surveiller afin de prévenir un possible dysfonctionnement, car il va conditionner la survie des espèces microbiennes au sein du digesteur. Selon Kim et al., Chen et al., [29] les microorganismes de la phase de fermentation peuvent se développer dans une gamme plus large de pH, comprise entre 4,0 et 8,5, mais la plupart se développent de façon optimale dans les conditions de pH neutre car les milieux acides ou basiques altèrent l'équilibre chimique des réactions enzymatiques ou détruisent les enzymes.

La digestion anaérobie se déroule normalement pour des pH compris entre 6 et 8 : en dessous de 6, l'activité des bactéries méthanogènes diminue rapidement et peut être complètement stoppée à partir de 5,5. Alors que les bactéries acidogénèses continuent à produire des acides gras volatiles (AGV) jusqu'à des pH voisins de 4,5, une acidification du milieu provoque une accumulation des acides gras volatils, qui en trop grande quantité, bloque la production du méthane [20], et sa peut traduire un dysfonctionnement de la syntrophie entre les microorganismes de la méthanisation. D'autre part les bactéries impliquées dans la production et la consommation de l'hydrogène, pouvant entraîner une accumulation de propionate. Les surcharges organiques peuvent également engendrer une accumulation des AGV car l'apport de substrat dépasse les capacités de dégradation de l'écosystème microbien [29].

Pour une digestion anaérobie des boues d'épuration le pH est autorégulé dans le digesteur avec des valeurs optimales comprises entre 6,8 et 7,4 car l'alcalinité produite par les méthanogènes sous forme de CO₂, d'ammonium et de bicarbonate, permet de maintenir le pH dans la gamme de neutralité. Par ailleurs l'ajout de bicarbonate de soude peut être nécessaire pour le maintenir [29].

Le tableau (I.9) présente l'effet du pH décrit dans la littérature sur les différentes étapes de la digestion anaérobie de la matière organique.

Tableau I.9 : l'effet du pH décrit dans la littérature sur la digestion anaérobie [29]

Auteurs	Etape	Substrat	Valeur de pH	Effet
He <i>et al.</i> (2006) Palenzuela-Rollón (1999)		Protéines	≤ 8	Aucun effet sur l'hydrolyse
Zhang <i>et al.</i> (2005) Ueno <i>et al.</i> (2006)		Polysaccharides	7 ≤ 6	pH optimal Ralenti de moitié l'hydrolyse
Sanders <i>et al.</i> (2000)	Hydrolyse	Boues primaires	6,5	pH optimal
Elefsiniotis <i>et al.</i> (1996)		Déchets particulaires	6,1 à 5,1 5,1 à 4,1	Ralenti l'hydrolyse Aucun effet sur l'hydrolyse
Gourdon et Vermande (1987)		Déjection porcs	5	
Veeken <i>et al.</i> (2000)		Déchets solides	7 à 5	Ralenti l'hydrolyse
Yu et Fang (2002)		Acidogenèse	Gélatine	5,9 à 6,0
Kim <i>et al.</i> (2004)	Acétogenèse	Butyrate	4,5 – 5	pH optimal
Meher et Ranade (1993) Kim <i>et al.</i> (2004)		Propionate	7,5 5 – 6	pH optimal
Drake (1994)		-	6,7 – 7,7	Gamme de pH optimale
Boopathy (1996)	Méthanogenèse	Lisier porcs	5,5 – 7,5 6,8	Gamme de croissance pH optimal
Costello <i>et al.</i> (1991)	Méthanogenèse acétotrophe	Glucose	7 – 7,2	pH optimal
Savant et Ranade (2004) Savant <i>et al.</i> (2002)	Méthanogenèse hydrogénotrophe	Eaux usées de distillerie	6,0	pH optimal

Donc le pH est le principal paramètre de contrôle du processus de fermentation. Le niveau de pH idéal se situe à 7, avec un optimum entre (6,5 -7,2).

I.6.3. Absence de l'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 [20].

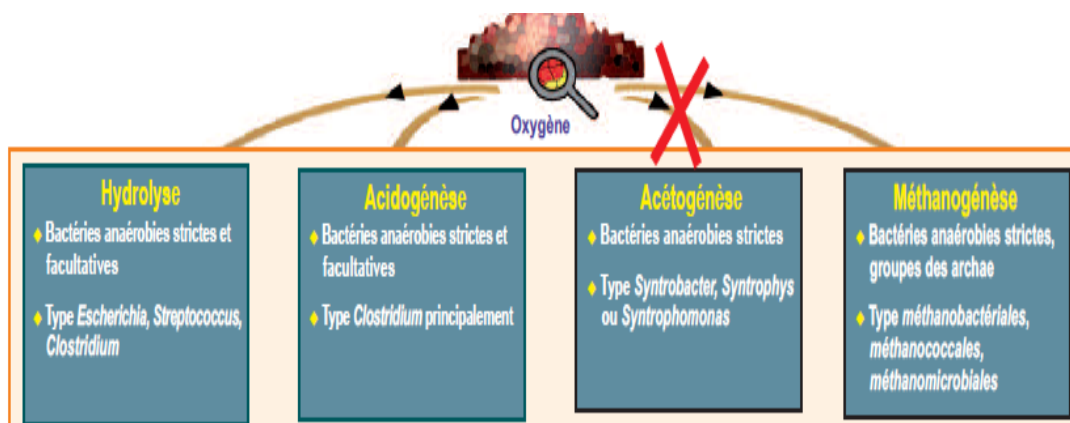


Figure I.18 : Effet de l'oxygène sur les différentes phases de la digestion anaérobie [20].

I.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 [27]. 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 [20].

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 [20].

I.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 [20]. 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 [27].

I.6.6. Pression partielle en hydrogène :

L'hydrolyse est une étape clé dans le processus de la digestion anaérobie [29], c'est un substrat indispensable et énergétique pour les bactéries méthanogènes. Il est produit lors de l'acétogénèse à partir des produits de l'acidogénèse (AGV), cette faible pression partielle est assurée par les bactéries homoacétogènes et hydrogénophiles qui consomment H_2 au fur et à mesure de sa production [27].

I.6.7. Humidité :

Pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable surtout à la multiplication des microorganismes, d'après Marache [20], une humidité minimale de 60 à 70% est nécessaire à la méthanisation.

De sa part Laskriet [44] 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 I.10 : Début de production du biogaz [44].

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

I.6.8. Temps de rétention hydraulique (TRH) :

C'est le temps de séjour moyen du substrat dans le réacteur [27]. C'est-à-dire le rapport du volume utile du fermenteur sur le débit volumique du substrat [20]. 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 [18].

Tableau I.11 : Temps de rétention concernant le lagunage anaérobie [18] :

Temps de rétention (j)	Remarques	Références
2-5	* Réduction de DBO ₅ escompté de 60 à 70%.	Parker <i>et al.</i> (1959)
5	* Réduction de DBO ₅ escompté de 70%.	Oswald <i>et al.</i> (1967)
0.5	*le minimum pour le dimensionnement en Afrique du sud.	Meiring <i>et al.</i> (1968)
5-30 10 5-10 5 3-5	*Critères du Texas, avec une réduction de DBO ₅ espérée de plus de 50%. *Valeur minimale à Montana, avec une réduction de DBO ₅ espérée de 70%. Critères de Iowa, avec une réduction de DBO ₅ escompté de 60 à 80%. *Critères à Illinois, avec une réduction de DBO Escomptée à 60 % * Critères du Nebraska, avec une réduction de DBO, escomptée à 75 %	White (1970)
1-5	* 1-2 jours à une température de 20-30°C * 2-3 jours à une température de 15-20°C * 4-5 jours à une température de 10-15°C * 5 jours à une température de 10° C	Arceivala (1973)
1 5	* En été * En hiver	Malina et Rios (1976)
1-5	*Pour une température de plus de 20°C : un jour, réduction de DBO ₅ espérée 50% ; 2.5 jours, réduction de DBO ₅ espérée 60% ; 5 jours, réduction de DBO ₅ espérée 70%. *Au delà la réduction de la DBO ₅ peut être réduit de 10 à 20% si la température est comprise entre 15-20°C.	Mara (1976)

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 [17].

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 (tableau I.12) [27].

Tableau I.12 : Différents exemples de TRH suivant le procédé de digestion anaérobie employé [20].

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

I.6.9. 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 :

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 tels que les nitrates, les nitrites et évidemment l'oxygène [20].

b- Ammoniaque :

D'après Hansen *et al.*, et Chen *et al.*, [29] 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 [27].

D'après Anderson et al., [29]; l'ammoniaque libre a été reconnu plus toxique que l'ion ammonium (NH_4^+). En générale, les taux d'ammoniac 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, Shmid et Lipper [29] qu'une très forte concentration de l'ordre de 1500 à 3000 ppm en ion ammonium est tolérable.

c- Acides volatils :

Les acides gras volatils (AGV) en forte concentration supérieure à 3000 mg/l peuvent être dus à la toxicité propre des acides mais aussi à la diminution du pH que leur concentration entraîne. D'après Arhing *et al.*, les fortes concentrations en AGV sont plus le résultat d'un déséquilibre de la digestion anaérobie (causé par une surcharge organique, un changement de température, la présence de toxique) que la cause d'une inhibition [44]. Les AGV sont l'intermédiaire principale dans la digestion anaérobie, et ils s'accumulent sous l'action du déséquilibre du processus. À des valeurs faibles de pH, les AGV deviennent plus toxiques [11].

d- Métaux lourds :

Certains d'entre eux sont toxiques pour les organismes anaérobies, même à de faibles concentrations. Mosey et al., [29] 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 [43].

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 [20] :

Tableau I.13 : Concentrations en ions provenant la stimulation ou l'inhibition de la méthanisation [20].

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

I.7. Biogaz :**I.7.1. Définition et composition :**

Le biogaz est un mélange de gaz carbonique et de méthane provenant de la dégradation des matières organiques, végétales ou animales, dans un milieu en raréfaction d'air, il est plus léger que l'air, sa densité par rapport à l'air est 0.7, 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 I.14) [46].

Tableau I.14 : Principaux composés autres que CH₄ présents dans le biogaz et leurs effets [46]:

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

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. Le tableau suivant fournit quelques exemples de compositions pour les cas les plus classiques [47].

Tableau I.15 : Comparaison du biogaz selon ses origines (Source : ADEM) :

Composants	Décharge d'ordures ménagères (MO 80%) <i>production naturelle sans aspiration</i>	Décharge d'ordures ménagères (MO 80%) <i>production forcée avec aspiration</i>	Décharge d'ordures ménagères (50%-50%) <i>production forcée avec aspiration</i>	Ordures ménagères triées (en digesteur)	Boues de stations d'épuration (en digesteur)	Lisier de bovins ou d'ovins (en digesteur)	Distillerie (en digesteur)
CH ₄ % vol	50 - 58	30- 55	25 - 45	50 - 60	60 - 75	60 - 75	68
CO ₂ % vol	25 - 34	22 - 33	14 - 29	38 - 34	33 - 19	33 - 19	26
N ₂ % vol	18 - 2	26 - 6	49 - 17	5 - 0	1 - 0	1 - 0	-
O ₂ % vol	1 - 0	8 - 2	8 - 5	1 - 0	< 0,5	< 0,5	-
H ₂ O % vol	4 (à 30°C)	4 (à 30°C)	4 (à 30°C)	6 (à 30°C)	6 (à 30°C)	6 (à 30°C)	6 (à 30°C)
Total % vol	100	100	100	100	100	100	100
H ₂ S mg/m ³	20 - 50	5 - 20	100 - 900	100 - 900	1000 - 4000	3000-10000	400
NH ₃ mg/m ³	-	-	-	-	-	50 - 100	-
Aromatiques mg/m ³	2	1	0 - 200	0 - 200	-	-	-
Organochlorés ou organofluorés mg/m ³	0 - 100	0 - 100	100 - 800	100 - 800	-	-	-

I.7.2. Valeur énergétique :

Le méthane brûle 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 [35].

Le pouvoir calorifique de biogaz peut être comparé à celui d'autres combustibles ou d'autres sources énergétiques [35].

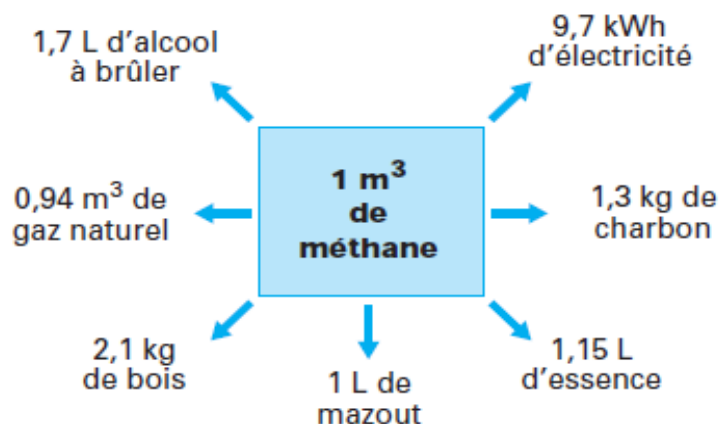


Figure I.19 : Equivalences énergétiques de 1 m³ de méthane [46].

Pour utiliser le biogaz comme carburant ou injecté dans le réseau de gaz de ville, le biogaz doit contenir plus de 96% de méthane. Pour cela plusieurs composés contenus dans le biogaz devront être éliminés. Le tableau (I.16) montre les différents composés à éliminer pour chaque voie de valorisation.

Tableau I.16 : Composés à éliminer par traitement selon le mode de valorisation du biogaz :

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

I.7.3. 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), de l'épuration qui vise à augmenter les proportions de méthane pour améliorer les propriétés énergétiques du mélange gazeux.

Voici un tableau (I.17), qui regroupe les différents composés toxiques et leurs techniques d'élimination :

Tableau I.17 : 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

b- La valorisation du biogaz : La valorisation de biogaz peut prendre plusieurs formes :

- La production de la chaleur.
- La production séparée de chaleur et d'électricité.
- La production combinée de chaleur et d'électricité ou la cogénération.
- l'injection de biogaz dans le réseau de gaz de ville après épuration.
- Un carburant pour automobile : un kg de déchets correspond à la consommation de carburant pour un parcours d'un kilomètre en voiture [31].

Voici une figure qui montre les différentes voies de valorisation du biogaz :

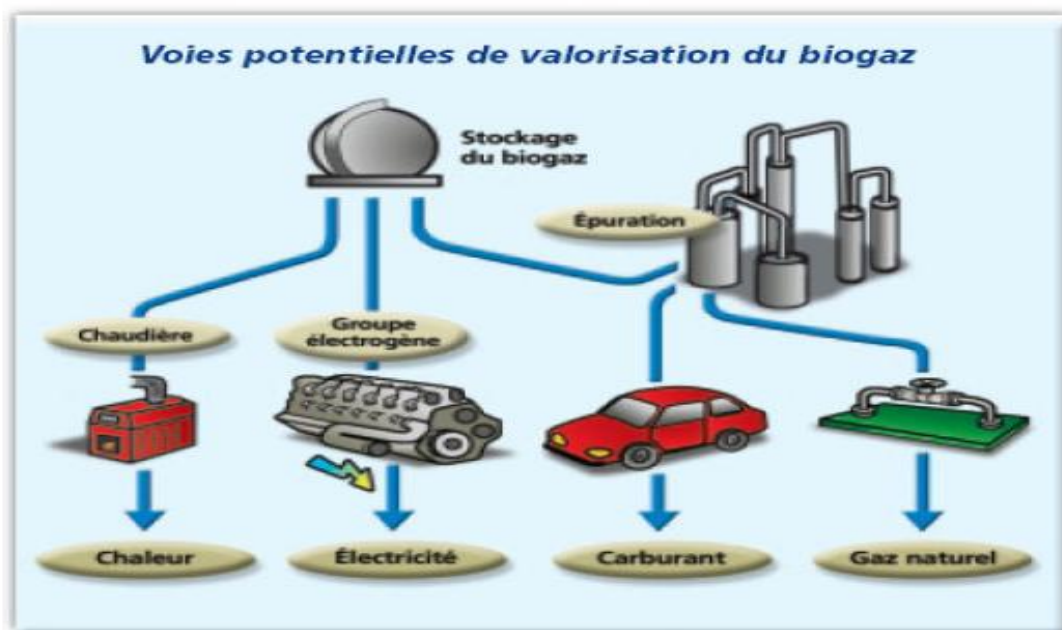


Figure I.20 : Différentes voies de valorisation du biogaz.

I.8. Avantages et inconvénients de la digestion anaérobie :

Les avantages de la digestion anaérobie sont :

- Une réduction de la matière sèche des boues de l'ordre de 50%
- Une production d'un Biogaz valorisable sous forme d'énergie (chauffage, électricité)
- 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
- 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%.

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.

CHAPITRE II

II.1- Matériels et méthodes :

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'ensemble des dispositifs expérimentaux et toutes les méthodes d'analyses utilisées, ainsi que l'origine du substrat utilisé pour l'alimentation de digesteur.

II.1.1. Origine et caractérisation du 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 les épluchures d'oignon, de pomme de terre, de carotte, de betterave, de salade et artichauts...etc (Fig II.1) provenant de la ville de Blida.



Figure II.1 : Substrat utilisé.

II.1.2. Prétraitement du substrat :

Afin d'optimiser les cinétiques de production du biogaz et de réduire le temps de séjour et pour assurer une homogénéisation de l'échantillon, les déchets sont découpés en petits morceaux et séché.



Figure II.2 : Substrat après le découpage et le séchage.

II.1.3. Description du digesteur et dispositif utilisé :

Les essais ont été réalisés dans un réacteur de type discontinu. Ce réacteur est de modèle de laboratoire, en verre, très simple, permettant d'assurer l'anaérobie de milieu de culture. Le réacteur est 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.



Figure II.3 : Photo de digesteur utilisé vide.

Le volume total du réacteur est de 3 l. Nous avons laissé un volume de 250 ml 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 est de l'ordre de 16 g MS.



Figure II.4 : Photo de digesteur rempli avec le substrat et l'eau.

II.1.4. Conditions opératoires :

Le réacteur est maintenu en condition mésophile ($35\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$) dans un bain marie chauffé et régulé par un thermostat et agité manuellement en le secouant une à deux fois par jour, le pH du milieu est maintenu à 7.

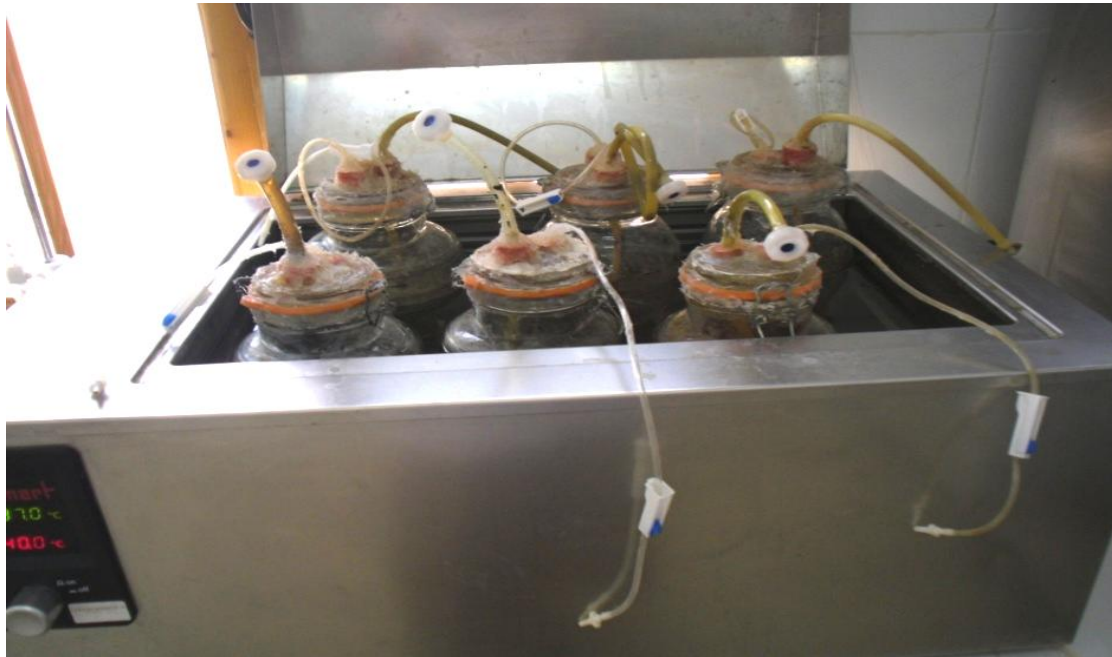


Figure II.5 : Photo des réacteurs dans un bain marie chauffé et régulé à 37°C.

II.1.5. Méthodes d'analyses :**II.1.5.1. Détermination de la matière sèche (MS) :****a) Matériels utilisés :**

- étuve réglée à 105°C ;
- capsule ;
- dessiccateur ;
- balance.

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 devient constant (A.O.A.C, 1990). 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 quelconque, soit (M_1), est versée dans une capsule de masse connue soit (M) préalablement nettoyée et séchée, ensuite l'ensemble est placé dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures jusqu'à l'obtention d'un poids constant. La capsule est pesée après refroidissement dans un dessiccateur.



Figure II.7 : Photo de l'étuve utilisée.



Figure II.6 : Echantillon après dessiccation.

La matière sèche s'obtient selon la relation suivante :

$$MS(\%) = \frac{M_1 - [(M + M_1) - (M + M_2)]}{M_1} \times 100$$

Avec :

M : masse de la capsule ;

M₁ : masse de l'échantillon avant dessiccation ;

M₂ : masse de l'échantillon après dessiccation.

II.1.5.2. Détermination de la teneur en matière organique (MO) :

a) Matériels utilisés :

- Four à moufle ;
- capsule ;
- Balance de précision ;
- dessiccateur.

b) Méthode :

Lorsque l'échantillon, préalablement séché, est soumis à une incinération à 550°C, la matière organique se consume et la matière résiduelle constitue la matière minérale (A.O.A.C, 1990).

Pour déterminer la teneur en matière organique (MO), une masse quelconque de l'échantillon après dessiccation, soit (M₁), est introduite dans une capsule préalablement nettoyée et séchée ayant une masse (M), l'ensemble est placé dans un four à moufle pour une calcination à 550 °C pendant 12-18 heures. Après refroidissement la capsule contenant la matière minérale est pesée encore une fois. La masse de la matière organique est obtenue par différence entre la masse de matière sèche et la masse de matière minérale.



Figure II.8 : Photo du four à moufle.

Le calcul des MO, s'obtient selon la relation :

$$MO(\%) = \frac{(M+M_1)-(M+M_2)}{M_1} \times 100$$

Avec :

M : masse de la capsule ;

M₁ : masse de l'échantillon après dessiccation ;

M₂ : masse de l'échantillon après calcination.

II.1.5.3. Paramètre suivis :

Le contrôle des digesteurs anaérobies 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 groupes de paramètres, qui sont les suivants :

1- 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.

2- Paramètres d'épuration ;

Les deux paramètres les plus répandus qui peuvent nous donner une idée sur les matières polluantes, et donc donner une idée sur le taux d'épuration du substrat étudié. Ces deux paramètres sont ;

- la demande chimique en oxygène (DCO);
- la demande biochimique en oxygène (DBO₅).

La demande chimique en oxygène est retenue mondialement comme critère d'évaluation et apparait dans toutes les études concernant les rejets et les déchets [32].

II.1.5.3.1. 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.

a) Matériel :

- pH-mètre (BASIC 20) ;
- Bécher.



Figure II.9 : Photo du pH- mètre utilisé.

b) Ajustement du pH :**- Méthode :**

Depuis le 2^{ème} jour et pendant les 12 premiers jours, le pH chute à des valeurs minimales (5 - 3), ce qui influe et inhibe la phase méthanogénèse, pour cela nous avons ajusté le pH avec du carbonate de sodium (Na_2CO_3) [48], de telle sorte à maintenir sa valeur au voisinage de 7.

Cette valeur est adéquate pour le développement et l'activité des bactéries méthanogènes et ceci pour favoriser la formation du biogaz [16].

II.1.5.3.2. Volume de biogaz produit :

La production du gaz 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) Matériel :

- Éprouvette graduée ;
- Bêcher.



Figure II.10 : Dispositif de mesure du volume du biogaz produit.

b) 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 éprouvette graduée plongée dans un liquide, ce qui va déplacer le niveau du liquide contenu dans l'éprouvette et indique ainsi le volume du gaz produit.

II.1.5.3.3. Détermination de la DCO :

C'est la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder chimiquement lors de la dégradation chimique d'une quantité de matière organique donnée par Greenberg et al., [49], 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 ;
- Eprouvette ;
- Bécher ;
- Tubes ;
- Burette ;
- Thermo-réacteur.

b) Méthode :

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



Figure II.11 : La centrifugation.

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

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 ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), introduit en excès, sous le chauffage à 150°C , pendant 2 heures dans un thermo-réacteur.

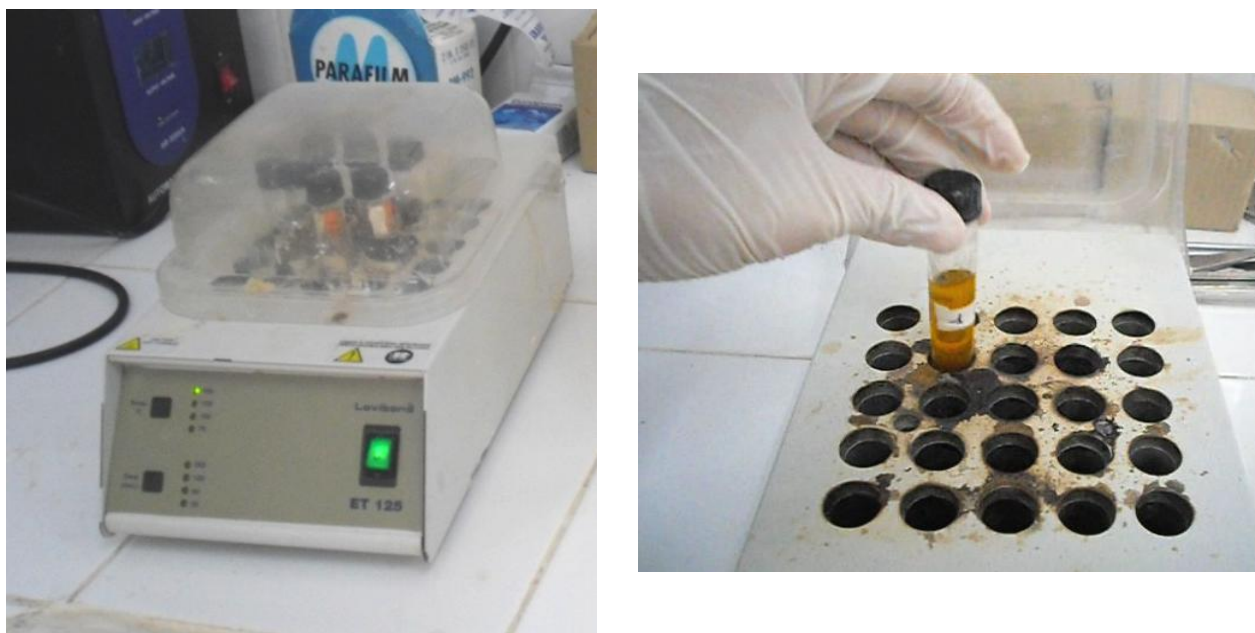


Figure II .12 : Photo du thermo réacteur.

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

$$DCO = \frac{(V_T - V_E) \times 8000 \times T \times d}{V_e} \text{ (en mg d'O}_2\text{/l)}$$

Avec :

V_T : volume de sel de Mohr pour le témoin ;

V_E : volume de sel de Mohr pour l'échantillon ;

T : titre de sel de Mohr ;

d : facteur de dilution ;

V_e : la prise d'essai de l'échantillon.

II.1.5.3.4. Détermination de la DBO_5 :

La DBO_5 représente la consommation d'oxygène des matières organiques lors de leur dégradation des 5 jours. Le rapport DCO/DBO_5 donne le taux de biodégradabilité de l'échantillon. Plus ce rapport est proche de 1, plus le substrat est biodégradable.

a) Matériels utilisés :

- Photomètre ;
- Étuve ;
- Éprouvette.

b) Méthode :

La mesure de la Demande Biologique en Oxygène au bout de 5 jours a été facilitée par l'emploi d'un photomètre appelé « OxiTop® WTW », il suffit de mettre une quantité bien déterminée de l'échantillon dans les flacons de ce photomètre. La quantité ajoutée à une relation directe avec la valeur de la DCO. Les flacons disposent chacun d'une tête de mesure de pression sur le bouchon qui intègre aussi la soude pour fixer le gaz carbonique. Les flacons sont disposés dans des supports de 6 ou 12 places à placer en étuve. Les valeurs de DBO_5 sont affichées sur le bouchon et mémorisées d'une manière automatique pendant les 5 jours.



Figure II.13 : Système utilisé pour la mesure de la DBO_5 .

II.1.5.3.5. Inflammabilité du biogaz :

Le test d'inflammabilité de biogaz, donne une idée sur le rendement énergétique de l'échantillon utilisé. Chaque fois, après la mesure de volume de biogaz, on passe à un test d'inflammabilité de ce dernier. Le biogaz est retiré à l'aide d'une seringue et subi à une flamme discontinue d'un briquet.



Figure II.14 : Teste d'inflammabilité du biogaz produit.

II.1.5.3.6. Composition du biogaz :

Méthode :

La composition du biogaz produit est déterminée par la technique de la chromatographie en phase gazeuse (CPG), la colonne de (S_E 30), avec les conditions suivantes :

- $T^{\circ}_{\text{injection}} = 120^{\circ}\text{C}$.
- $T^{\circ}_{\text{détecteur}} = 140^{\circ}\text{C}$.
- $T^{\circ}_{\text{colonne}} = 30^{\circ}\text{C}$.
- Débit = 15 ml/min.
- Programmation p = 40-80
- $V = 3 \text{ mpa/min}$.



Figure II.15 : Bouteille remplie avec le biogaz produit.

II.2- Résultats et discussion :

Dans la première partie de ce chapitre, le comportement des paramètres qui permettent d'évaluer le déroulement, la stabilité et la conduite du procédé seront présentés. Le pH, le volume du biogaz ont été analysés pendant le temps de séjour de digesteur (45 jours).

La deuxième partie présente les résultats concernant les paramètres d'épuration des polluants (DCO et DBO₅), pour évaluer l'efficacité et les performances du procédé.

II.2.1. Caractérisation du substrat :

a- Taux de la matière sèche :

Le taux de la matière sèche calculé est :

$$\% MS = \frac{12,84 - [(25,93 + 12,84) - (25,93 + 11,97)]}{12,84} \times 100 = 93,22 \%$$

b- Taux d'humidité :

Le taux d'humidité trouvé est :

$$\% d'humidité = 100 - \% MS = 100 - 93,22 = 6,78 \%$$

c- Taux de la matière organique du substrat avant la digestion :

Le taux de la matière sèche calculé est :

$$\% MO = \frac{(25,4 + 4,68) - (25,4 + 0,44)}{4,68} \times 100 = 90,60 \%$$

À la lumière de ces résultats, il apparait clairement que les déchets sont constitués principalement de matière organique (plus de 90 %) ce qui rend notre substrat utilisé plus appropriés pour la digestion anaérobie.

d- Taux de la matière organique du substrat après la digestion :

$$\% MO = 20,33 \%$$

D'après ce résultat on peut conclure qu'après la durée de 45 jours, il y'avait une dégradation de la matière organique avec un taux de 70.27 % ce qui confirme l'intérêt de notre substrat par rapports à d'autres types de biomasse pour le procédé de la digestion anaérobie.

I1.2.2. Description du digesteur au cours de la méthanisation :

a- Résultats :



(1^{ère} semaine)



(3^{ème} semaine)



(4^{ème} semaine)





(5^{ème} semaine)

Figure II.16 : Changement du substrat au cour de la digestion anaérobie.

b- Discussion :

Durant la digestion anaérobie, nous avons pu constater un changement de couleur du substrat dans le digesteur vers le noir foncé comme il paraît dans la figure (II.16). D'autre part une odeur indésirable qui remplit l'air dès la 2^{ème} semaine et qui rassemble à une odeur d'un œuf pourri et qui augmente avec le temps.

Cette mauvaise odeur accompagnée de la diminution de la DBO_5 est due au manque d'oxygène lors de la dégradation de la matière organique, or comme les valeurs de DBO_5 et DCO sont très élevées, la mauvaise odeur est expliquée par la formation de H_2S lors de la digestion anaérobie.

II.2.3. Évolution des paramètres de fonctionnement :

II.2.3.1. Évolution du pH :

Le pH est un indicateur très intéressant dans la stabilisation et le bon déroulement de la digestion anaérobie. Les procédés anaérobies sont fortement influencés par le pH. La digestion anaérobie se déroule de façon optimale au voisinage de la neutralité $\text{pH} = 7$ avec une valeur optimal entre 6,5 et 7,5.

a- Résultats :

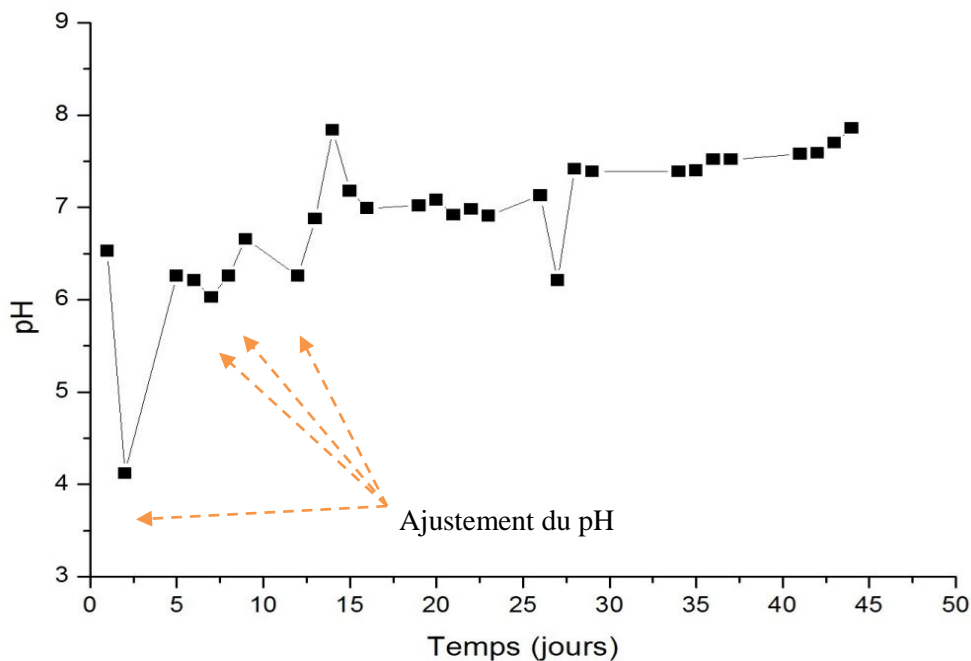


Figure II.17 : Evolution du pH en fonction du temps.

b- Discussion :

D'après la figure (II.17), on peut remarquer que le pH varie au cours de la méthanisation.

La courbe d'évolution du pH est peut être divisée en trois grandes parties ;

➤ La première partie :

Dans cette première partie, on remarque une chute rapide de pH dès le 1^{er} jour, de 6,5 jusqu'à une valeur minimale proche de 4, donc c'est l'acidification de milieu. Cette chute peut s'expliquer par la décomposition de la matière organique et la production des acides gras volatils (AGV) et leurs accumulations dans le milieu.

➤ **La deuxième partie :**

Dans la deuxième partie, on peut remarquer que les valeurs de pH ont commencé à augmenter petit à petit jusqu'au 13^{ème} jour, car nous avons ajusté le milieu à l'aide de NaOH [50], pour garder les valeurs de pH au voisinage de milieu de neutralité (pH=7) qui est la valeur adéquate pour le développement et l'activité des bactéries.

➤ **La troisième partie :**

Dans cette partie, à partir du 16^{ème} jour on peut remarquer qu'il y'a une stabilisation des valeurs de pH (entre 7 et 7.86). On peut expliquer cette stabilisation par la stabilité du processus d'une manière générale, c'est-à-dire, qu'il y'a simultanément une production des AGV d'une part, et leurs consommations d'autre part.

II.2.3.2. Production de biogaz :

La production du biogaz est un critère qui assure un bon déroulement de la digestion anaérobie.

Avec un temps de séjour de 45 jours, la quantité du biogaz produite est dépassée 4365ml. Comparant ce résultat avec le résultat trouvé par Kalloum et al., [50] ; qui ont obtenu un volume de 3500 ml de biogaz; pendant une durée de 80 jours, donc on peut conclure que le taux spécifique de production de biogaz a aboutie à des résultats satisfaisants et encourageants. La cinétique de cumulation du biogaz est présentée dans la figure (II.18).

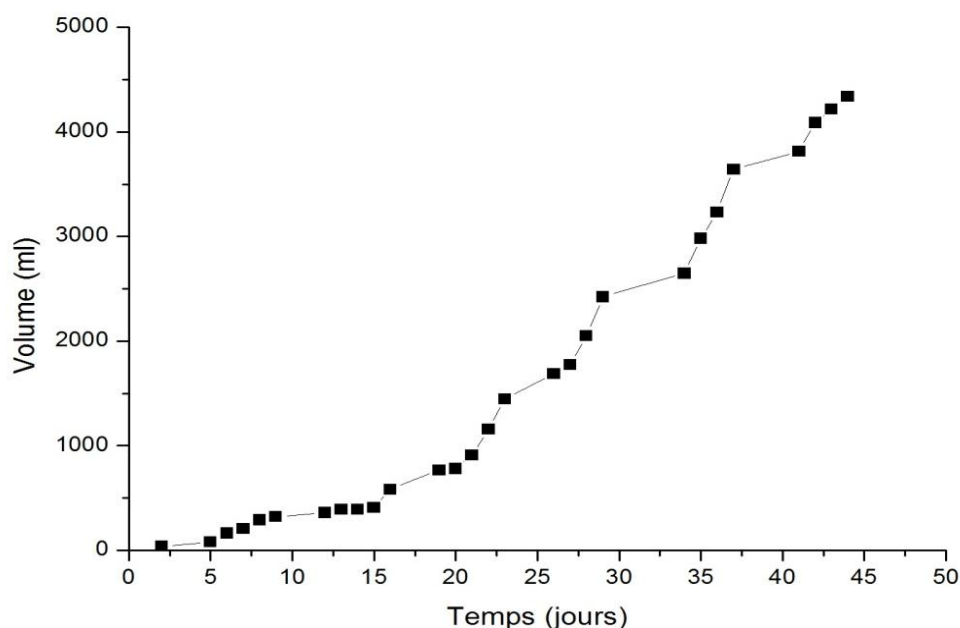


Figure II.18 : Cinétique de production cumulée du biogaz.

La cinétique de la production journalière du biogaz est présentée dans la figure (II.19)

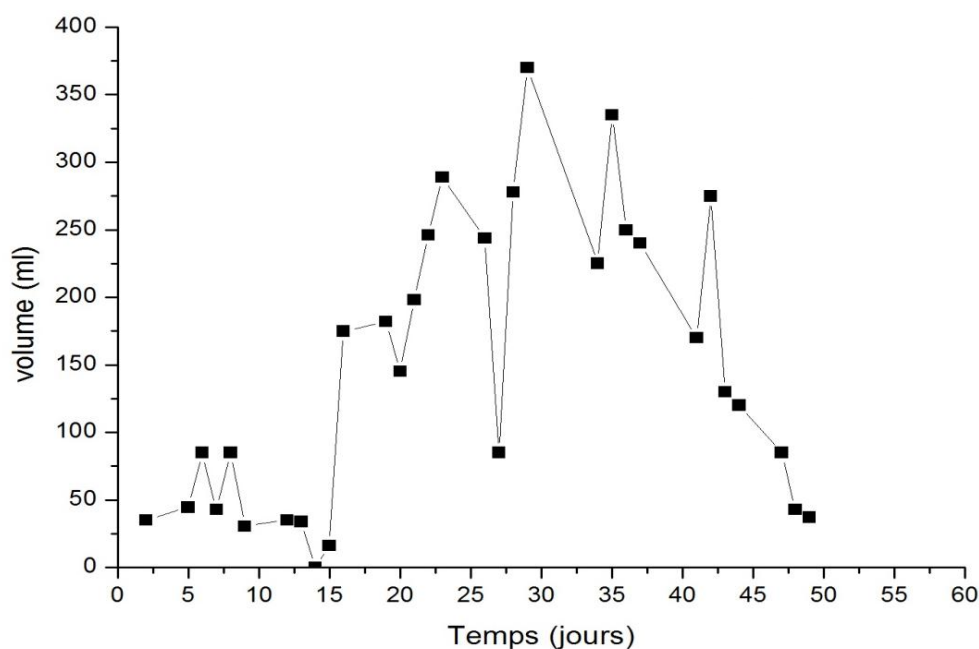


Figure II.19 : Cinétique de production journalière du biogaz.

À partir des deux figures précédentes (II.18 ; II.19), on peut diviser la production du biogaz en trois phases :

➤ **La première phase :**

Une production très faible du biogaz a été remarquée au début de la digestion anaérobie, elle intervient à partir du 1^{er} jusqu'au 15^{ème} jour, estimée à 16 ml. Cette faible production, même en présence d'une importante concentration en acides gras volatils dans le milieu, peut nous renseigner que la phase méthanogénèse n'a pas encore commencé.

On peut même diviser cette phase en deux ;

- À partir du 1^{er} jusqu'au 2^{ème} jour, la production de biogaz est nulle.
- À partir du 2^{ème} jusqu'au 15^{ème} jour, il y'a une très faible production de biogaz.

➤ **La deuxième phase :**

À partir du 16^{ème} jusqu'au 41^{ème} jour, il y'a un début de production importante de biogaz en proportions variables, donc c'est la transformation des acides gras volatils en méthane et en gaz carbonique.

Ça peut nous donner aussi une idée sur les étapes de la méthanisation qui sont arrivées à l'étape responsable de la production de biogaz d'une part, et d'autre part, on peut dire que tous les autres étapes sont déjà accomplies avant cette période, c'est à dire avant le 16^{ème} jour.

➤ **La troisième phase :**

À partir de 42^{ème} jusqu'à la fin de la méthanisation, on peut noter une très faible production du biogaz identique à celle observée dans la première phase. On peut expliquer ce phénomène par l'épuisement des acides gras volatils dans le milieu et donc l'épuisement du substrat d'une manière générale et le déséquilibre du milieu de culture.

II.2.3.3. Inflammabilité du biogaz :

C'est vrai que la production du biogaz est l'objectif principal de la méthanisation, mais la qualité de ce biogaz joue aussi un rôle très important pour la valorisation de ce biogaz, plus tard.

Dans notre étude, la détermination de la qualité du biogaz produit est faite de manière traditionnelle, le gaz est tout simplement enflammé. Si le biogaz est inflammable ça veut dire que le biogaz est arrivé aux limites d'inflammabilité qui sont entre 6 et 18 pour un biogaz de 70 % de CH₄ [26].



Figure II.20 : Teste d'inflammabilité du biogaz produit.

Tableau II.1 : Suivi de l'inflammabilité du biogaz.

Temps (j)	L'inflammabilité du biogaz formé
1	–
2	Non inflammable
3	Non inflammable
6	Non inflammable
8	Non inflammable
10	Non inflammable
13	Non inflammable
16	Inflammable
19	Inflammable
23	Inflammable
26	Inflammable
30	Inflammable
33	Inflammable
37	Inflammable
41	Inflammable
44	Inflammable

II.2.3.4. La détermination de différentes phases de la méthanisation :

À partir de l'évolution des différents paramètres précédents (pH, et volume du biogaz produit) on peut déterminer les trois grandes phases de la méthanisation qui sont :

- Hydrolyse-acidogénèse ;
- Acétogénèse ;
- Méthanogénèse.

Chaque phase a des caractéristiques spécifiques.

➤ Hydrolyse-acidogénèse :

Pendant cette phase, la matière organique se décompose rapidement et transformée en acides gras. Ici il y'a une production rapide des acides gras volatils et leur accumulation dans le milieu, ce qui provoque une forte abaisse des valeurs de pH et un dégagement de gaz carbonique.

➤ **Acétogenèse :**

Durant l'acétogenèse, les acides gras volatils sont transformés en acétates, donc on peut voir un abaissement de leurs concentrations dans le milieu, et une augmentation des valeurs de pH à cause de se fait.

➤ **Méthanogenèse :**

C'est la dernière phase de la méthanisation, ou l'acétate et le gaz carbonique se transforment en méthane, c'est à ce moment qu'on peut voir le début d'une production importante du biogaz.

À la lumière de toutes ces données, on peut déterminer les différentes phases de la digestion anaérobie, comme il est montré dans la figure (II.21) ci-dessous.

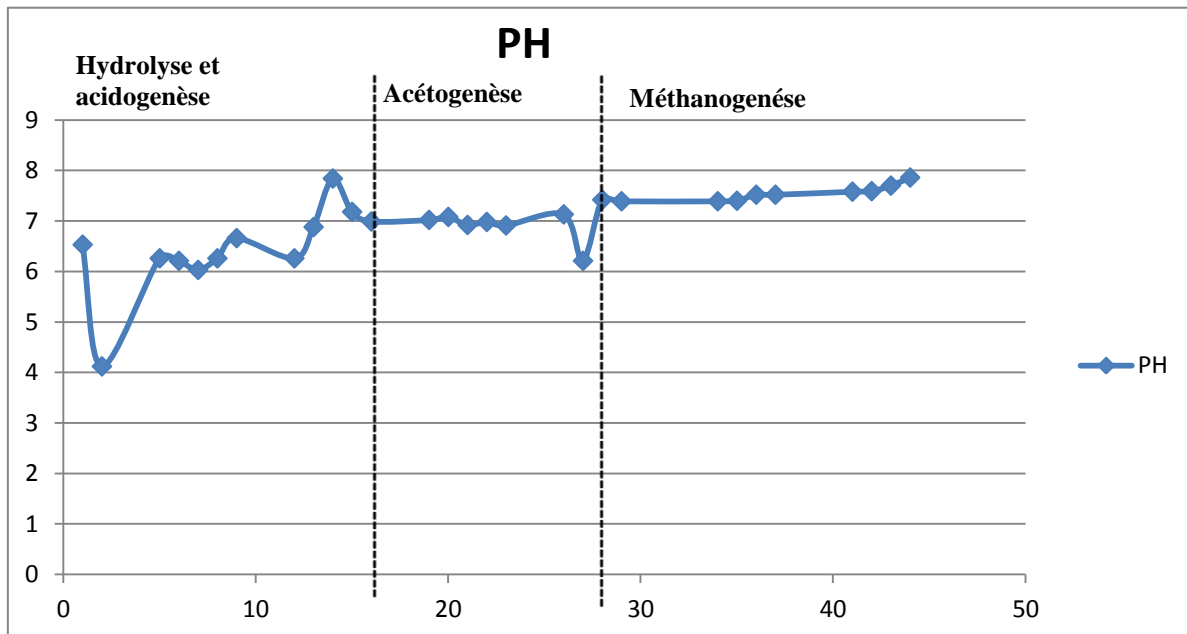


Figure II.21 : Détermination des différentes phases de la méthanisation

Discussions :

Les résultats obtenus dans cette étude ont montré que la méthanisation de la fraction organique des déchets solides de la ville de Blida se fait en trois phases bien distinctes :

➤ **La première phase :**

Dans cette première phase, on peut remarquer le début d'une production rapide des AGV et leurs accumulations dans le milieu, ce qui provoque une acidification du milieu, c'est à dire l'évolution du pH vers les valeurs acides. La production du biogaz est presque nulle.

➤ **La deuxième phase :**

Dans la deuxième phase, on peut remarquer une augmentation puis une diminution de la concentration des AGV dans le milieu, c'est à dire, leurs productions par les bactéries hydrolytiques et acidogènes d'une part, et leurs consommation par les autres bactéries acétogènes et méthanogènes d'autre part, ce qui influe sur les valeurs de pH qui augmentent vers des valeurs neutres et leurs stabilisations aux alentours de $\text{pH} = 7$. La production du biogaz dans cette phase est maximale.

➤ **La troisième phase :**

La concentration des AGV dans le milieu commence à faiblir alors que les valeurs de pH restent stables. Donc on a une stabilité dans le milieu.

II.2.4. Évolution des paramètres d'épuration :

II.2.4.1. Variation de la demande chimique en oxygène (DCO):

La demande chimique en oxygène permet d'exprimer la pollution du substrat, cette pollution englobe la charge en matière organique et aussi la charge en matière minérale.

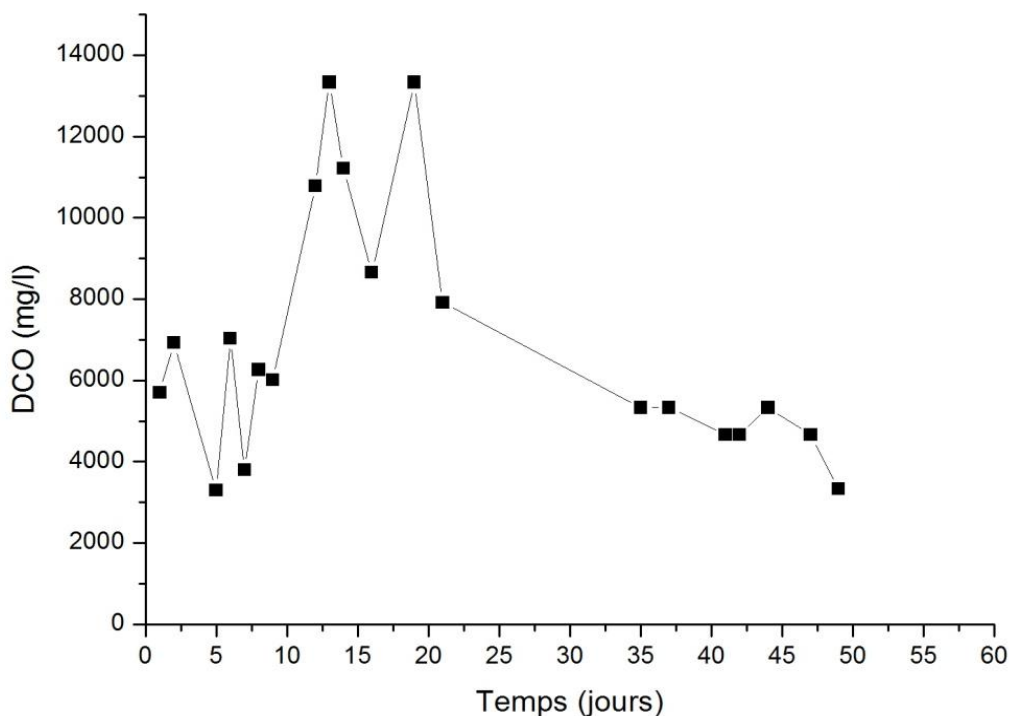


Figure II.22 : Variation de la DCO en fonction du temps.

II.2.4.2. Variation de la demande biochimique en oxygène pendant cinq jours (DBO₅) :

La demande biochimique en oxygène permet d'évaluer la teneur du milieu en matière biodégradable

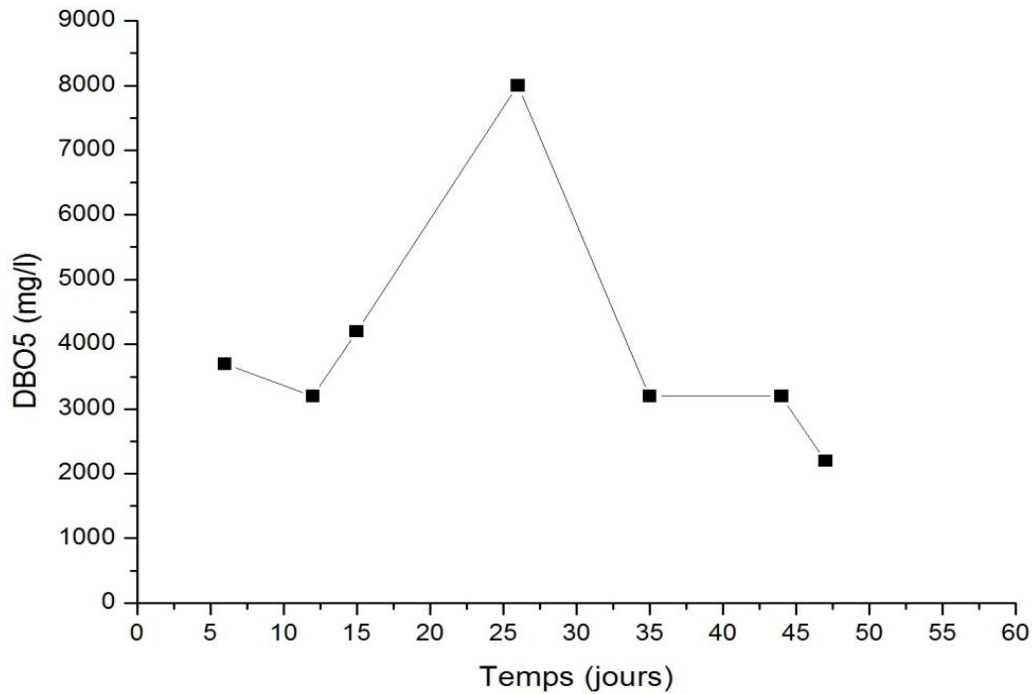


Figure II.23 : Variation de la DBO₅ en fonction du temps.

Les figures (II.22, II.23) qui représentent respectivement la variation de la DCO et de la DBO₅ en fonction du temps peuvent montrer qu'il y'a une claire réduction de la charge organique avec un taux de 76.33 % pour la DCO et 48 % pour la DBO₅. Ces résultats obtenus sont en bon accord avec la littérature [8; 49; 51].

II.2.5. Composition du biogaz produit :

Les résultats de l'analyse (CPG) du biogaz produit sont donnés dans le tableau suivant: **Tableau II.2** : Taux des différents composés du biogaz produit.

Composé	Temps	Surface	Hauteur	Concentration
1	2.426	11366	3183	83.2478
2	3.023	815	11	5.992
3	3.218	1472	199	10.7802

Pour confirmer que le pique composé majoritaire correspond au méthane on a fait une autre analyse (CPG) et dans les mêmes conditions sur le gaz naturel afin de comparer les deux résultats :

Tableau II.3 : Taux des différents composés du gaz naturel.

Composé	Temps	Surface	Hauteur	Concentration
1	1.378	1540	653	0.0308
2	2.433	5002326	1035117	99.9632
3	3.581	302	47	0.006

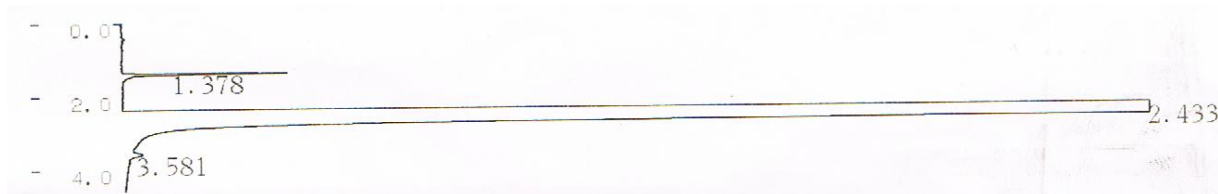


Figure II.24 : Résultat donnée par CPG lors d'analyse du gaz naturel.

D'après les pourcentages des composés de l'échantillon de biogaz qui sont représenté dans le tableau (II.2), et on se basant sur le test d'inflammabilité du biogaz que nous avons effectué [26], ainsi que le résultat trouvé après l'analyse du gaz naturel (tableau II.3) en comparant le temps de rétention. Nous pouvons conclure que le pique majoritaire qui représente 83.25 % du biogaz est correspond au méthane.

Conclusion :

La wilaya de Blida qui jadis était réputée pour sa propreté, a aujourd'hui énormément perdu de sa renommée avec la prolifération des décharges sauvages et le manque d'entretien caractérisant certains quartiers de la wilaya. Dans le contexte actuel de l'augmentation de la production de déchets, la digestion anaérobie et la valorisation du biogaz produit, apparaissent comme des solutions d'avenir pour le traitement des déchets dans un esprit de développement durable.

Donc il est évident que la fraction organique des déchets ménagers présente une très importante matière première pour le traitement biochimique. Cela est prouvé par les nombreuses études effectuées sur cette problématique et notre étude expérimentale prouve de plus son intérêt par rapport à d'autres biomasses et nos essais au laboratoire ont révélé d'une source prometteuse de la production de biogaz combustible riche en méthane avec un rendement de 80%, d'autre part nous avons pu montrer à travers les différents essais expérimentaux que la biométhanisation des déchets urbains de la ville de Blida sont très influencés par certains paramètres tels que pH, T°, concernant les paramètres de la dépollution, il a été constaté un abattement notable de la charge organique avec un rendement de 70 %.

A la lumière des résultats obtenus, nous pouvons conclure que la digestion anaérobie des déchets ménagers est très importante et les avantages de la biométhanisation sont multiples et peuvent être classés comme suit :

- dans le traitement des déchets : processus naturel nécessitant moins d'espace que les déchets à enfouir;
- sur le plan énergétique : production nette d'énergie, génération d'un combustible renouvelable de haute qualité valorisable dans plusieurs applications finales;
- sur le plan environnemental : réduction significative des émissions de CO₂ et de CH₄, élimination des odeurs, production d'un compost propre et d'un fertilisant liquide riche en matières nutritives utilisables en agriculture;
- sur le plan économique : plus rentable que toutes les autres formes de traitement.

Globalement, il ne peut y avoir aucun doute que la méthanisation est une technologie clé pour l'avenir de notre planète.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Bal, W. Gillett, 'Etat des énergies renouvelables en Europe rapport', 2007.
- [2] 'Méthanisation et production de biogaz Etat de l'art', APESA, 2007.
- [3] M. Christian Bataille et M. Claude Birraux, ' Les nouvelles technologies de l'énergie et la séquestration du dioxyde de carbone : Aspects scientifiques et techniques ', 2006.
- [4] C. Ngô, A. Regent, 'Déchets, influents et pollution impact sur l'avenironnement', 2012.
- [5] B. Barreau, J. Buba, R. Lallement, H. Pouliquen, A. Rulliat, 'Les négociations sur le changement climatique : vers une nouvelle donne internationale ?', centre d'analyse stratégique France, Janvier 2010.
- [6] J.L. Bal, B. Chabot, 'Les énergies renouvelables : État de l'art et perspectives de développement', 2001.
- [7] L. Nabila, 'Evaluation Energétique des déchets solides en Algérie, une solution climatique et un nouveau vecteur énergétique', université El- Hadj Lakhdar, Batna, 2009.
- [8] M. Belkadi, 'Etude technique pour la valorisation énergétique des micro algues' , université de m'hamed bougara, boumerdes ,Juin 2009.
- [9] Guide des énergies renouvelables en Algérie, 2007.
- [10] L. Abassi, F. Gaglian, A. Manero, J. Rodriguez, M. Sheeran, 'Projet de deuxième année', école nationale des ponts et chaussées, 2005.
- [11] P.D. Chynoweth, 'Review of biomethane from marine biomass', 2002.
- [12] A. Amahrouch, 'Le biogaz', centre de développement des énergies renouvelables, Maroc.
- [13] H.B. Goyal, D. Seal, R.C. Saxena, 'Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: Renewable and sustainable energy reviews 122, 2008.
- [14] K.B. Cantrell, T. Ducey, G.Hunt, 'livestock waste-to-bioenrgy generation opportunities. Biosource Technology 99, 2008.

- [15] A. Demibras, 'Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals', 2001.
- [16] O. Bordelanne, M. Montero, F. Bravin, A. Vernat, O. Oliveti-Selmi, H. Pierre, M. Papadopoulo, T. Muller, 'Biomethane CNG hybrid: A reduction by more than 80% of the greenhouse gases emissions compared to gasoline', *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2011.
- [17] D. Riviere, 'Comparaison des populations microbiennes de digesteurs anaérobies traitant des boues de station d'épuration : analyse moléculaire de la diversité et de l'activité', thèse de doctorat, université Devry Val Dessionne, Novembre 2008.
- [18] K. Effibi, 'Lagunage anaérobie : modélisation combinant la décantation primaire et la dégradation anaérobie', Thèse de doctorat, université de Liège Campus d'ARLON, mars 2009.
- [19] R. Moletta, 'La méthanisation', 2^{ème} édition, 2012.
- [20] 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.
- [21] 'La méthanisation à la ferme', Guide pratique (7201), ADEM (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie), Septembre 2011.
- [22] G. Le Guen, 'L'accompagnement des projets de méthanisation : Comment faire émerger des projets de méthanisation agricole dans le contexte actuel ?', Esitpa, école d'ingénieurs en agriculture. France, 2003.
- [23] E. Almanssour, 'Bilans énergétiques et environnementaux de filières biogaz : Approche par filière-type', thèse de doctorat, université Bordeaux, 2011.
- [24] 'Le traitement mécano-biologique des ordures ménagères', Les avis de l'ADEME, février 2012.
- [25] 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.

- [26] H. Philip, A. Rambaud, J.L. Vassel, 'Assainissement non collectif des habitations : Fonctionnement et dimensionnement', techniques d'ingénieur, w6602, 2012
- [27] A. Dahou, 'la production de biogaz à partir de lagunage de la wilaya d'Adrar', université Kasdi Merbah, Ouargla, 2010.
- [28] K. Derbal, 'Digestion anaérobie des déchets solides ménagers avec les boues de stations d'épuration', thèse de doctorat, université Mentouri, Constantine, 2010.
- [29] 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.
- [30] A. Saidi, B. Abada, 'La biométhanisation : une solution pour un développement durable', revue des énergies renouvelables, CER'07 Oujda, 2007.
- [31] S. Kalloum, 'Production du biogaz à partir des déchets organiques en milieu saharien'. Rapport de confirmation, unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien, 2004.
- [32] R. Moletta, F. Cansell, 'méthanisation des déchets organiques', Record, n°10408, 2003.
- [33] M. Djaâfri, M. Khelifi, S. Kalloum, A. Tahri, K. Kaidi, A. Touzi, 'Effet de l'ensemencement sur la digestion anaérobie des déchets ménagers de la ville d'Adrar' Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien /Adrar, 2009.
- [34] S. Igoud, I. Tou, S. Kehal, N. Mansouri, A. Touzi, 'Première approche de la caractérisation du Biogaz produit à partir des déjections bovines', Revue des énergies renouvelables, vol. 5 123-128, 2002.
- [35] B. Bouliguié, P.L. Cloirec 'Purification de biogaz - Élimination des COV et des siloxanes', techniques d'ingénieur, be8560, 2012.
- [36] S.B. Ammar, 'Les enjeux de la caractérisation des déchets ménagers pour le choix de traitements adaptés dans les pays en développement : Résultats de la caractérisation dans le grand Tunis, mise au point d'une méthode adaptée' thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, 2006.

- [37] L. Sebti, 'Valorisation des déchets solides urbains', thèse de magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2007
- [38] Y. Kehila, F. Mezouari, 'Intérêt des matériaux geosynthétiques dans la conception des centres d'enfouissement techniques (CET) en ALGÉRIE', Laboratoire Architecture et Environnement (LAE), Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme – EPAU, El Harrach – Alger, Algérie. Université de Limoges, France, 2011.
- [39] Rapport final de la Banque mondiale dans le cadre du programme Metap (Mediterranean Environmental Technical Assistance Programme), 2007.
- [40] Rapport sur l'état de l'environnement en Algérie du MATE ([Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement](#)), 2007.
- [41] Y. Kehila, M. AINA, F. MEZOUARI, G. MATEJKA, D. MAMMA 'Quelles perspectives pour l'enfouissement technique et le stockage éco-compatible des résidus solides dans les PED vis-à-vis des impacts sur l'hydrosphère urbaine ?' Actes des JSIRAUF, Hanoi, 2007.
- [42] F. Loudjani, 'Guide des techniques communaux pour la gestion des déchets ménagers et assimilés'. Ministère de l'aménagement du territoire de l'environnement et du tourisme.
- [43] Rapport, Direction de l'environnement de la wilaya de Blida, Septembre 2011.
- [44] N. Laskri, O. Hamdaoui, N. Nedjah, 'Traitement et valorisation des déchets par procédé de digestion anaérobie : production du biogaz', Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda (23 – 26 23), 2007.
- [45] S. Renella, S. Evanno, A. Paillart, I. Zdanevitch, G. Gay, 'Mise au point d'un réacteur pilote de méthanisation de 5 litres', rapport d'étude N° DRA-09-104105-13976A, 2010.
- [46] R. Moletta, 'Méthanisation de la biomasse', techniques d'ingénieurs, J bio5100, 2012.
- [47] T. Héteu, J. Martin 'Conversion biochimique de la biomasse : Aspects technologiques et environnementaux', 2003.
- [48] A.H. Mouneimne, H. Carrere, N. Bernet, J.P. Delgenes, J.L. Bobin, E. Huffer et H. Nifenecker, 'Effect of saponification on the anaerobic digestion of solid fatty residues', 20010

- [49] M.D. Mazouni, 'Modélisation et commande en temps minimum des réacteurs biologiques séquentiels discontinus', these de doctorat, école polytechnique d'Alger, 2001.
- [50] S. Kalloum, M. Khelafi, M. Djaafri, A. Tahri et A. Touzi, 'Etude de l'influence du pH sur la production du biogaz à partir des déchets ménagers', Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007) 539 – 543539, 2007.
- [51] L. Bal, B. Chabot, 'Les énergies renouvelables : État de l'art et perspectives de développement', 2001.