



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم هندسة الطرائق

Département de Génie des Procédés

N° d'enregistrement

/...../...../...../...../..

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Génie des Procédés

Spécialité: Génie Chimique.

Thème

*Valorisation Des Déchets Organique D'origine
Agricole Par Digestion Anaérobie*

Présenté Par :

BOUAMOUUD Maria & KEBIER Hadjer

Devant le jury composé de:

Dr. BEN CHEIKH. S Eddine	MCB	Univ. Ghardaïa	Examineur
Dr. Khane Yasmina	MCB	Univ. Ghardaïa	Examineur
Dr. RAACHE Imane	MCB	Univ. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire : 2020 /2021

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

En mémoire de mon père (رحمة الله عليه) , qui est resté pour toujours dans mon esprit et mon cœur .Aujourd'hui, je vous dédie mon succès, que Dieu vous bénisse dans son vaste paradis.

à ma chère mère qui s'est sacrifiée pour ma réussite et mon bonheur, Puisse Dieu de m'aider à la rendre plus fière de moi.

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A mes chers frères pour leur appui et leur encouragement.

à toute ma famille : Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements tout au long de mon parcours universitaire. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle.

A mes amies : Fatima, Siham, Hadjer, Imane, Wiaam, Nassira, Sohir, Ghzail, Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des sœurs et des amies sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Et à tous les collègues de ma promotion.

A tous les gens que j'estime et je respecte.

MARJA

Dédicace

C'est avec un grand honneur et un immense plaisir que je
dédie ce mémoire à :

- ❖ Mes chers parents, symboles de courage et de Volonté, qui
ont consacré et sacrifié leurs vies pour nos bien être. Que
dieu les protègent
- ❖ Mes chères frères « KARIMA ET SON MARI , IBRAHIM ,
SOUNDS , MOHAMED ELAMINE »
- ❖ Mes tantes, cousins et cousines
- ❖ Toutes mes familles grandes et petites « KEBIER ET
ARABA »
- ❖ A mes amis intimes et mes collègues
- ❖ Merci à tous

SADJER



Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu Tout-Puissant pour La volonté, la santé et la patience qu'il nous a données durant toutes ces années d'étude, Pour réaliser ce modeste travail (Elhamdou Lillah).

Nous ne pouvons commencer cette étude sans exprimer nos sincères remerciements à tous ceux qui nous ont aidés et encouragés de près ou de loin à réaliser notre travail, notamment :

*Tout d'abord, nous tenons à remercier tout particulièrement notre encadreur **Dr.RAACHE Imane**, qui a accepté de nous encadrer et de suivre ce travail avec patience, compréhension et vigilance, ce qui nous a donné l'occasion de profiter de son expérience dans la préparation de ce mémoire. Je remercie vivement Mr. AOUF Djaber le responsable du laboratoire de Génie des procédés de l'université Ghardaïa et J'adresse un merci tout particulier à Derbali Imane technicienne du laboratoire, pour sa précieuse aide, et pour l'atmosphère qu'ils ont su créer.*

Je voudrais exprimer ma gratitude à l'ensemble des membres du jury, Dr. BEN CHEIKH. S Eddine et Dr. Khane Yasmina ;qu'ils m'ont fait l'honneur en acceptant d'examiner ce travail.

A Nos Enseignants de la Faculté de Science et Technologies à l'Université de GHARDAIA. Nous adressons tous nos sincères remerciements.

Nous remercions personnel administratif dans le Département Génie des procédés et tous nos amis pour leur aide,

Nous ne pouvons le faire sans exprimer notre profonde gratitude à nos parents et à toute notre famille, pour leur immense persévérance et leurs efforts.

Résumé

L'Algérie dépend principalement des énergies fossiles pour ses besoins énergétiques. La majeure partie de l'électricité produite utilise le gaz naturel comme énergie primaire. En outre, les besoins en électricité augmentent très rapidement. Les bioénergies sont au cœur de l'actualité internationale, et la digestion anaérobie est l'une des solutions rentables couramment utilisée pour la production d'une énergie renouvelable et verte sous forme de biogaz, et pour remédier aux problèmes de pollution de l'environnement.

Dans cette recherche, nous sommes concentrés sur la valorisation des déchets Avicole (plumes et viscères) et des déchets d'olive (grignons) après l'extraction, ces matériaux non comestibles par l'homme est considérée un matériau valorisable pour la production de biogaz.

L'expérience a été réalisée dans des bioréacteurs type batch monté au niveau du laboratoire. Nous avons choisi la méthanisation type mésophile dans laquelle la température est de 38 C°. Sous des conditions contrôlées pendant une durée de 27 jours.

Les résultats de cette étude ont montré que le volume du biogaz produit cumulées est de 164 ml pour déchets Avicole (plumes et viscères) et 393 ml pour déchets d'olive (grignons). Cette recherche révèle l'importance de la connaissance de certains paramètres physico-chimiques des substrats pour but d'optimiser la production en biogaz.

Les résultats de la présente recherche montrent clairement que la conversion de la matière organique contenue dans les déchets traités peut donner un bon rendement

Mots clés :

Digestion anaérobie, Énergies renouvelables, Biogaz, Déchets de volaille, Déchets olive, Bioréacteur.

Abstract

Algeria depends mainly on fossil fuels for its energy needs. Most of the electricity produced uses natural gas as a primary energy source. In addition, the need for electricity is growing very rapidly. Bioenergy's are at the heart of international news, anaerobic digestion is one of the cost-effective solutions commonly used for the production of renewable energy and green which is biogas, and to address environmental pollution problems.

In this research, we are focused on the recovery of poultry waste (feathers and viscera) and olive waste (grignons) after extraction, these inedible materials by man is considered, that enable it to be a valuable material for biogas production.

The experiment was carried out in batch-type bioreactors mounted at laboratory level. We chose the mesophilic type methanization in which the temperature range is 38 C°. Our experiment took place under controlled conditions were taken daily for 27 days.

The results of this study showed that the volume of biogas produced cumulated is 183 ml for poultry waste (feathers and viscera) and 339 ml for olive waste (grignons), respectively. This research reveals the importance of knowledge of certain physico-chemical parameters of substrates in order to optimize biogas production

In conclusion, the results of this research clearly show that the conversation of organic matter contained in treated waste can give a good yield

Key words:

Anaerobic digestion., Renewable energies, Biogas, Poultry waste, Olive waste, Bioreactor

الملخص:

تعتمد الجزائر أساساً على الوقود الأحفوري لتلبية احتياجاتها من الطاقة. معظم الكهرباء المنتجة تستخدم الغاز الطبيعي كمصدر للطاقة الأولية. في حين أن الحاجة إلى الكهرباء في ازدياد سريع، تعتبر الطاقات الحيوية هي صميم التكنولوجيات الحديثة، والهضم اللاهوائي هو أحد الحلول الفعالة من حيث التكلفة والتي تستخدم عادة لإنتاج طاقة متجددة وخضراء، في شكل الغاز الحيوي، وحل لمعالجة مشاكل التلوث البيئي. وفي هذا البحث، نركز على تثمين بقايا الدواجن (الريش والأحشاء) وبقايا الزيتون بعد استخلاص زيت، حيث تعتبر هذه المواد الغير الصالحة للاستهلاك. ومواد يمكن تثمينها لإنتاج الغاز الحيوي.

تم إجراء التجربة في مفاعلات حيوية من النوع المغلق حيث تم تركيبها على مستوى المختبر. لقد اخترنا نوع الهضم اللاهوائي من النوع معتدل (mésophile) الذي تبلغ درجة الحرارة فيه 38 درجة مئوية. تمت تجربتنا في ظل ظروف مضبوطة بالإضافة إلى مراقبة الإنتاج اليومي والإجمالي للغاز الحيوي ويتم تسجيل حجم يومياً لمدة 27 يوماً

وأظهرت هذه الدراسة نتائج معتبرة حيث بلغ حجم الغاز الناتج 183 مل بالنسبة لنفايات الدواجن (الريش والأحشاء) و339 مل بالنسبة لنفايات الزيتون (ثفل). ويكشف هذا البحث عن أهمية معرفة بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية لوسط التفاعل من أجل تحقيق الإنتاج جيد للغاز الحيوي.

في الختام، تظهر نتائج هذا البحث بوضوح، أن قيمة المادة العضوية الموجودة في النفايات المعالجة بإمكانها أن تعطي أداءً جيداً في إنتاج الغاز الحيوي.

الكلمات المفتاحية:

الهضم اللاهوائي، الطاقة المتجددة، الغاز الحيوي، مخلفات الدواجن، مخلفات الزيتون، مفاعل

حيوي

LISTE DES ABREVIATIONS

AGV	Acides Gras Volatils
AVT	Acidité Volatile Total
°C	Degré Celsius
C.E.T	Centres D'enfouissement Technique
DBO	Demande Biochimique En Oxygène
DCO	Demande Chimique En Oxygène
CDER	Centre De Développement Des Énergies Renouvelables
CIRAIG	Le Centre International De Référence Sur Le Cycle De Vie Des Produits, Procédés Et Services
COV	Composés Organiques Volatils
D	Digesteur
DD	Développement Durable
GES	Gaz à Effet de Serre
GNV	Gaz Naturel Véhicule
g/l	Gramme Par Litre
H	Humidité
INA	Institut National Agronomique
ISD	Installations De Stockage De Déchets
ISDND	Installation De Stockage De Déchets Non Dangereux
kg/J	Kilogramme Par Jour
KWe	Kilowatt Electrique
MATE	Ministère De l'Aménagement De Territoire Et d'Environnement
MDDEP	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la faune et des Parcs

LISTE DES ABREVIATIONS

meq/l	Milli Equivalent Par Litre
MJ/m³	Méga Jour Par Mètre Cube
MJ/ kg	Méga Jour Par Kilogramme
MO	Matière Organique
MS	Matière Sèche
OLPHA	Obligate Hydrogen Producing Bacteria
PCI	Pouvoir Calorifique Inferieure
pH	Potentiel Hydrogène
ppm	Partie Par Million
SBR	Sequencing Batch Reactor
STEP	Station D'epuration
TAC	Titre Alcalimétrique Complet
TAG	Turbines A Gaz
TAV	Turbines A Vapeur
V	Volt
V_a	Volume Accumulé

LISTE DES FIGURES

Figures	Titre	Page
<i>Figure I. 1</i>	Les fruits d'olivier	7
<i>Figure I.2</i>	Evolution de la production d'huile d'olive et des sous-produits pour la période 2000-2013	9
<i>Figure I.3</i>	Description du processus d'abattage	16
<i>Figure I.4</i>	Schéma récapitulatif de l'éviscération	17
<i>Figure I.5</i>	Répartition (en %) des différents déchets issus de l'abattage des volailles	19
<i>Figure II.1</i>	Technologies de conversion de la biomasse et des déchets	26
<i>Figure II.2</i>	Différente ressource de la biomasse	26
<i>Figure II.3</i>	Projet scientifique axé sur bioraffinerie environnementale	29
<i>Figure II. 4</i>	Schéma global du bilan de la méthanisation	30
<i>Figure II. 5</i>	Principe de l'hydrolyse	31
<i>Figure II. 6</i>	Principe de l'acidogène	31
<i>Figure II. 7</i>	Réactions dans le bioréacteur anaérobie	33
<i>Figure II. 8</i>	Production de biogaz en fonction de la température	34
<i>Figure II.9</i>	Schéma présente les différentes voies possibles de traitement du digestat	42
<i>Figure III.1</i>	Organigramme du travail expérimental	49
<i>Figure III.2</i>	Schéma d'un seul digesteur	51
<i>Figure IV.1</i>	Variation de l'AGV avant et après la fermentation	66
<i>Figure IV.2</i>	Variation de rapport AGV/TAC avant et après la fermentation	67
<i>Figure IV.3</i>	Variation du pH avant et après la fermentation	69
<i>Figure IV. 4</i>	Le volume journalier de production de biogaz au cours du temps pour digesteur A et B	70
<i>Figure IV.5</i>	Cinétique de la production cumulée du biogaz pour digesteur A et B	70

LISTE DES FIGURES

<i>Figure IV.6</i>	Le volume journalier du biogaz pour les digesteurs C et D	71
<i>Figure IV.7</i>	Cinétique de la production cumulée du biogaz pour digesteur C et D	71

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux	Titre	Page
<i>Tableau I.1</i>	Les parties comestibles et non comestibles des volailles	17
<i>Tableau I.2</i>	Les parties comestibles et non comestibles des ovins et des bovins en Algérie	18
<i>Tableau I.3</i>	Caractéristiques physico-chimiques des déchets de volaille	19
<i>Tableau I.4</i>	Débouchés de la valorisation des plumes de volaille	22
<i>Tableau II.1</i>	Différences entre méthanisation par voie sèche et par voie humide	37
<i>Tableau II.2</i>	La comparaison de la méthanisation mésophile et la méthanisation thermophile.	38
<i>Tableau II.7</i>	Composition générale du biogaz	44
<i>Tableau III.1</i>	Produits chimiques utilisés	52
<i>Tableau IV.1</i>	Caractérisation physico-chimique des déchets de poulet (viscère + plume)	64
<i>Tableau IV.2</i>	Caractérisation physico-chimique des déchets d'olive	64
<i>Tableau IV.3</i>	Les valeurs des volumes (V_1 , V_2 , V_3) pour chaque digesteur avant la fermentation	66
<i>Tableau IV.4</i>	Les valeurs des volumes (V_1 , V_2 , V_3) pour chaque digesteur avant la fermentation	66
<i>Tableau IV.5</i>	Les valeurs de volumes (V_1 , V_2 , V_3) pour chaque digesteur après la fermentation	66
<i>Tableau IV.6</i>	Les valeurs de l'AGV et TAC pour digesteur (A, B, C) après la méthanisation	67
<i>Tableau IV.7</i>	La variation de rapport (AGV /TAC) avant et après la fermentation anaérobie	68
<i>Tableau IV.8</i>	Les valeurs de PH Avant et après la fermentation anaérobie pour les quatre digesteurs	69

LISTE DES PHOTOS

Photos	Titre	Page
<i>Photo III.1</i>	Les olive avant l'extraction	50
<i>Photo III.2</i>	Déchets d'olive utilisé	50
<i>Photo III.3</i>	Viscère de poulet	50
<i>Photo III.4</i>	Plume de poulet	50
<i>Photo III.5</i>	Digesteur type batch	52
<i>Photo III.6</i>	Les digesteurs préparés	53
<i>Photo III.7</i>	Dispositif expérimental de la méthanisation	54
<i>Photo III.8</i>	Un bain marie chauffer et régulé à 38°C	54
<i>Photo III.9</i>	L'étuve utiliser et réglée à 105 c°	55
<i>Photo III.10</i>	Echantillons avant séchage	56
<i>Photo III.11</i>	Echantillons après séchage	56
<i>Photo III.12</i>	Photo de dessiccateur	56
<i>Photo III.13</i>	Four à moufle utilisé	57
<i>Photo III.14</i>	Echantillons après calcination	57
<i>Photo III.15</i>	Dispositif de mesure de pH	59
<i>Photo III.16</i>	Mesure de volume de biogaz produit	60
<i>Photo III.17</i>	Echantillons avant de la centrifugation	61
<i>Photo III.18</i>	La centrifugeuse utilisée	61
<i>Photo III.19</i>	L'ébullition de liquide sur la plaque chauffant	61
<i>Photo III.20</i>	L'ajoute Hydroxyde de sodium (NaOH)	62
<i>Photo IV.1</i>	Test d'Inflammabilité de biogaz (déchets d'olive)	74
<i>Photo IV.2</i>	Inflammabilité de biogaz (déchets de poulet)	74

TABLE DE MATIERES

Dédicace

Remerciements

Résumé

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des photos

Introduction générale..... 1

Partie I : synthèse bibliographique

Chapitre I : Valorisation Des Déchets Organiques : Problématiques Et Enjeux

I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition du concept déchets	3
I.3. Types de déchets	3
I.3.1. Déchets ultimes	4
I.3.2. Déchets ménagers	4
I.3.3. Déchets inertes	4
I.3.4. Déchets verts	4
I.3.5. Déchets organiques	4
I.3.6. Déchets dangereux	4
I.4. Impact des déchets sur l'environnement.....	5
I.5. La gestion des déchets en Algérie	5
I.5.1. La collecte et le transport des déchets.....	6
I.5.2. Stockage et valorisation des déchets.....	6
I.5.3. L'élimination des déchets.....	6
I.5.4. Immersion des déchets.....	6
I.5.5. Enfouissement des déchets	6

TABLE DE MATIERES

I.5.6. L'incinération.....	6
I.5.7. L'enfouissement technique	7
I.6. Les déchets des oliviers.....	7
I.6.1. Historique d'olivier.....	8
I.6.2. Composition chimique	8
I.6.3. Position de la production d'huile d'olive en Algérie	10
I.6.4. Processus d'extraction d'huile d'olive	10
I.6.4.1. Le lavage, le broyage, le malaxage	10
I.6.4.2. L'extraction	10
I.6.4.3. La décantation ou centrifugation	11
I.6.4.4. Le stockage.....	11
I.6.5. Les sous-produits générés de l'extraction d'huile d'olives	11
I.6.5.1. Les margine.....	11
I.6.5.2. Les grignons d'olive.....	12
I.6.6. Devenir des déchets oléicoles en Algérie.....	13
I.6.7. Quel est l'impact des sous-produits sur l'environnement ?.....	14
I.7. Les déchets Avicole et les déchets d'abattage.....	15
I.7.1. Processus d'abattage.....	15
I.7.1.1. Étourdissement.....	16
I.7.1.2. Saignée.....	16
I.7.1.3. Échaudage et plumaison.....	16
I.7.1.4. Éviscération.....	16
I.7.2. Les parties comestibles et non comestibles des viandes blanches et des viandes rouges	17
I.7.3. Composition et propriétés physicochimiques des déchets d'abattoirs avicoles.....	19

TABLE DE MATIERES

I.7.4. Analyse des expériences techniques étrangères en matière de gestion des déchets et leur valorisation	20
I.7.5. Quelle gestion durable des déchets d'abattoirs avicoles ?.....	20
I.7.5.1. Le tri à la source	20
I.7.5.2. La collecte	20
I.7.5.3. Le traitement	20
I.7.6. Traitement des déchets d'abattoirs avicoles	21
I.7.7. Déchets générés par les abattoirs de volailles	21
I.7.8. Valorisation des déchets avicole	21
I.7.8.1. Valorisation des plumes de volaille	21
I.7.8.2. Valorisation du sang de volaille.....	22
I.7.8.3. Valorisation des viscères de volaille.....	22
I.8. Conclusion	23

Chapitre II : Production d'énergie verte par digestion anaérobie

II.1. Introduction.....	24
II.2. La Biomasse	25
II.2.1. Définition.....	25
II.2.2. Ressources de la biomasse.....	26
II.2.3. Les Avantages et les inconvénients de la biomasse.....	27
II.2.4. Valorisation de la biomasse.....	27
II.2.4.1. Valorisation par méthanisation	28
II.2.4.2. Valorisation par combustion	28
II.2.4.3. Compostage	28
II.2.4.4. La biomasse comme matière première de la chimie	28

TABLE DE MATIERES

II.3. La Méthanisation	29
II.3.1. Définition de la méthanisation.....	29
II.3.2. La conversion de la matière organique.....	29
II.3.3. Processus de méthanisation.....	30
II.3.3.1. L'hydrolyse	30
II.3.3.2. L'acidogènes.....	31
II.3.3.3. L'acétogénèse	31
II.3.3.4. La méthanogènes	32
II.3.4. Paramètres physico-chimiques de la méthanisation	33
II.3.4.1. Le substrat	33
II.3.4.2. Température de digestion	33
II.3.4.3. Potentiel d'hydrogène pH.....	34
II.3.4.4. Degré d'humidité	35
II.3.4.5. Alcalinité	35
II.3.4.6. Homogénéité de substrat (Agitation).....	35
II.3.4.7. Acides gras volatils.....	36
II.3.4.8. L'absence d'oxygène.....	36
II.3.5. Procédés des méthanisation	36
II.3.5.1. La teneur en matière sèche.....	36
II.3.5.2. La température de réaction	37
II.3.6. Le digesteur	39
II.3.6.1. Les digesteurs discontinus ou batch.....	39
II.3.6.2. Les digesteurs continus.....	39
II.3.6.3. Les procédés semi-continus	39
II.3.7. Avantages et les inconvénients de la digestion anaérobie	40
II.4. Produits de la méthanisation	41
II.4.1. Digestat	41

TABLE DE MATIERES

II.4.1.1. Les voies de valorisation de digestat.....	41
II.4.2. Biogaz	42
II.4.2.1. Historique.....	42
II.4.2.2. Définition.....	42
II.4.2.3. Composition du biogaz	43
II.4.2.4. Caractéristiques du biogaz produit	44
II.4.2.5. Les avantages du biogaz.....	44
II.4.2.6. La valorisation du biogaz	44
II.5. Conclusion.....	47

Partie II: Etude Expérimentale

Chapitre III : Matériels et Méthodes

II.1. Introduction	48
III.2. Les matières organiques utilisées	50
III.3. Description du prototype de digesteur biomasse.....	51
III.3.1. Matériels utilisés	51
III.3.2. Produits chimiques	52
III.3.3. Plan d'expérience	52
III.4. Conditions de digestion	54
III.5. Méthodes d'analyses.....	55
III.5.1. Détermination de taux la matière sèche (MS)	55
III.5.2. Détermination de la teneur en matière organique (MO).....	57
III.5.3. Paramètre suivis	58
III.5.3.1. Paramètres du fonctionnement	58
III.5.3.1.1. Potentiel d'hydrogène pH	58
III.5.3.1.2. Volume de biogaz produit	59
III.5.3.2. Paramètres d'épuration.....	60
III.5.3.2.1. La détermination des AGV.....	60

TABLE DE MATIERES

III.6.6.3.2. La détermination des TAC.....	62
--	----

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction.....	64
IV.2. Caractérisation du substrat utilisé.....	64
IV.3. Évolution des paramètres d'épuration	66
IV.3.1 L'évolution des acides gras volatils et Le titre alcalimétrique complet.....	66
IV.3.1.1 Rapport acides gras volatils/Titre alcalin complet	67
IV.4. Evolution des paramètres de fonctionnement.....	69
IV.4.1. Évolution du pH.....	69
IV.4.2. Evolution du volume de biogaz.....	71
IV.5. Inflammabilité de biogaz	74
IV.6. Conclusion.....	74
Conclusion Générale.....	75
Références bibliographiques.....	77

Annexes

Introduction Générale

Introduction générale

Des ressources naturelles surexploitées et un environnement extrêmement pollué, sont les tristes répercussions du développement industriel du monde. Face à cette situation critique, il est urgent d'instaurer des politiques plus rationnelles, suffisamment saines pour préserver notre planète. Dans ce sens, le traitement et la valorisation des déchets avant de les rejeter en milieux récepteurs, est devenu une obligation [1, 2] .

D'un autre côté, en Algérie, malgré les richesses en hydrocarbures l'approvisionnement en combustible reste l'un des problèmes majeurs et l'épuisement des ressources pétrolières dans un proche avenir et la préoccupation socio-économique accrue concernant l'environnement ont conduit à développer des carburants durables et alternatifs à partir de sources renouvelables bon marché et respectueuses de l'environnement, la production de l'énergie par la biomasse est une technique efficace de conversion des ressources durables en énergie qui respecte l'environnement . Face à toutes ces problématiques citées, la méthanisation présente le double intérêt d'être simultanément une filière de production d'énergie renouvelable et une voie alternative de traitement des déchets en minimisant les risques de pollution liés aux autres modes de traitement[3]

Cette énergie renouvelable peu coûteuse et non polluante peut être utilisée pour compléter l'énergie fossile non renouvelable. De plus, le biogaz connu depuis longtemps, mais ne faisant pas partie de nos traditions socioculturelles et économiques, représentera certainement la meilleure solution pour la préservation de l'environnement. Plusieurs travaux de recherche ont été menés sur la production de biogaz à partir des déjections bovines seules ou en Co-digestion [4].

La production du biogaz est en nette croissance partout dans le monde. En Algérie, le développement de cette filière est encore à l'échelle de l'expérimentation où des travaux de production de biogaz à partir de déchets organiques sont menés à l'échelle de laboratoire ; nous pouvons citer comme exemple les travaux *Tahri et al.*[5] (sur les déchets d'abattoir et de volaille). A plus grande échelle, la wilaya d'Oran a été retenue pour abriter un projet-pilote pour produire de l'énergie électrique à partir du biogaz généré par le centre d'enfouissement technique de **Hassi Bounif**. Un deuxième projet pilote d'installation de taille industrielle est à l'étude à Constantine ; il s'agit d'une unité de tri et de valorisation des déchets par une filiale d'un groupe industriel étatique dédiée à l'environnement [6].

Introduction générale

C'est dans cette optique que s'inscrit la présente étude. Il s'agit d'étudier la valorisation de deux sous-produits issus de l'industrie agroalimentaire par digestion anaérobie. Le premier volet de ce travail est dédié à l'étude de potentiel de production du biogaz afin de générer de l'énergie dite verte à partir des déchets d'olives et à partir de déchets de volaille dans des petites installations au laboratoire. Quant au deuxième volet, il a comme objectif la détermination des paramètres physico-chimique des échantillons avant et après la fermentation

Le plan de travail de cette étude est articulé autour quatre chapitres. Les deux premiers chapitres sont consacrés à la partie théorique reliée à notre travail, en premier chapitre nous avons abordé la bibliographie liée aux toute les types des déchets en général et nos échantillons en particulier, et les différentes méthodes de traitement et de valorisation des déchets organiques, le deuxième chapitre présente une généralité sur la biomasse, la technique de production de biogaz et la digestion anaérobie, ainsi les différentes méthodes de valorisation du biogaz.

L'identification des échantillons ainsi que les différentes méthodes expérimentales sont décrites dans le troisième chapitre. En revanche, le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus et à leur discussion, et à la fin une conclusion des principaux résultats.

PARTIE I :
Synthèse bibliographique

Chapitre I :

Valorisation Des Déchets Organiques : Problématiques Et Enjeux

I.1 Introduction :

L'industrie oléicole Algérienne génère, en plus de l'huile comme produit principal, de grandes quantités de sous-produits solides (grignons d'olive, feuilles et bois) et liquides (margines). La mise en décharge de ce type de déchets n'est pas autorisée par la législation Algérienne. Malgré les différentes voies de valorisations existantes, ces déchets oléicoles sont soit brûlés, soit rejetés dans l'environnement, sans traitement préalable réel. Or, ils sont toxiques pour l'environnement.[7]

D'une autre part, en conséquence au pouvoir d'achat croissant, et à l'instar des autres produits de consommation, la demande en viande est en perpétuelle augmentation en Algérie. Cette industrie génère d'importantes quantités de déchets et sous-produits qui ne sont pas valorisés (malgré leurs potentialités) et sont jetés dans la décharge publique (pour les déchets solides) et dans les égouts (pour les liquides) et polluent ainsi les sols, les nappes phréatiques, les oueds et le littoral. La gestion de ces déchets et sous-produits est délicate.[8]

Dans ce chapitre nous avons abordé la bibliographie liée aux déchets agro-alimentaires en général et leur cycle de vie en particulier, et les différentes méthodes de traitement et de valorisation

I.2 Définition du concept déchets :

On appelle déchet « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou, plus généralement, tout bien meuble abandonné que son destinataire destine à l'abandon » (Loi n°75-633 du 15 juillet 1975). [9]

Ainsi, selon un déchet (détritus, résidu, ordure,) est globalement une substance, un composé ou un sous-produit, issu ou non d'un processus de transformation, destinée à l'élimination, après avoir éventuellement subi une altération physique, chimique, biologique. C'est un résidu jugé inutile, dangereux ou encombrant par le système dans lequel il apparaît.[10]

I.3 Types de déchets :

Stockage, lieu de décharge, la possibilité de biodégradation..., les déchets sont subdivisés en plusieurs catégories. Ainsi nous pouvons citer différents types de déchets. Selon leur composition chimique, physique et biologique. [10]

I.3.1 Déchets ultimes :

Sont les déchets résultants ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. Ce sont des déchets qui ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique importante. [5]

I.3.2 Déchets inertes :

Ce sont des déchets non biodégradables, bruts et qui n'ont pas été modifiés physiquement, chimiquement ou biologiquement. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles elles entrent en contact d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. [5, 10]

I.3.3 Déchets ménagers :

C'est l'ensemble des déchets produits par l'activité quotidienne des ménages. Ils comprennent les ordures ménagères, les encombrants, les déchets ménagers spéciaux, les déchets de l'assainissement individuel, qui sont collectés par les communes. [5, 9]

I.3.4 Déchets verts :

Ce sont les débris des jardins, déchets végétaux des parcs, (feuilles mortes, branches cassées...)[10]

I.3.5 Déchets organiques :

Bio déchets appelé aussi déchets fermentescibles ; Les déchets organiques composés de matière organique caractérisée par la présence de carbone issu d'organismes vivants, végétaux ou animaux. Ces déchets peuvent subir un phénomène de biodégradabilité par les micro-organismes. Ils incluent : les végétaux, les déchets putrescibles de la cuisine et ceux collectés auprès des cantines et restaurants d'entreprises, Ces déchets sont valorisés pour obtenir du compost. [9, 10]

I.3.6 Déchets dangereux :

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

et ils regroupent des déchets essentiellement d'origine industrielle, mais également produits par des petites entreprises ou structures, par les ménages ou par le monde agricole (produits phytosanitaires). Ils contiennent des substances toxiques ou dangereuses en concentration plus ou moins forte. [5, 9]

I.4 Impact des déchets sur l'environnement :

Depuis toujours, toutes les activités humaines produisent des déchets. Mais de nos jours, leur impact sur l'environnement n'est plus le même ; l'utilisation intensive et abusive des ressources et le rejet des déchets dans l'environnement contribuent à détériorer le milieu.

Chaque jour la pollution environnementale augmente, Si l'on pouvait dire que les déchets produits avant la révolution industrielle étaient peu nombreux et pour la plupart biodégradables, ce n'est plus le cas aujourd'hui. Les déchets produits par les familles sont lourds, encombrants, variés et souvent toxiques ; leurs quantités sont toujours croissantes. Actuellement, ce sont les usines d'incinération qui réduisent le volume et le poids des déchets. Les déchets lourds et volumineux sont enterrés quant à eux dans des centres d'enfouissement technique (C.E.T., dénommés avant décharges)[10]

L'Algérie a fixé des objectifs à l'horizon 2025 dans le domaine de l'aménagement du territoire dans lequel elle intègre le concept du développement durable.

Cette nouvelle vision est basée sur la croissance économique, l'équité sociale et la protection de l'environnement. Elle vise l'amélioration de la qualité vie et du bien-être de la population dans une logique de gestion durable des déchets. Les objectifs nationaux algériens sont la réduction des quantités de déchets produites et l'atténuation de l'impact de leur élimination sur l'environnement[11]

I.5 La gestion des déchets en Algérie :

Après avoir donné un aperçu sur les définitions des différents types des déchets en Algérie, en se basant sur la réglementation en vigueur, nous préciserons ensuite les définitions des modes de traitement existant en Algérie.

La gestion des déchets consiste en toute opération relative à la collecte, au tri, au transport, au stockage, à la valorisation et à l'élimination des déchets, y compris le contrôle de ces opérations. [12]

À partir de cette définition, plusieurs opérations se distinguent dans le mode de gestion des déchets existant en Algérie :[10, 12]

I.5.1 La collecte et le transport des déchets :

Le traitement des déchets nécessite au préalable une collecte depuis le lieu de production jusqu'au lieu de prise en charge par le service public Ainsi, la collecte des déchets est définie par l'évacuation des déchets vers une destination appropriée (décharge, tri, station de transfert...), une bonne collecte se traduit par l'éloignement rapide des déchets des collectivités à fin d'éviter les dangers et les nuisances d'hygiène et de la santé public (nuisance olfactive, pollution et propagation des mouches et des moustiques...). [10]

I.5.2 Stockage et valorisation des déchets :

Une fois collectés, les déchets vont être valorisés en fonction de leur nature et de leurs caractéristiques, ils sont acheminés vers des installations de traitement adaptées à leurs spécificités (recyclage et compostage, incinération stockage réglementaire). Ainsi, la valorisation des déchets englobe l'ensemble des actions par lesquels on transforme un déchet en une nouvelle matière. Cette valorisation est mise en œuvre dans le cadre de différents types d'installations telles que les unités de compostage ou de méthanisation ou encore, les installations d'incinération et de Co-incinération.[10]

I.5.3 L'élimination des déchets :

Comprend les opérations de traitement thermique, physico-chimique et biologique, de mise en décharge, d'enfouissement, d'immersion et de stockage des déchets, ainsi que toutes les autres opérations ne débouchant pas sur une possibilité de valorisation ou autre utilisation du déchet. [12]

I.5.4 Immersion des déchets :

Tout rejet de déchets dans le milieu aquatique[12]

I.5.5 Enfouissement des déchets :

Tout stockage des déchets en sous-sol.[12]

I.5.6 L'incinération

Est un processus d'oxydation de la partie combustible du déchet dans une unité adaptée aux caractéristiques variables des déchets. Ce processus permet une forte réduction de volume. Les

déchets issus de l'incinération (cendres) sont ensuite éliminés en centre d'enfouissement technique[12]

I.5.7 L'enfouissement technique :

Les déchets spéciaux ultimes sont ceux qui ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de leur caractère dangereux et polluant. Les déchets admis en centre d'enfouissement technique (CET) sont des déchets essentiellement solides, minéraux avec un potentiel polluant constitué de métaux lourds peu mobilisables. Ils sont très peu réactifs, très peu évolutifs, et très peu solubles.[12]

I.6 Les déchets des oliviers : [13]

L'olive est le fruit de l'olivier, l'olivier est un arbre au tronc tortueux et noueux qui s'adapte aux sols pentus et caillouteux, il produit tous les 2 ans dès l'Age de 4 ans, il peut atteindre 10 mètres de hauteur.

La récolte des olives débute fin septembre pour les variétés précoces et se prolonge jusqu'à fin février pour les variétés tardives. Il y a au moins 3 techniques de cueillette : les cueillir à la main, gauler l'olivier pour faire tomber les olives dans les filets tendus au-dessus du sol ou bien ramasser les fruits tombés à terre.

Il existe de nombreuses variétés : olives noires et vertes ne sont pas nécessairement de variétés différentes mais correspondent à différents stades de maturité du fruit l'olive, verte au départ devient violette puis noire à sa maturité. Plus elle est mure plus elle est gorgée d'huile.



Figure I.1 : Les fruits d'olivier [14]

I.6.1 Historique d'olivier : [15]

L'olivier a toujours été cité comme arbre sacré dans la plupart des religions, de l'antiquité à nos jours. Le coran parle de « cet arbre sacré qui sort de Mont Sinea » notamment par les sourates 23 (les croyants) et 24 (la lumière). Les grecs n'en confient la culture qu'aux vierges et aux hommes purs. Les chrétiens utilisent l'huile pour l'onction sainte ou « saint Chrême ». Verser d'huile d'olive sur la tête d'un prêtre ou d'un roi constituait un symbole de consécration divine.

La culture de l'olivier est donc très ancienne. Son histoire se confond avec celle du bassin méditerranéen et les premières traces d'oliviers remontent à 6000 avant J-c. en Palestine, en Syrie et en Phénicie.

Cette culture a connu ensuite un fort développement en Grèce puis une extension dans tout le bassin méditerranéen grâce aux Romains qui développèrent la culture de l'olivier et le commerce de l'huile. Bien que son aire de répartition ne cesse de s'élargir, l'olivier reste cependant une culture méditerranéenne par excellence et l'olive est aujourd'hui l'un des symboles de la diète méditerranéenne.

I.6.2 Composition chimique :

La composition chimique de l'olive est fonction de plusieurs paramètres tels que : La variété, le climat et les conditions culturales.

D'après **BALAT SOURAS** les différents constituants de la pulpe d'olive sont les suivants [13]

- | | |
|------------------|----------------------|
| - Eau | - Polysaccharides |
| - Protéines | - Substances |
| - Tannins | - Matières minérales |
| - Oleuropéines | - acides organiques |
| - Sucres simples | - Matières grasses |

I.6.3 Position de la production d'huile d'olive en Algérie :

Actuellement, l'huile d'olive est consommée pratiquement dans sa totalité dans les zones de production ; les vergers s'étendent principalement (80%) dans les régions de montagne (grande et petite Kabylie, la région de Jijel et une partie de l'Est algérien)[11]

La consommation par habitant a connu une augmentation de 80% durant la dernière décennie.

La production d'huile d'olive est passée de 333 200 tonnes en 2000 à 715 970 tonnes en 2013 soit un rendement de 17.7 l/q. Cette augmentation de production d'huile engendre ainsi l'augmentation des sous-produits générés ; les grignons sont passés de 925 556 tonnes en 2000 à 1 988 805 en 2013 et les margines de 1 388 332 tonnes en 2000 à 2 987 208 en 2013 (**Figure I.2**). Jusqu'à l'année 2000, l'industrie oléicole algérienne était composée majoritairement d'huileries traditionnelles, ensuite de nouvelles méthodes de trituration commencèrent à être introduites, il a été noté 1400 d'huileries traditionnelles, 85 huileries avec presses ou sous-presses et 165 huileries modernes. [16]

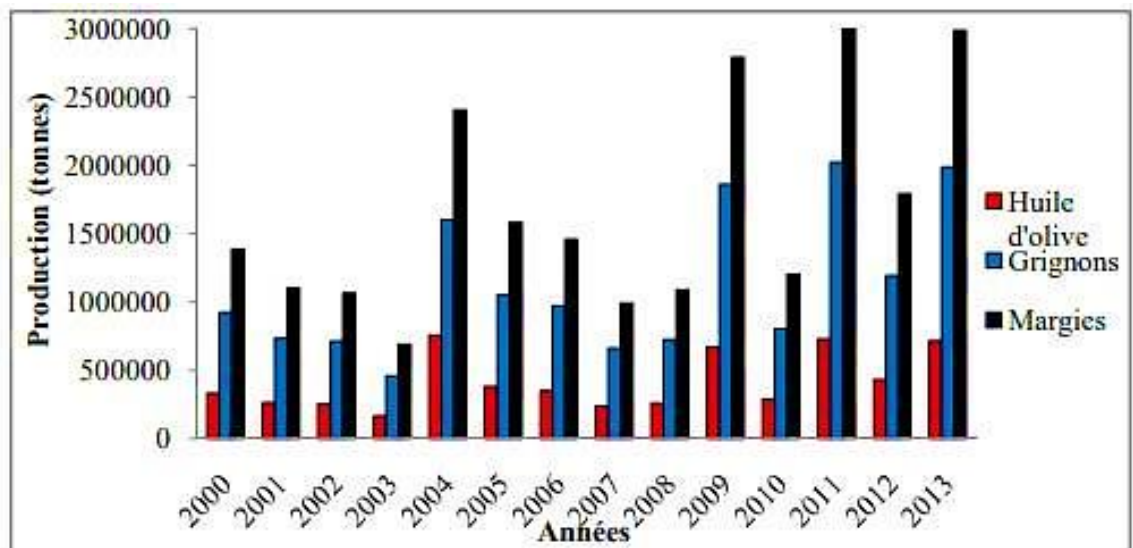


Figure I.2 : Evolution de la production d'huile d'olive et des sous-produits pour la période 2000-2013[16]

Dans ce contexte, en vue de moderniser le secteur de l'extraction d'huile d'olive pour améliorer la qualité du produit, les autorités algériennes ont adopté un programme de modernisation de l'industrie de l'huile d'olive et de l'huile de grignons d'olive) et de traitement des sous-produits, dans le but de disposer de 201 unités modernes d'extraction d'huile d'olive équipées d'un système continu à l'échelle nationale[11]

La structure variétale destinée à la fabrication d'huile d'olive montre la prédominance de trois variétés produisant des huiles ayant des caractéristiques particulières :

La variété CHEMLAL de Kabylie (30% des superficies totales et 44% des terres destinées à l'huile d'olive): cette variété locale, donc rustique (ne nécessite pas de gros moyens pour son maintien), est la plus répandue en Kabylie, dans l'Atlas Blindée, dans la Mitidja et dans la

région des Bibans. Elle est très estimée pour la fabrication de l'huile de bonne qualité ; les variétés AZERADJ et BOUCHOUK : elles accompagnent les peuplements de CHEMLAL et permettent la pollinisation. La variété ABERKANE est répandue dans la région de Sed Douk (Bejaia) et donne des résultats satisfaisants en huilerie. [16]

I.6.4 Processus d'extraction d'huile d'olive :

Le procédé de fabrication de l'huile d'olive est relativement simple mais nécessite de respecter avec soin ses différentes étapes : lavage, broyage, pressurage, décantation et stockage.[17]

I.6.4.1 Le lavage, le broyage, le malaxage : [17]

Au plus tôt après la cueillette, les olives destinées à la fabrication de l'huile sont triées pour éliminer les brindilles et les feuilles, puis lavées à l'eau froide. Ensuite, les olives sont broyées immédiatement pour éviter toute oxydation avec les noyaux qui contiennent un antioxydant comme conservateur naturel.

Le broyage peut être effectué avec des meules en pierre ou avec un broyeur métallique. Le broyage ne suffit pas à briser la totalité des vacuoles contenant l'huile. Pour libérer le maximum d'huile, un malaxage est appliqué à la pâte jusqu'à l'obtention d'une pâte onctueuse pour faciliter l'extraction. Le broyage et le malaxage permettent d'obtenir une pâte.

I.6.4.2 L'extraction :

On peut exprimer l'huile soit par décantation soit par pression. La décantation se fait dans un décanteur, cylindre métallique tournant à grande vitesse (4000 tours/minute), dans lequel les différents composants de la pâte se séparent en fonction de leur densité. L'huile, plus légère que l'eau et les matières solides, se recueille séparément des autres éléments au centre du cylindre. La pression est le procédé le plus ancien. La pâte est répartie sur des disques en fibre naturelle ou synthétique tressés appelés soutins, qui servent à la fois d'armature et de filtre lors de la pression. Une centaine de ces disques sont empilés pour être pressés. La partie liquide, constituée d'eau de végétation (margines), et d'huile, s'écoule, alors que la partie solide (noyaux et pulpe) reste entre les soutins : c'est ce que l'on appelle le grignon. C'est durant ce processus que l'odeur opine au goût amer est éliminée dans les eaux de végétation [17]

I.6.4.3 La décantation ou centrifugation :

Le liquide obtenu à l'extraction est composé d'huile et d'eau. Il est entraîné dans un décanteur centrifuge qui va séparer l'huile, Les déchets solides résiduels et la margine. Jadis, la décantation se faisait par un procédé naturel : l'huile, plus légère que l'eau, remontait à la surface des margines et était recueillie [17]

I.6.4.4 Le stockage :

L'huile d'olive est immédiatement stockée dans des cuves en inox afin d'éviter l'oxydation. L'huile peut alors être filtrée pour la rendre limpide et brillante ou bien être mise en bouteille en l'état. Une fois embouteillée, l'huile d'olive doit être conservée à l'abri de la chaleur et de la lumière. [17]

I.6.5 Les sous-produits générés de l'extraction d'huile d'olives :

Les grignons d'olive et les margines sont les produits issus de l'activité des moulins à huile, les effluents liquides sont appelés margines, la fraction moins pâteuse est appelée grignon d'olive

I.6.5.1 Les margines :

Ce sont le principal rejet liquide de la trituration des olives. Vue leur composition chimique, elles possèdent un pouvoir polluant très élevé. Épanchées sur les sols, les margines dégradent la qualité du milieu.[10]

a) Valorisations possibles des margines :

Plusieurs travaux ont été réalisés pour exploiter les margines afin de diminuer leur risque de pollution pour l'environnement. Les solutions proposées varient du simple entreposage par épandage dans des bassins à des procédés de valorisation plus ou moins compliqués.

L'entreposage par épandage dans des bassins à l'air libre est la solution la moins coûteuse et la plus facile à réaliser.[18] Par contre, elle présente des inconvénients. En effet l'évaporation est difficile à cause de la couche huileuse qui se forme en surface. L'infiltration des polluants vers le sous-sol et vers la nappe phréatique est à prendre en compte car les concentrations en certains éléments présents dans les margines dépassent les normes de rejet en milieu naturel.

L'utilisation des margines comme fertilisant pour les sols et les cultures est une pratique courante qui permet de résoudre partiellement le problème de l'élimination de ces effluents liquides [19]

Comme les margines sont très riches en matières organiques et en nutriments, les sols arides peuvent bénéficier de cette utilisation, notamment les pays producteurs de l'huile d'olive qui se situent dans les régions arides et semi arides [20]

La valorisation agricole des margines par compostage a pour but essentiel de fixer les éléments fertilisants sur un substrat carboné au cours d'un processus aérobie, pour les restituer au sol en fonction des besoins des plantes.

Dans cette solution les éléments fertilisants sont mieux intégrés dans le complexe humique et sont mis progressivement à la disposition de la plante par la biodégradation de la matière organique. De ce fait ils sont moins susceptibles de migrer en grosse quantité vers la nappe. Plusieurs techniques de traitement des margines par voie anaérobie peuvent être améliorées pour permettre la valorisation de celles-ci. [21]

L'effet antioxydant des poly phénols reste le facteur limitant pour ces procédés de valorisation. Une étape de prétraitement est nécessaire afin d'extraire les composés phénoliques. Par ce procédé, les margines peuvent donc être revalorisées en eau d'irrigation (eau traitée), en biogaz et en biomasse riche en protéine valorisable en aliment de bétail [22]. En outre, des traitements physico-chimiques ont été proposés : on cite l'adsorption, l'ultrafiltration, la floculation/la clarification, l'échange d'ions, etc. [23]

Par ailleurs, le traitement thermique de ce type de déchet semble une solution pertinente pour l'environnement. Un intérêt particulier est porté par la suite à la voie de valorisation thermique des grignons d'olives et des margines ainsi qu'à l'utilisation des déchets solides comme biosorbant des métaux lourds.[24]

I.6.5.2 Les grignons d'olive :

Représentent la fraction solide résultante de la trituration des olives. Elles sont composées par une fraction riche en lignine provenant des fragments de noyaux, et l'autre partie renfermant principalement des glucides (la cellulose et l'hémicellulose), et le reste est composé de protéines et de l'huile résiduelle qui dépend de la technique d'extraction. [10]

a) Valorisations possibles des grignons :

Les grignons d'olive contiennent une teneur élevée en polyphénols, ce qui pose de sérieux problèmes environnementaux. [25] Mais grâce à leur richesse en matière organique et minérale, les grignons d'olives peuvent être valorisés dans divers domaines.

La première étape de valorisation des grignons bruts, quand ils ne sont pas destinés à la fermentation, est l'extraction de l'huile résiduelle par solvant. Cette technique permet la récupération d'au moins 6% d'huile alimentaire appelée souvent « huile de grignons ». Les grignons épuisés constituent, entre autres une matière première pour la production du furfural, du méthanol et de l'acide acétique. [26]

Dans le domaine agricole, les grignons d'olives peuvent être employés comme fertilisant, après avoir subi un compostage pour faciliter sa dégradation et éliminer ses effets phytotoxiques. [27]

De plus, ce sous-produit de l'industrie oléicole peut être utilisé en tant qu'aliment pour bétail. Les grignons épuisés tamisés (sans noyaux), sont de conservation facile et ont une meilleure valeur alimentaire[28]

La fermentation des grignons d'olives en milieu solide par des champignons thermophiles et filamenteux produit une panoplie de composés d'arômes d'intérêt agroalimentaire, cosmétique et même pharmaceutique [29]. Tandis que la fermentation anaérobique des lisiers de vaches avec des grignons d'olives produit du méthane à 57 - 65% du biogaz produit. Ce méthane est utilisé comme une source d'énergie pour le chauffage de l'eau (direct) et en production de l'électricité à usage domestique (indirect). Fabrication du charbon actif, qui a pour but l'absorption des colorants[30, 31] .

I.6.6 Devenir des déchets oléicoles en Algérie :

Les sous-produits issus inévitablement après trituration des olives fait l'objet de débats dans certains pays oléicoles depuis longtemps, plusieurs questions ont été posés non seulement sur leurs conséquences écologiques et environnementales, mais aussi sur leurs recyclages dans l'économie agricole. Ainsi, pour une production annuelle de 30.000 Tonne d'huile d'olives, il y a rejet obligatoirement dans la nature de 105.000 T d'eau végétale (margines) dont le pouvoir de pollution est 6000 fois, soit une pollution immédiate de 630.000.000 Tonnes d'eau des cours d'eau). Pour la même quantité d'huile, les grignons sont évalués à 60.000 T. Ils sont,

stockés à proximité des huileries, ce qui est interdit en premier lieu dans le guide de bonne pratique imposé par les normes de production de qualité. Malheureusement, en Algérie, ces résidus n'ont pas fait à ce jour l'objet d'aucune attention ni par les pouvoirs publics ni par les opérateurs. [10]

I.6.7 Quel est l'impact des sous-produits sur l'environnement ? [11]

Actuellement, plus d'une centaine de milliers de tonnes des résidus d'huile d'olive (grignons d'olives et margines) sont déversés dans la nature, entraînant une pollution considérable, en particulier dans la région centre d'Algérie, qui concentre environ 78% des huileries du pays, 58% de ces huileries étant de type traditionnel.

En 2013, pour une production annuelle de 715 970 tonnes d'huile d'olive, il y a eu rejet de 1988 805 tonnes de grignons et 2 987 208 Tonnes de margines ; encombrant par leur pouvoir polluant : 60 000-180 000mg/dm³ de demande chimique en oxygène (DCO) et 20000-55000 mg/dm³ de demande biochimique en oxygène (DBO).

Les conséquences environnementales de ces rejets sont très importantes. Elles causent notamment, la destruction des poissons et de la vie aquatique au sens large dans les rivières et les oueds de la région, détérioration considérable de la qualité de l'eau des nappes phréatiques, avec des eaux impropres à la consommation, terres rendues incultes aux abords des oueds du fait d'une salinité trop importante, les incendies liés à la fermentation des grignons.

La question essentielle qui se pose par rapport à cette situation à tous les pays méditerranéens oléicoles est : comment transformer un problème écologique en opportunité économique ?

C'est une question qui s'est posée depuis près d'une trentaine d'années aux écologistes ; elle continuera à tarauder pour longtemps l'esprit des économistes.

Dans notre pays, ces résidus n'ont à ce jour fait l'objet d'aucune attention ni par les pouvoirs publics ni par les opérateurs. Récemment, le pays a pris une série de mesures institutionnelles, stratégiques et financières visant à mettre en place des programmes de développement de l'agriculture dont la valorisation des sous-produits constituera l'une des facettes.

Cette expertise a été engagée selon une vision de partenariat avec les acteurs locaux de développement propre et durable. Elle aura pour rôle d'appuyer le pays et en particulier les communes dans l'élaboration de méthodes de protection de la nature par rapport aux rejets

émanant de ces industries en recherchant des solutions adaptées et durables selon une approche globale et des approches spécifiques à des contextes locaux. De ce fait, l'Algérie impose aux huileries de se doter de bassins de décantation ; pour séparer l'eau contenue dans les margines des particules solides en suspension ;

Alors que ceci n'est pas du tout efficace. Il s'agit uniquement de solution superficielle alors que l'intérêt réside surtout dans leur recyclage dans l'économie agricole.

I.7 Les déchets Avicole et les déchets d'abattage

Le processus de production des viandes génère non seulement de la viande pour la consommation humaine, mais aussi des déchets qui sont soumis à une réglementation afin d'éviter les contaminations, les pollutions, protéger l'environnement et la santé publique.[32] Les rejets d'abattoirs sont classés parmi les rejets des industries agroalimentaires les plus dommageables à l'environnement. [33]

Les déchets d'abattage sont des substances organiques pouvant subir un phénomène de biodégradabilité[34].

Ce sont des déchets qui proviennent du tube digestif et du sang des animaux abattus. Ils présentent un taux de Matière Sèche de l'ordre de 40 % et une composition globale riche en fibres et en éléments nutritifs qui justifient et incitent à une récupération de ces déchets en vue d'une valorisation en biogaz. [9]

I.7.1 Processus d'abattage :

La viande de volaille est, après le porc, la plus produite et la plus consommée au monde. Le poulet occupe la tête de cette production, avec 85% de la viande de volaille produite (poulet, dinde, oie, canard...).[34]

On procède d'abord à l'accrochage de la volaille, puis on procède à l'étourdissement, saignée, échaudage, plumaison, éviscération, refroidissement, calibrage, conditionnement et stockage réfrigéré avant expédition (figure I .3) [9]

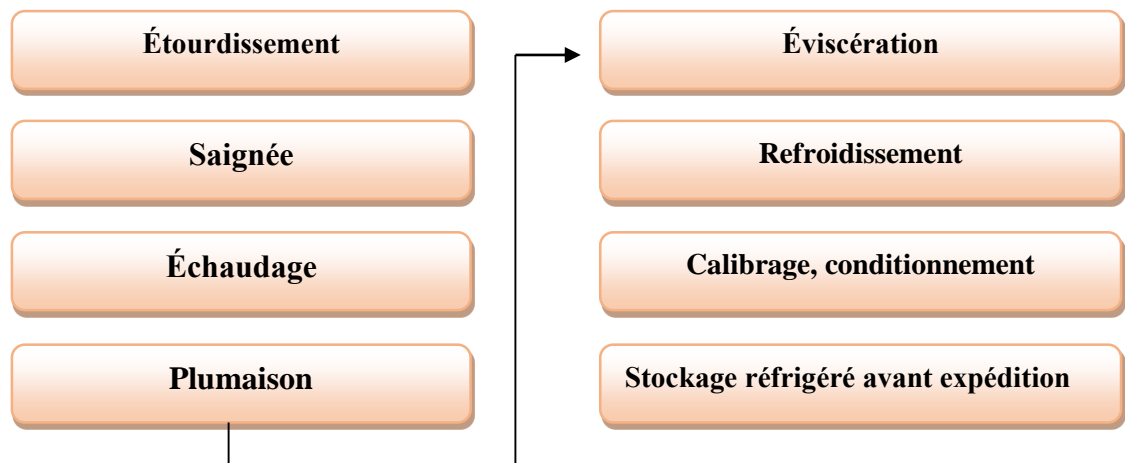


Figure I.3 : Description du processus d'abattage.[9]

I.7.1.1 Étourdissement :

On peut utiliser de l'électricité à Bas voltage (70 à 100 V) : bain d'eau, système manuel (Électrodes appliquées sur la tête), couteau électrifié ou à Haut voltage (500V) : plaque métallique, inclinée et électrifiée disposée dans une enceinte pour protéger le personnel. [9]

I.7.1.2 Saignée:

Il s'agit d'une Incision sur le côté du cou (couteau, lame de scie circulaire, Cône de saignée) ou bien d'une saignée des volailles au moyen d'un Cône de saignée. Concernant la récupération, la moitié du volume sanguin de la volaille est égale à $\pm 3,5$ % par rapport au poids vif à l'abattage [9].

I.7.1.3 Échaudage et plumaison:

L'échaudage et la plumaison se fait dans un bain d'eau chaude à des températures idéales 62-63 °C.[9]

I.7.1.4 Éviscération :

L'éviscération est schématisée dans la *figure I.4*

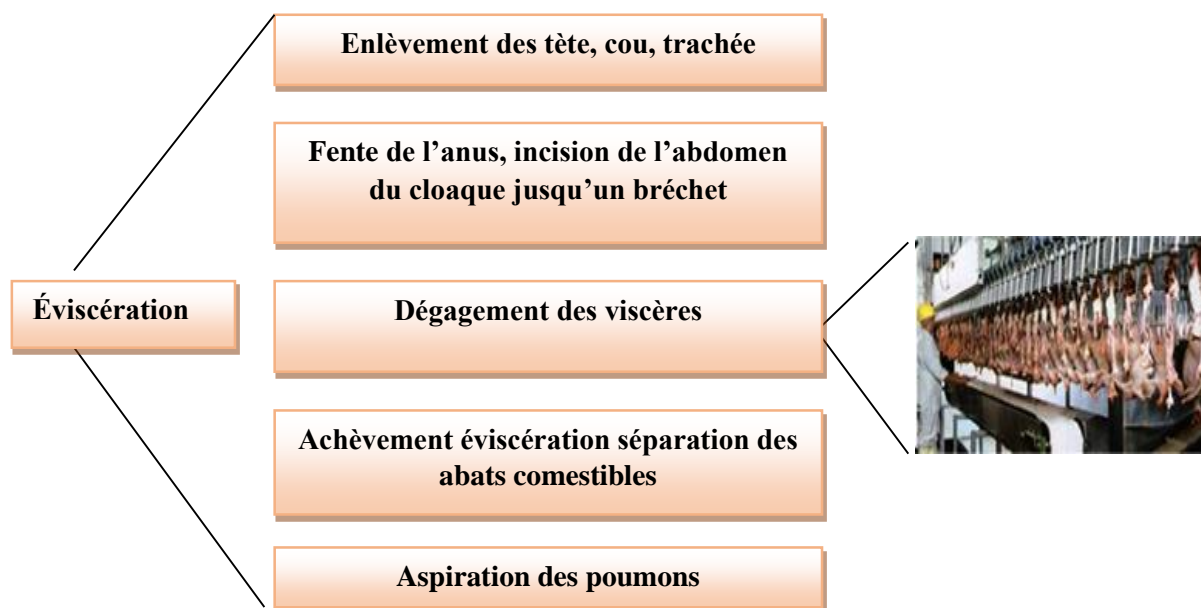


Figure I.4: Schéma récapitulatif de l'éviscération.[9]

Dans les abattoirs et des ateliers de découpe et de transformation de volailles, les déchets sont les plumes, les boyaux, les ailerons, les pattes, les têtes et le sang.[9]

I.7.2 Les parties comestibles et non comestibles des viandes blanches et des viandes rouges

Les parties comestibles et non comestibles des viandes blanches et des viandes rouges sont représentées par les *Tableau I.1 et I.2* .[32]

Tableau I.1: Les parties comestibles et non comestibles des volailles conformément à l'arrêté interministériel du 02/07/1995, relatif à la mise à la consommation des volailles abattues[32]

Viande de la volaille (poulet de chair)	
Parties non comestibles	Parties comestibles
<ul style="list-style-type: none"> - Sang - Trachée - Viscères - Têtes - Plumes - Pattes 	<ul style="list-style-type: none"> - Foie - Cœur - Gésier

Tableau I.2 : Les parties comestibles et non comestibles des ovins et des bovins en Algérie.[32]

Viande rouge (ovins, bovins)	
Parties non comestibles	Parties comestibles
- Sang	- Têtes
- Os	- Pieds
- Phanère	- Boyaux, réservoirs gastriques
- Glandes et mamelles	- Foie, cœur et rognons
- Vessies, verge, tractus génital femelle, et placenta	- Panses et caillettes
- queues	- Trachée, rate, queue, et mamelles
- Pancréas, vésicule biliaire et bile	- Poumons
- Cornes et sabots	
- Saisies de viandes et d'organes	
- Fumier récolté dans les enclos de la tabulation	
- Matières stercoraires contenues dans les réservoirs gastriques	

Après analyse des tableaux, on note de manière générale que les parties non comestibles sont plus nombreuses que les comestibles et ce, quel que soit l'espèce étudiée. De plus, certaines des parties comestibles d'une espèce ne le sont pas forcément chez l'autre.

A titre d'exemple, les têtes et les pieds sont comestibles pour les ovins et bovins, alors qu'elles ne le sont pas pour les volailles.

Donc Les déchets de volailles étant des parties molles, sont facilement biodégradables et se prêtent donc mieux au compostage comparé à certains déchets issus des bovins et des ovins, notamment les sabots et les cornes.

Selon l'étude de *Penven en 2013* [35], la répartition en % des différents déchets issus de l'abattage des volailles est représentée par la **figure I.5**.

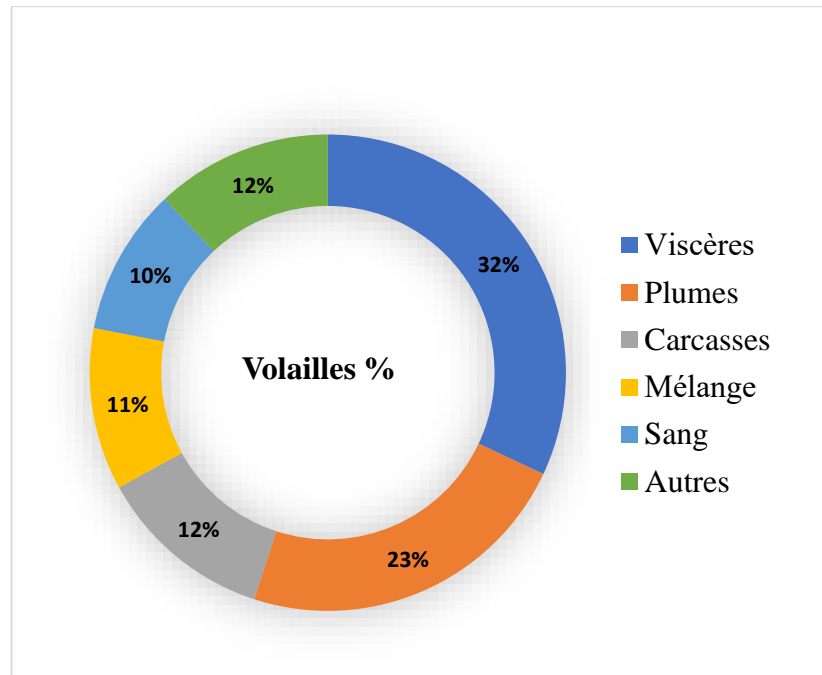


Figure I.5: Répartition (en %) des différents déchets issus de l'abattage des volailles.[35]

I.7.3 Composition et propriétés physicochimiques des déchets d'abattoirs avicoles

Une étude marocaine réalisée par (Elmoualdi et *al.*, 2006) et qui a pour objectif la caractérisation, transformation et valorisation des déchets d'éviscération de volaille s'est penchée sur les caractéristiques de ces déchets et a rapporté les résultats suivants (**Tableau I.3**).

Tableau I.3:Caractéristiques physico-chimiques des déchets de volaille[36]

Paramètres	Valeurs
pH	6.50
Matière organique	43,30 %
Protéines brutes	15,30 %
Azote total	02,20 %
Phosphore total	10,00 %
Potassium total	56,40 %

I.7.4 Analyse des expériences techniques étrangères en matière de gestion des déchets et leur valorisation

Les industries avicoles valorisent majoritairement leurs sous-produits en agriculture. La composition des sous-produits de l'industrie avicole leur confère très souvent une valeur de fertilisants organiques (épandage direct ou après compostage) et surtout une valeur nutritive pour l'alimentation animale sous réserve d'un complément adapté. Les sous-produits de l'industrie avicole peuvent [37]:

- Devenir la matière première d'un autre processeur industriel (industrie manufacturière, graisses et protéines en cosmétique et pharmacie...);
- Être valorisés à l'état brut sur les sols agricoles (lisiers et fumiers, boues, eaux de lavage...), cette valorisation par épandage doit respecter les dispositions réglementaires en vigueur;
- Être valorisés sur sols agricoles après compostage,
- Entrer dans l'alimentation animale (animaux de compagnie).

I.7.5 Quelle gestion durable des déchets d'abattoirs avicoles ?

L'établissement d'un plan de gestion est un facteur important. Il consiste à respecter les principes du développement durable et à suivre une succession de phases, à savoir :

I.7.5.1 Le tri à la source

Il consiste à séparer les déchets d'abattage par catégories lors du processus de production via une récupération distincte afin de rendre leur valorisation (lorsqu'elle est possible) plus facile d'une part, et minimiser l'élimination (déchets ultimes) d'autre part .

I.7.5.2 La collecte

Il s'agit d'une étape très importante dans la gestion de ces déchets. Elle consiste à les récupérer et les transférer vers un système de transport approprié ou un espace réservé à cet effet. Le but étant de les stocker temporairement pour un éventuel traitement choisi.

I.7.5.3 Le traitement

Le traitement des déchets d'abattoir est un domaine assez vaste, dans lequel ils deviennent soit un coproduit ou un sous-produit via un système de valorisation qui permet donc de le réintroduire sur le marché.

L'objectif ultime de cette gestion est de réduire les contaminations, l'atteinte à l'environnement, tout en maintenant la salubrité du poulet. [32]

I.7.6 Traitement des déchets d'abattoirs avicoles

Dans le passé, les déchets de volaille étaient déversés directement sur les sites des ordures. Le traitement des déchets comprend soit leur récupération lorsque cela est possible, soit leur élimination. Par conséquent, le détournement de ces déchets de ces sites est justifié pour une raison : De réduire les zones de stockage et réduire les sources de pollution des sites d'enfouissement, Protéger la population et la biodiversité.

I.7.7 Déchets générés par les abattoirs de volailles

La transformation d'un animal vivant en carcasse destinée à l'alimentation humaine génère à la fois des produits nobles (viande) et des déchets dits d'abattoir. Ces derniers peuvent être répartis en trois catégories :

- Déchets solides
- Rejets liquides
- Boues [32]

I.7.8 Valorisation des déchets avicole

On entend par valorisation toute transformation de résidus ou de sous-produits industriels alimentaires en vue de les réintroduire sur le marché à titre de nouveaux ingrédients ou comme nouveaux produits [32]

I.7.8.1 Valorisation des plumes de volaille :

Les plumes d'oiseaux terrestres (volailles) représentent entre 4,5 et 6,2% en poids sec du poids vif de l'animal. Les quantités de plumes annuelles provenant de l'abattage d'oiseaux terrestre représentent plus de 250 000 tonnes de plumes humides soit l'équivalent de 75 000 tonnes par an de plumes sèches (soit l'équivalent d'environ 75 000 tonnes de plumes sèches hors résidus). Ces plumes étaient autrefois valorisées en farines destinées à la consommation animale. La forte teneur en protéines de la plume conférait à la farine de plumes une valeur marchande proche de celle de la farine de soja.[9]

Il existe trois types de valorisation.

Tableau I.4: Débouchés de la valorisation des plumes de volaille [12].

Filière/valorisation	Valorisation Organique	Valorisation Énergétique	Recyclage matière
Déchets d'abattage d'oiseaux terrestres (Plumes)	Compostage	Transformation en farine puis stockage ou incinération à terme	Kératine, acides aminés

I.7.8.2 Valorisation du sang de volaille :

Le sang en poudre ne contient que peu de matières minérales, mais il est très riche en protéines dont la composition en acides aminés est plutôt déséquilibrée. On ne l'utilise en général qu'à doses inférieures à 5% dans l'alimentation des porcins et de la volaille. Il est rare qu'il en faille davantage et il peut d'ailleurs provoquer des diarrhées. On peut l'employer à doses plus élevées pour les bovins et le substituer au lait pour les veaux. Dans ce cas, il ne devra pas représenter plus de 50% des protéines, cela en raison de sa faible appétibilité. Le sang frais mélangé à raison de 2 :1 à des déchets d'abattoir hachés, est utilisé avec succès pour l'alimentation de la volaille. On en a donné jusqu'à 0,7 kg/jour, tel quel ou traité à l'acide, à des porcs auxquels il a fallu quelques jours pour s'habituer à cette nourriture. La digestibilité du sang est très élevée. Celle des protéines brutes pour les porcs est de 88% pour la farine de sang, 72% pour le sang en poudre, 90% pour le sang frais et 95% pour le sang traité à l'acide. Pour les bovins, ces chiffres sont quelque peu plus élevés[9].

I.7.8.3 Valorisation des viscères de volaille

Les déchets viscéraux peuvent également trouver une utilisation dans les engrais agricoles par épandage. Cependant, des craintes de dissémination de maladies ont été soulevées. De ce fait, un procédé biologique permettant la transformation de ces déchets en un produit stable a été mis au point en se basant sur l'utilisation de bactéries lactiques et de levures acidifiantes possédant un fort pouvoir fermentatif. En effet, lors de la phase fermentaire, les températures augmentent fortement permettant de résoudre ce problème en stabilisant le produit. La stabilisation a été obtenue après dix jours de fermentation[32].

Le pH atteint alors 3,9 avec une acidité de 1,4 %, l'azote total est de 2,2 %, le potassium de 56,5 %, le phosphate de 10 %[9].

I.8 Conclusion

Nous concluons du premier chapitre la valorisation des déchets agroalimentaires est généralement considérée comme une solution préférable à l'élimination des déchets, en raison de sa composition chimique et de sa forte teneur en matière organique. Ainsi, une grande partie de ces déchets peut être réutilisée dans le cadre de divers procédés de traitement tels que la digestion anaérobie, le compostage, etc.

Chapitre II :

Production d'énergie verte par digestion anaérobie

II.1 Introduction :

Le terme “Énergie renouvelable” désigne une énergie qui provient de ressources naturellement réapprovisionnées sur une échelle de temps humaine. Les avantages des énergies renouvelables sont nombreux. Premièrement, ils augmentent l'indépendance et l'approvisionnement énergétique en fournissant des moyens de production locaux, et d'autre part, ils ont un impact positif sur la planète parce qu'ils remplacent les combustibles fossiles, et donc, limitent les émissions de gaz à effet de serre [38].

Lorsqu'il est question d'énergies renouvelables, on évoque le plus souvent les éoliennes, les capteurs solaires ou encore l'énergie hydraulique. Cependant, il existe d'autres solutions comme par exemple la production d'énergie à partir de la biomasse : le bois, les biocarburants ou encore le biogaz. La population des pays en développement est en pleine expansion, entraînant une augmentation des besoins alimentaires et de la production des déchets et effluents. Le recyclage de déchets participe à la lutte contre la pauvreté et à l'assainissement environnemental[1, 39]

La biomasse, qui constitue potentiellement la plus abondante et la plus polyvalente des sources primaires d'énergie renouvelable, assure actuellement plus de 10 % des besoins en énergie de la planète et 4 % de ceux de l'Union Européenne. Selon certains scénarii, à l'horizon 2030-2050, elle pourrait assurer de 15 à 35 % des besoins énergétiques mondiaux.

Au sein de la biomasse, les déchets représentent une part relativement importante mais encore peu exploitée : déchets de l'agriculture, part fermentescible des déchets industriels et des ordures ménagères... Dans le cadre de ces travaux, le biogaz, une forme d'énergie renouvelable séculaire, va être étudié[40].

La gestion des déchets, ou revalorisation est un ensemble de procédés par lesquels on transforme un déchet matériel ou organique dans l'objectif d'un usage spécifique comme le recyclage, le compostage ou encore la transformation en énergie : dans ce deuxième cas, on parle de valorisation énergétique. La valorisation des déchets est généralement considérée comme une solution préférable à l'élimination des déchets[41].

Historiquement la production du biogaz en Algérie remonte à l'ère coloniale. En effet, les colons industriels ont utilisé le biogaz issu de la fermentation des déchets de bovins, conçu dans les années 50 par l'Institut National Agronomique (INA) afin de faire fonctionner leurs

Chapitre II : *Production d'énergie verte par digestion anaérobie*

véhicules agricoles. Actuellement et selon le Ministère de l'Aménagement de Territoire et d'Environnement (MATE) l'Algérie compte installer plus de 50 centres d'enfouissement technique (CET) à travers l'Algérie d'ici à 2025. Ceci va permettre le développement du service public de gestion des déchets ménagers dotés par des technologies de la valorisation des déchets et plus particulièrement la récupération de la fraction biodégradable pour la production du biogaz. En ce qui concerne la production actuelle du biogaz en Algérie aucune estimation n'a été faite à titre principal. Néanmoins, certains ont été faits à titre d'expérimentation par le Centre de Développement des Énergies renouvelables (CDER) afin de mettre en évidence la faisabilité technique de ces projets en Algérie[42].

Ce chapitre est consacré à étudiée la digestion anaérobie, leur déférentes étapes, les paramètres physico-chimiques de la méthanisation, et les différents types de bioréacteurs ainsi les différentes méthodes de valorisation du biogaz pour la production d'énergie verte.

II.2 La Biomasse :

II.2.1 Définition :

La biomasse représente la matière vivante organique. Cette biomasse peut être, en outre utilisée à des fins énergétiques et elle est l'une des composantes essentielles des énergies renouvelables. Les gisements de biomasse énergie sont liés à l'exploitation forestière, à l'exploitation agricole des terres ainsi qu'à la fraction organique fermentescible des déchets ménagers, urbains, industriels et les déjections animales. La biomasse énergie constitue un élément de base de la stratégie de lutte contre le changement climatique [43].

L'utilisation de biomasse en méthanisation permet de générer des coproduits de réaction correspondant à une matrice organique résiduelle. Digestats qui peuvent être utilisés en agriculture comme engrais et/ou amendements organiques. Si de nombreux verrous ont été levés ces dernières années sur la faisabilité technique autour de la mise en place d'unités de méthanisation, de nombreuses questions sont actuellement adressées à la profession agricole concernant la valorisation agronomique des digestats en tant qu'engrais et/ou amendements organiques.[44]

La bioénergie est encore amenée à se développer fortement, sur la base de ressources issues d'une gestion durable, en veillant soigneusement à contenir les impacts en termes de qualité de l'air et dans le cadre d'une bonne articulation avec les usages autre que énergétiques[45].

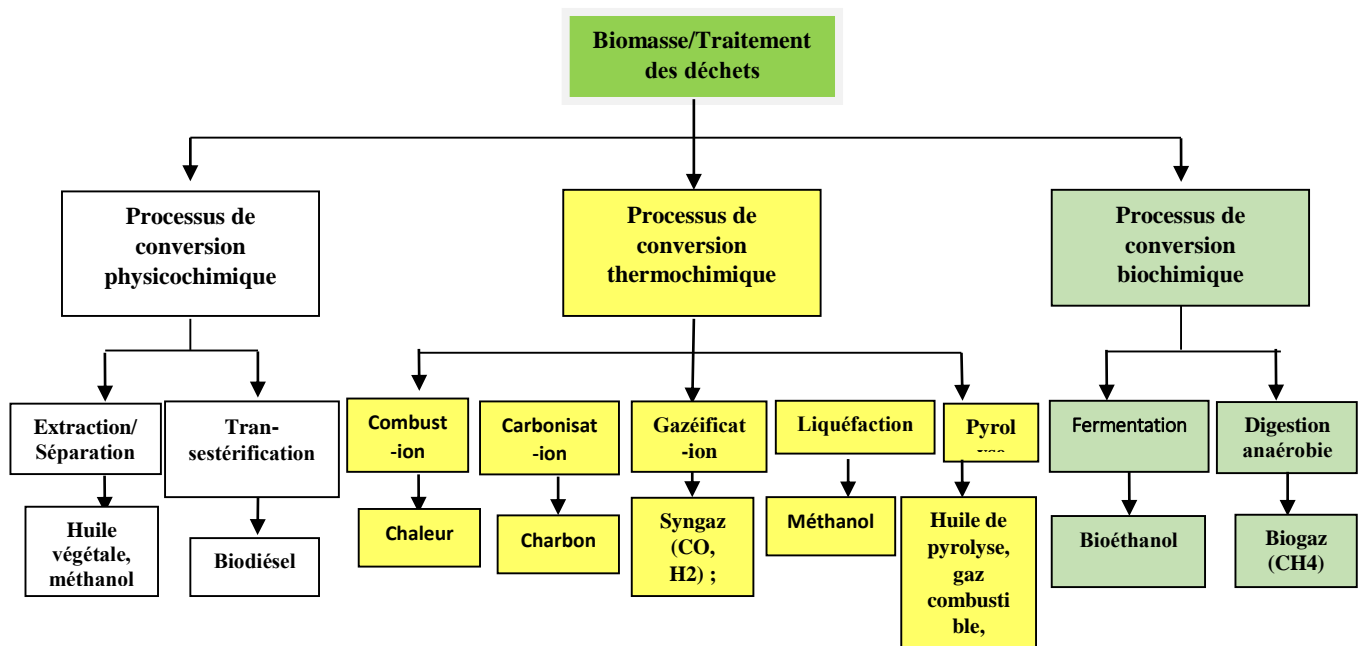


Figure II.1 : Technologies de conversion de la biomasse et des déchets [2]

II.2.2 Ressources de la biomasse :

Les ressources de la biomasse sont variées selon le rôle d'utilisation. La première ressource utilisée est le bois et ses déchets (64 %) les déchets sont la deuxième source de bioénergie, ces déchets regroupent les déchets urbains et industriels, déchets d'agriculture, ainsi que les déjections animales. D'autre part, l'utilisation de ces déchets contribue à réduire la pollution de l'environnement et l'exploitation des ressources renouvelables[15, 46]

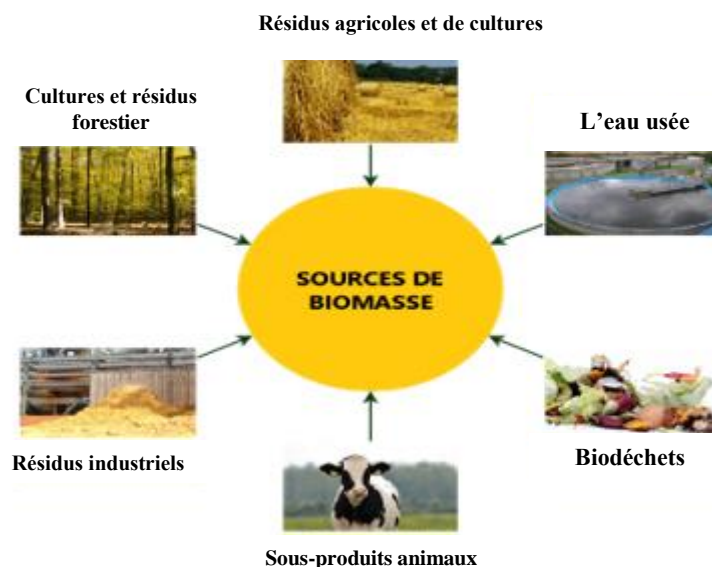


Figure II.2 : Différent ressource de la biomasse [47].

II.2.3 Les Avantages et les inconvénients de la biomasse : [48]

II.2.3.1 Les avantages :

- a) Coûts d'investissement de la biomasse forestière relativement faibles et stables.
- b) Source d'énergie continue, contrairement à l'éolien ou au solaire photovoltaïque
- c) Densité énergétique moindre que celle des combustibles fossiles.
- d) Exploitation à grande échelle coûteuse, en raison de la dispersion de la ressource sur le territoire

II.2.3.2 Les inconvénients :

- a) Perte de biodiversité et appauvrissement des sols, si une quantité insuffisante de résidus de coupe sont laissés sur place
- b) Émission de contaminants atmosphériques lors de la combustion et du transport de la biomasse (augmentation du transport routier pour les résidus de coupe).
- c) Impacts liés à l'entreposage de la biomasse : lixiviation de contaminants, nuisances visuelle et olfactive.

II.2.4 Valorisation de la biomasse :

Aujourd'hui 90 % des déchets incinérés font l'objet d'une valorisation énergétique, parmi lesquels on retrouve environ 50% de biomasse. Au cours de leur combustion, les déchets libèrent de l'énergie qui peut être utilisée sous forme de chaleur ou transformée en électricité.

L'incinération des déchets présente des inconvénients vis-à-vis de l'environnement :

- ❖ La pollution atmosphérique (poussières, gaz acides, dioxine, métaux lourds ...), effet de serre.
- ❖ Le résidu d'épuration des fumées (environ 5% du poids des déchets), appelé REFIOM, contient 80 % des dioxines émises par l'incinérateur avec une forte concentration en métaux lourds, il est mis en décharge de classe 1.
- ❖ Les mâchefers (environ 30% du poids des déchets) utilisés pour les travaux routiers ou admis en décharge selon leur toxicité et l'arrêté d'autorisation d'exploiter de l'installation, contiennent une forte concentration en métaux lourds[49].

II.2.4.1 Valorisation par méthanisation :

Les déchets sont d'abord transformés en un biogaz, par fermentation grâce à des micro-organismes (bactéries). Le biogaz est ensuite brûlé. Ce biogaz est proche du gaz naturel et majoritairement composé de méthane. Cela concerne les déchets ménagers, le fumier et lisier d'animaux, les boues de stations d'épuration, les papiers et cartons...

II.2.4.2 Valorisation par combustion :

Les déchets sont directement brûlés en produisant de la chaleur, de l'électricité ou les deux (cogénération). Cela concerne le bois, les déchets des industries de transformation du bois et les déchets végétaux agricoles.

II.2.4.3 Compostage :

Le compostage est un procédé de valorisation matière des déchets. Il permet d'obtenir un amendement riche en humus après une phase de fermentation aérobie suivi d'une phase de maturation qui assure la stabilisation du produit. Cette filière concerne tous types de déchets organiques tels que les déchets verts, les biodéchets ménagers, les boues d'épuration collectives ou industrielles, les déchets agroalimentaires, les effluents d'élevage. Le compost produit est ensuite utilisé pour l'agriculture pour enrichir les terres de culture[48].

II.2.4.4 La biomasse comme matière première de la chimie :

Elle est utilisée pour produire des tensioactifs, solvants, fluxant de bitumes, encres, peintures, résines, liants, lubrifiants, produits antigel... sans oublier les nombreux principes actifs et huiles essentielles utilisés en pharmacie et cosmétique.

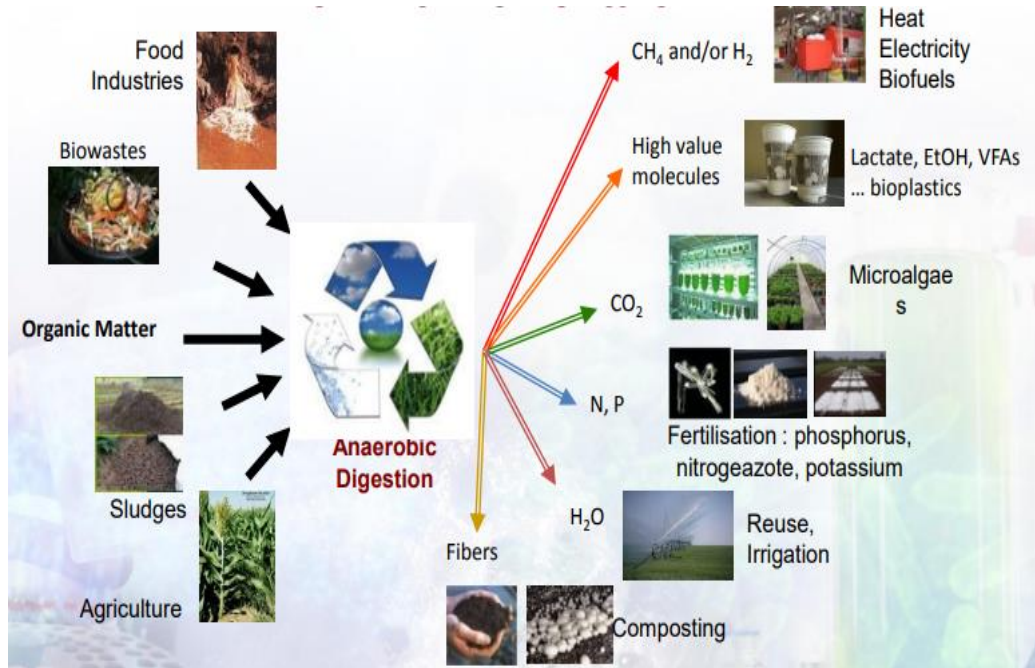


Figure II.3: projet scientifique axé sur ‘bioraffinerie environnementale’ [50].

II.3 La Méthanisation

II.3.1 Définition de la méthanisation

La méthanisation, ou encore appelée « digestion anaérobie », est un processus naturel, Elle est l’une des voies de dégradation des matières organique, qu’elles soient d’origine animale ou végétale. Le principe de la méthanisation repose sur la dégradation de la matière organique par des micro-organismes en absence d’oxygène et de lumière dans des cuves hermétiques (digesteurs) en milieu sec ou liquide. [41, 47, 51]

Pour que la matière organique se transforme en biogaz composé principalement de méthane (CH_4) et de gaz carbonique (CO_2)[52], et un sous-produit solide appelé digestat pouvant être valorisé comme fertilisant[53].

II.3.2 La conversion de la matière organique

La mise en œuvre de la méthanisation dans un réacteur a pour but de convertir cette matière, qu’elle soit sous forme soluble ou particulièrement solide en biogaz. A l’entrée du procédé, cette matière est un des composants d’une matrice, qu’elle soit liquide (effluent) ou solide (déchet). Les autres composants de la matrice sont l’eau et les matières minérales.[51]

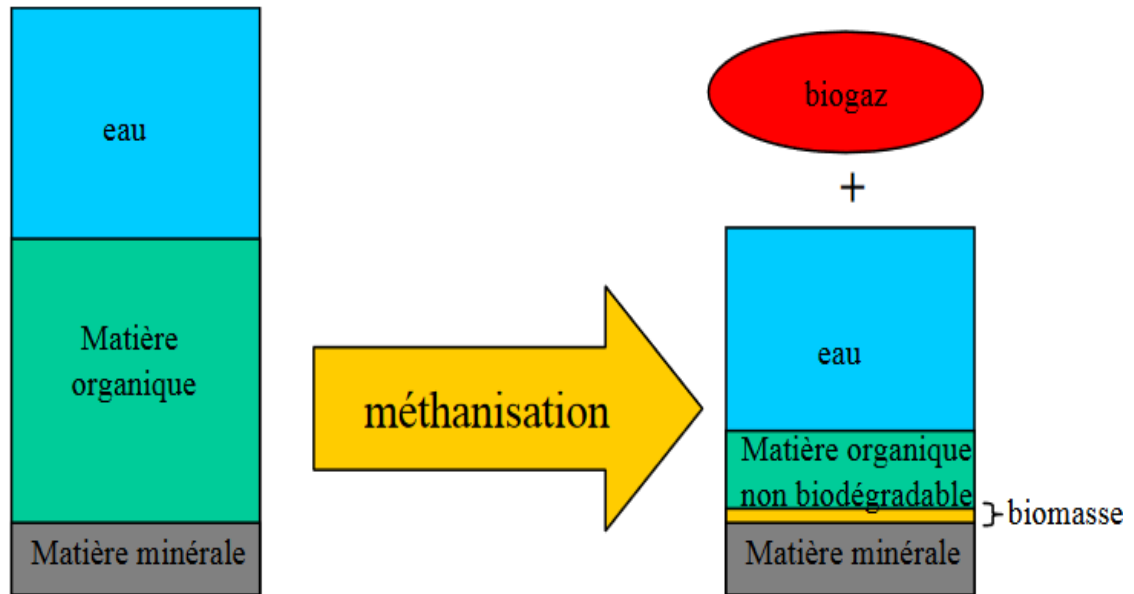


Figure II.4: Schéma global du bilan de la méthanisation[51]

II.3.3 Processus de méthanisation

Le biogaz est produit durant un processus de digestion anaérobie des substrats organique. Ce processus est le résultat d'une activité microbienne complexe, le plus souvent réalisée dans des conditions anaérobies. Chaque étape du processus mène à la formation de composés intermédiaires, servant à leur tour de substrats lors de la phase suivante. Bien qu'il soit complexe, ce processus peut se diviser en quatre étapes indissociables faisant intervenir des populations bactériennes bien spécifiques : [39, 51, 54]

II.3.3.1 L'hydrolyse :

La phase d'hydrolyse est la première étape de la digestion anaérobie. Les réactions d'hydrolyse consistent à transformer les molécules complexes et de haut poids moléculaire composant la matière organique solide (protéines, lipides, polysaccharides) en intermédiaires monomériques solubles. Ainsi, les protéines sont dégradées en acides aminés, les lipides sont hydrolysés en acides gras, et les sucres en monosaccharides, notamment en glucose.

Par exemple, l'hydrolyse des protéines consiste à rompre les liaisons peptidiques entre les acides aminés la composant (organisés en peptides) tout en libérant de l'énergie[41, 55].

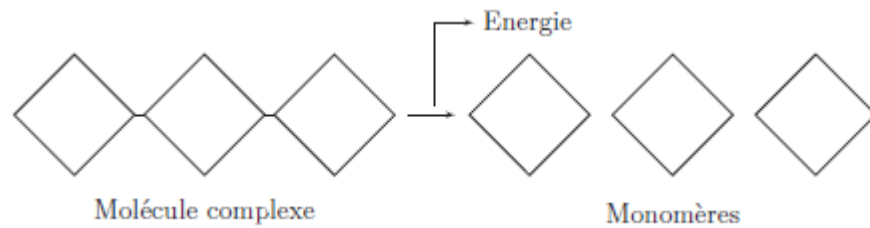


Figure II.5 : Principe de l'hydrolyse[55]

II.3.3.2 L'acidogène

Deuxième étape est l'acidogène, également appelée phase fermentative, transforme les différents monomères issus de l'hydrolyse en acides organiques à courte chaîne (2 à 6 carbones). Les bactéries fermentatives réalisent l'acidogène ou fermentation des substances monomères organiques en hydrogène ou formate, dioxyde de carbone, pyruvate, AGV : les principaux acides produits sont l'acide acétique, l'acide propénoïque et l'acide butyrique, et autres produits organiques (éthanol, cétones ou acides lactique, succinique, etc.) L'acidogène est généralement déterminante pour l'équilibre de l'ensemble du processus de digestion anaérobie, en raison des molécules intermédiaires d'hydrogène et d'AGV produites simultanément lors de cette étape.[47, 51, 56]

En effet, l'accumulation d'hydrogène peut inhiber l'acétogénèse et la méthanisation acétoclaste, conduisant ainsi à une accumulation des AGV. L'accumulation d'AGV conduit à une baisse de pH et inhibe par conséquent l'ensemble du processus de digestion anaérobie[47].

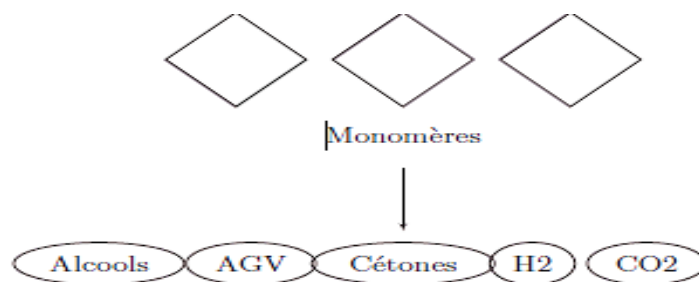


Figure II.6: Principe de l'acidogène[55]

II.3.3.3 L'acétogénèse :

Lors de la troisième étape. L'acétogénèse, qui transforme les produits de l'acidogénèse (sauf l'acétate) en acétate. Elle se déroule suivant deux métabolismes : les acétogènes transforment les acides organiques en acétate, CO_2 et H_2 ; les homoacétogènes combinent l'hydrogène et le CO_2 en acétate [57]

Chapitre II : *Production d'énergie verte par digestion anaérobie*

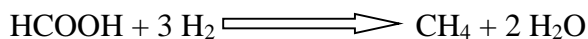
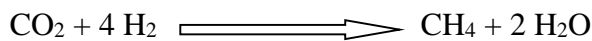
Les bactéries qui réalisent cette étape sont désignées comme les bactéries productrices obligées d'hydrogène (OHPA, Obligate Hydrogen Producing Bacteria) et les bactéries mono ou homoacétogènes). Cependant, l'accumulation d'hydrogène bloque leur développement des OHPA. L'élimination est réalisée soit par les bactéries méthanogènes consommant l'hydrogène, soit par les bactéries sulfato-réductrices (réduction des sulfates en sulfures) [56]

II.3.3.4 La méthanogènes :

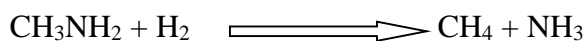
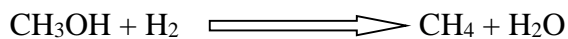
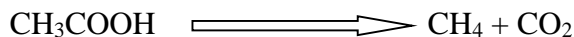
Au cours de la méthanogenèse, dernière étape du processus, les molécules à 1 ou 2 atomes de carbone sont converties en méthane [58]. Elle est considérée comme l'étape limitant dans le processus de dégradation des composés dissous. [59]

La méthanogenèse est mise en œuvre par des bactéries appelées *Archaeobactéries* dans la communauté des bactéries méthanogènes qui peuvent utiliser divers substrats comme l'acétate, le dioxyde de carbone et l'hydrogène, ou encore, pour certaines espèces, le méthanol, les méthylamines ou le formate on peut distinguer:[39, 59]

- Les hydrogénophiles, spécialisées dans la réduction du CO₂ par l'H₂, et productrices de méthane à partir d'acide formique :



- Les acétoclastes, producteurs de méthane à partir d'acide acétique, de méthanol et de méthylamines :



La méthanisation complète donc les réactions précédentes et les favorise : les trois phases décrites sont donc indissociables, formant un tout dynamique appelé fermentation méthanique.[39]

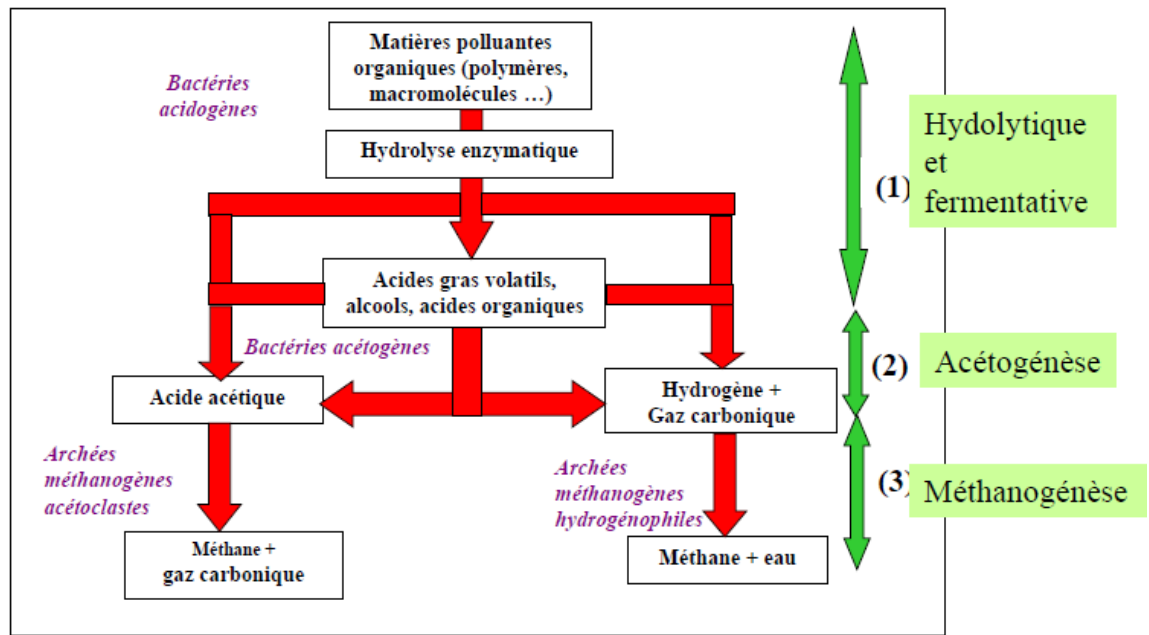


Figure II.7 : Réactions dans le bioréacteur anaérobie [60]

II.3.4 Paramètres physico-chimiques de la méthanisation

Plusieurs paramètres doivent être contrôlés pour le déroulement optimal de la méthanisation, et un suivi continu de ces paramètres est nécessaire pour maintenir la stabilité du processus, des qualités et quantités de biogaz et de digestat produits [41, 47, 56]

II.3.4.1 Le substrat :

Le type et la composition du substrat influencent directement sur le rendement et la composition de biogaz. Un produit organique ne pourra donc fournir plus que sa composition ne le permette. La biodégradabilité diffère d'un substrat à un autre, et influence directement le potentiel de production de gaz [51]

II.3.4.2 Température de digestion :

La température est un facteur primordial dans la digestion anaérobie en raison de son impact sur la cinétique, la thermodynamique des réactions et la croissance des microorganismes. En effet, plus elle augmente, plus les réactions chimiques s'accroissent et plus la croissance microbienne augmente. [58]

Chapitre II : *Production d'énergie verte par digestion anaérobie*

La température opérationnelle à l'intérieur du digesteur est l'un des paramètres majeurs du processus de production de biogaz. Elle a un effet sur le niveau d'activité biométhanogène, la durée de la fermentation et sa stabilité., [47]

On distingue trois niveaux de température pour le fonctionnement des méthaniseurs : [56]

- **Psychrophile à basse température 5°C à 25°C** : utilisée normalement dans les méthaniseurs fonctionnant à la température ambiante. Cette technique exige des longs temps de rétention,
- **Mésophile à moyen température 25°C à 38°C** : la plupart des digesteurs anaérobies européens opèrent dans cette gamme de température.
- **Thermophile à haute température au-dessus de 50°C jusqu'à 70°C**: cette technique est moins utilisée en raison des besoins énergétiques importants pour maintenir la température dans le méthaniseur. Toutefois, il peut arriver que ce procédé soit utilisé en complément du procédé mésophile, puisque les matières organiques prioritairement dégradées ne sont pas nécessairement les même dans les deux processus [41, 56]

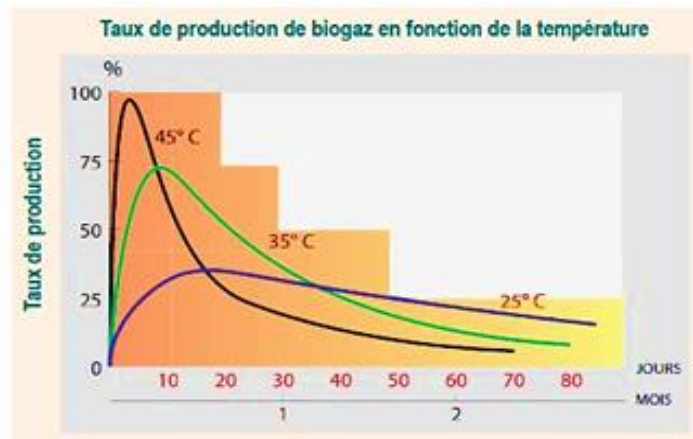


Figure II.8 : Production de biogaz en fonction de la température [51]

II.3.4.3 Potentiel d'hydrogène pH :

La vitesse de production du biogaz décroît très rapidement en dehors d'une zone de pH située entre 6 et 8. Comme pour la température, les groupes de bactéries ont des domaines de pH de croissance optimum Différents. Le pH dans le digesteur se situe entre 7 et 7,5 ce qui correspond aux plages favorables à l'acétogénèse et à la méthanogénèse. La chute du pH en

Chapitre II : *Production d'énergie verte par digestion anaérobie*

dessous de 5,0 est mortelle pour ces organismes et même des valeurs proches de 6,0 causent souvent un arrêt du procédé.

La digestion anaérobie est une séquence de réactions, chacune ayant des sous-produits différents, les uns peuvent influencer négativement les autres. Une surproduction des acides volatils par les organismes acidogènes peut mener à une baisse du pH et, conséquemment, à une inhibition de la méthanogénèse. Cela peut être une situation causée par un grand apport de matières fraîches au digesteur. En revanche, une surconsommation des acides pour la formation de méthane peut engendrer une augmentation du pH et un ralentissement de l'acidogénèse [51]

II.3.4.4 Degré d'humidité :

Comme pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable. L'humidité minimale est de 60 à 70 %. L'humidité des déchets doit être suffisante pour que l'hydrolyse, première étape de la méthanisation, puisse se dérouler normalement. Si au contraire l'humidité est insuffisante, l'acidification se fait trop vite au détriment de la méthanisation, de ce fait le substrat organique doit être très dilué : 85 à 90 % d'eau avec 10 à 15 % de matière sèche [56].

Le taux de dilution est un facteur favorisant ; une augmentation du taux de dilution mène à une augmentation importante du volume du biogaz produit. [47]

II.3.4.5 Alcalinité :

L'alcalinité (TAC, Titre Alcalimétrique complet) mesure le pouvoir tampon dans un digesteur anaérobie et donc sa capacité à maintenir un pH stable. Ce paramètre, lié principalement à la présence de CO_2 dissous nécessaire pour la croissance des bactéries autotrophes, doit être maintenu au-dessus de $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{CaCO}_3$ pour éviter des chutes drastiques de pH.[58]

II.3.4.6 Homogénéité de substrat (Agitation) :

C'est un paramètre important pour optimiser les conditions de la méthanisation en assurant un bon contact entre les micro-organismes et la biomasse traitée et en évitant les gradients de température dans le digesteur [56].

En effet, des résultats antérieurs ont montré qu'une bonne agitation favorise l'acclimatation de la biomasse et limite également divers problèmes dans les digesteurs comme le moussage,

la flottation et la super-saturation de certains gaz qui peuvent former des précipités (CO_2) ou agir comme inhibiteurs de réactions (H_2S et H_2) [58].

II.3.4.7 Acides gras volatils :

Les acides gras volatils (AGV) sont les intermédiaires les plus importants de la digestion anaérobie. Leur accumulation dans le digesteur traduit un dysfonctionnement de la méthanisation. Caractérisation et optimisation du procédé et des prétraitements méthanisation qui s'accompagne d'une baisse du pH et d'une augmentation de la concentration en hydrogène pouvant mener à une inhibition de la méthanogène. Pour un bon déroulement d'un procédé de digestion anaérobie, la concentration en acides volatils (AVT, Acidité Volatile Totale), doit être inférieure à $2 \text{ g.L}^{-1}\text{CH}_3\text{COOH}$ afin d'empêcher une inhibition des bactéries méthanogènes. L'un des critères permettant de confirmer la stabilité des bioréacteurs anaérobies est le rapport AVT/TAC qui doit être inférieur à 0,5 [58]

II.3.4.8 L'absence d'oxygène:

L'oxygène est évidemment un inhibant (réaction anaérobie), cependant une petite quantité d'oxygène n'inhibe pas totalement et immédiatement la production de biogaz. En effet, certains groupes de bactéries, appelées anaérobies facultatifs, 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.[41, 47]

II.3.5 Procédés des méthanisations :

La méthanisation est un processus endothermique qui se déroule en dans enceinte fermée (appelée digesteur, fermenteur, ou réacteur) généralement calorifugée afin d'y maintenir une température constante. La plupart du temps c'est la chaleur de cogénération qui permet de chauffer le digesteur) besoin : de 10 à 15 % de l'énergie primaire) Les procédés se distinguent principalement par [61]:

Chapitre II : *Production d'énergie verte par digestion anaérobie*

II.3.5.1 La teneur en matière sèche

a. *Les procédés à voie humide (15 % de matière sèche) :*

On retrouve ces types de procédés pour les effluents dits liquides (boues, lisiers). Ils peuvent être utilisés pour les déchets solides, lesquels nécessitent alors une dilution.

b. *Les procédés à voie sèche (15 % à 40 % de matière sèche) :*

Les procédés en voie sèche ont surtout été développés pour traiter les déchets solides. Ces procédés nécessitent un volume moindre (substrat concentré) mais une bonne maîtrise de la circulation de la matière (pompage et brassage).[56, 59, 62]

Tableau II.1 : différences entre méthanisation par voie sèche et par voie humide [57, 61]

	Voie sèche	Voie humide
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> -Taille réduite du méthaniseur -Charge organique applicable plus importante -Pas de rajout excessif d'eau (MS proche de celle des entrants) -Pas de séparation de phase 	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne homogénéisation du substrat -Optimisation du transfert de matière et de chaleur -Temps de séjour réduit -Facilité d'agitation/pompage -Phénomènes d'inhibition réduits (dilution importante)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> -Substrat hétérogène -Difficultés d'agitation -Nécessité de disposer de pompes plus robustes et plus onéreuses (pompes à béton) pour transporter déchets et digestat 	<ul style="list-style-type: none"> -Taille des digesteurs importante -Flux de matière important (car dilution) -Equipements de recirculation imposants -Production forte de jus et de lixiviats - Coût de déshydratation du digestat

Chapitre II : *Production d'énergie verte par digestion anaérobie*

II.3.5.2 La température de réaction

La température joue un rôle primordial dans le processus de la méthanisation et à partir de la température de digesteur choisie on distingue deux types de digestion :

- a. **La digestion anaérobie mésophile** : une température moyenne de 35°C ; temps de séjour moyen = 3 semaines
- b. **La digestion anaérobie thermophile** : une température moyenne 55 à 60°C ; temps de séjour moyen réduit = 10 à 15 jours. [56, 59, 62]

Le tableau ci-dessous compare la méthanisation mésophile et la méthanisation thermophile

Tableau II.2 : comparaison entre la méthanisation mésophile et thermophile [57]

	Méthanisation mésophile	Méthanisation thermophile
Avantages	<ul style="list-style-type: none">-Faible énergie consommée-Faible production d'ammoniaque-Charge organique supportée plus importante-Grande stabilité des réacteurs	<ul style="list-style-type: none">-Stabilité face à la baisse de pH-Hydrolyse accélérée-Digestion rapide (temps de rétention réduit)-Abattement en matière organique amélioré-Production de biogaz améliorée-Phase de lancement plus aisée
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none">-Hygiénisation limitée-Rendement de dégradation moyen-Digestion assez lente (temps de séjour augmenté)	<ul style="list-style-type: none">-Consommation d'énergie élevée-Accumulation d'acides organiques plus importante-Taux de croissance des bactéries ralenti-Charge organique applicable moins importante

II.3.6 Le digesteur

Le digesteur, cœur où se réalise la méthanisation, et aussi appelé fermenteur ou bioréacteur anaérobie. Il est une simple cuve fermée, étanche et isolé thermiquement, dans la quelle différents micro-organismes dégradent chimiquement et biologiquement les déchets et les effluents organiques et produisent en stade finale du biogaz.[41]

à travers le mode d'alimentation et d'extraction des déchets trois types de procédés de méthanisation peuvent exister[59]

II.3.6.1 Les digesteurs discontinus ou batch :

Lors du mode discontinu, le réacteur hermétiquement fermé est initialement rempli avec de la matière organique à traiter. La réaction se déroule sans échange de matière avec l'extérieur et se poursuit jusqu'à l'épuisement du substrat à dégrader.

À la fin de la digestion, le réacteur est vidangé et un nouveau cycle peut alors débuter. Ce mode est généralement utilisé pour la détermination du potentiel méthanogène des déchets.[58]

II.3.6.2 Les digesteurs continus :

Le fonctionnement en mode continu est le plus courant à l'échelle industrielle[58]. l'alimentation et la vidange du digesteur se font en permanence avec une quantité entrante équivalente à celle sortante. Ce mode de fonctionnement est simple et adapté généralement au traitement des effluents fortement chargés en matières organiques (déchets agricoles, boues urbaines, ...)[56, 58].

Ce procédé réclame des conditions de fonctionnement plus précis que pour les réacteurs discontinus. Il faut une alimentation régulière, un contrôle de pH, de la température et un brassage, si nécessaire [41]

II.3.6.3 les digesteurs semi-continus :

Ce mode de fonctionnement appelé également fed-batch ou mode discontinu séquentiel (SBR, Sequencing Batch Reactor) est un mode hybride entre le continu et le discontinu. le digesteur est progressivement rempli par des charges successives convenablement réparties dans le temps. La vidange est réalisée lorsque le volume utile du digesteur est atteint et que la production de biogaz n'est plus suffisante [56, 58, 59].

II.3.7 Avantages et les inconvénients de la digestion anaérobie :

Selon plusieurs études, la méthanisation de déchets organiques présente de nombreux avantages :

- Une double valorisation de la matière organique et de l'énergie (intérêt spécifique à la méthanisation par rapport aux autres filières) [61]
- La production du biogaz peut être utilisée comme sources d'énergies renouvelables pour générer trois types d'énergie : chaleur, électricité ou biocarburant ;
- Un intérêt agronomique, lié à une concentration importante en azote ammoniacal (NH_4^+) et en phosphates (PO_4^{3-}) due à la lyse de la matière organique[41]
- Une diminution de la quantité de déchets organiques à traiter par d'autres filières
- Une diminution des émissions de gaz à effet de serre par substitution à l'usage d'énergies fossiles
- Un traitement possible des déchets organiques gras ou très humides, non compostables.
- Une faible emprise au sol des unités de traitement et l'existence d'une offre d'installations compactes
- Une limitation des émissions d'odeurs à priori du fait de digesteur hermétique et de bâtiment clos équipés de traitement d'air performant.[59, 61]

La méthanisation présente aussi des inconvénients à ne pas négliger :

- Ce procédé permet de traiter seulement la matière organique biodégradable [59]
- 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 [41]

II.4 Produits de la méthanisation

II.4.1 Le digestat

Le digestat est la matière résiduelle humide et riche en matière organique partiellement stabilisée obtenue après la digestion anaérobie. Ce digestat peut servir comme un amendement agricole à cause de ses qualités fertilisantes vu sa teneur en Azote, Phosphore, Potassium, Calcium...

Une part importante de cet azote est directement disponible et rapidement valorisée par la culture en place[56, 63]

II.4.1.1 Les voies de valorisation de digestat

Sa valorisation est soumise à certaines contraintes relatives à sa composition en nutriments et les caractéristiques des sites qu'il va fertiliser. On distingue 2 voies :

❖ **Voie liquide** : Le digestat brut peut subir une séparation de phase, par presse à vis ou centrifugation afin de produire du digestat solide et du digestat liquide.

- Le digestat liquide issu de la technologie en voie liquide répond plus au profil d'engrais organo-minéral qu'au profil d'engrais organique. Il est donc assimilable plus facilement et plus rapidement par les plantes si on le compare avec l'épandage de fumier ou de lisier (notamment l'azote). La voie de valorisation la plus fréquente est l'épandage

❖ **Voie sèche discontinue** : Le digestat solide produit par cette technologie est considéré comme un amendement de fond. Il peut être épandu à l'aide d'un épandeur à fumier sur un périmètre d'épandage ou bien subir un post traitement tels que le séchage ou le compostage.[59]

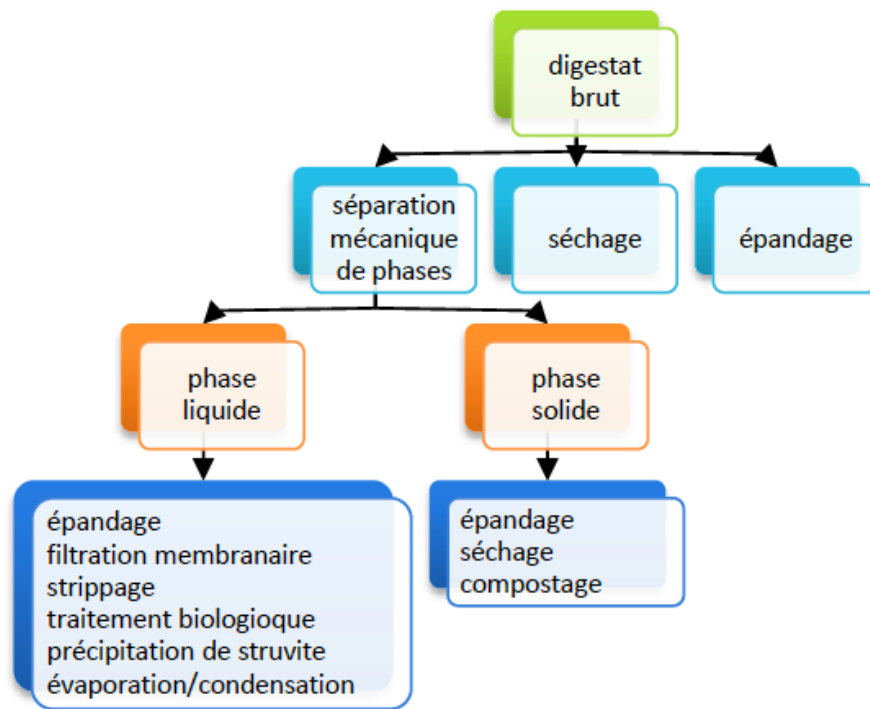


Figure II.9 : schéma présente les différentes voies possibles de traitement du digestat [61]:

II.4.2 Le biogaz

II.4.2.1 Historique :

Alessandro Volta (1745-1827) montra en 1776 que le gaz issu de la décomposition produit dans les marais, était combustible. En 1787, Lavoisier mit en évidence que le gaz décrit par Volta était du « gas hydrogenium carbonatrum ». Le terme de « méthane » fut proposé en 1865 (Wolfe, 1993). Ce n'est que dans la première moitié du XXème siècle que sont mises aux points différentes techniques de fermentations. L'influence des composants de la matière organique, de la faune microbienne, de la température ...etc. sur les fermentations, est étudiée. Dans les années 1950 à 1960, les stations d'épurations ont permis de grandes avancées dans la recherche sur la méthanisation. Dans les années 1970, le premier choc pétrolier augmenta le coût des énergies. Cette crise contribua au développement de la recherche fondamentale et appliquée sur ce sujet.[3]

II.4.2.2 Définition :

Le biogaz est le gaz produit par la fermentation de matières organiques animales ou végétales en absence d'oxygène (conditions anaérobies). Cette fermentation appelée aussi

"méthanisation" ou encore "digestion anaérobie" peut se produire naturellement ou être provoquée.

Le biogaz est un mélange composé principalement de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2) et, en nettement plus faibles proportions, d'azote, d'oxygène et d'eau ; on retrouve également de nombreux composés trace (organiques et inorganiques) tels que le sulfure d'hydrogène (H_2S), les thiols (= mercaptans) et tout un panel de Composés Organiques Volatils (COV) notamment dans les biogaz d'Installations de Stockage de Déchets (ISD).

L'énergie du biogaz provient uniquement du méthane : le biogaz est ainsi la forme renouvelable de l'énergie fossile qu'est le gaz naturel. Ce dernier contient essentiellement du méthane mais aussi du butane, du propane et d'autres éléments [64].

II.4.2.3 Composition du biogaz :

Provenant de la fermentation anaérobie de la matière organique, le gaz de décharge est composé principalement du méthane (~55%) et du gaz carbonique (~40%), et est généralement saturé en vapeur d'eau. Il contient également d'autres gaz issus de la fermentation présents en traces, (H_2S , H_2 , mercaptans, ...) ou les composés qui se trouvent dans des déchets et qui sont aspirés avec le biogaz (hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, composés halogénés, siloxanes, métaux sous forme volatile, ...).[65]

- a. **Méthane (CH_4)** : c'est un gaz inodore et incolore, plus léger que l'air. Il est inflammable entre 5% et 15% de concentration volumique (v/v) dans l'air le mélange gazeux est explosif. PCI volumique du méthane = $35,88 \text{ MJ/m}^3$ et PCI massique = $50,04 \text{ MJ/kg}$.
- b. **Dioxyde de carbone (CO_2)** : c'est un gaz inodore et incolore, plus lourd que l'air. Il n'est ni inflammable ni toxique. En revanche, il diminue la teneur en oxygène ce qui peut provoquer l'asphyxie.
- c. **Hydrogène sulfuré (H_2S)** : c'est un gaz avec une odeur caractéristique dite « d'œuf pourri » (détectable à partir de 0,7 ppm, à partir de 150 ppm il inhibe l'odorat), plus lourd que l'air. Il est inflammable et très toxique. Il provoque nausées, céphalées et vomissements. A haute concentration (>700 ppm) il affecte le système nerveux central et provoque la mort
- d. **Mercaptans (SxHy)** : ce sont des composés organiques soufrés qui sont très malodorants et souvent toxiques.
- e. **Composés organiques volatils (COV : hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, composés halogénés)** : certains COV sont toxiques, en particulier le benzène qui est

Chapitre II : *Production d'énergie verte par digestion anaérobie*

cancérogène. En ce qui concerne l'influence sur l'environnement, les composés halogénés sont les composants traces les plus nocifs. Les composés chlorés provoquent la corrosion accélérée des moteurs.[65]

II.4.2.4 Caractéristiques du biogaz :

Le biogaz est un gaz produit par un processus de digestion anaérobie par l'action de certaines bactéries sur divers résidus organiques. C'est un gaz incolore, inodore et qui est considéré comme une source d'énergie.

Comme nous avons mentionné précédant la qualité du biogaz dépend du substrat. Le biogaz de qualité moyenne est constitué de 38 % de CO₂ et de 62 % de CH₄. D'une manière générale, la composition du biogaz est indiquée dans le **Tableau II.3** [2]:

Tableau II.3 :Composition générale du biogaz [2]

Elément	Symbole	Productions pour 1Nm ³ de biogaz brut
Méthane	CH ₄	50 – 75 %
Dioxyde de carbone	CO ₂	25 – 45 %
Vapeur d'eau	H ₂ O	2 – 7 %
Azote	N ₂	0 – 2 %
Hydrogène	H ₂	0 – 1 %
Oxygène	O ₂	0 – 2 %
Hydrogène sulfure	H ₂ S	0 – 2 %

II.4.2.5 La valorisation du biogaz :

a- La valorisation thermique :

Brûler du biogaz en chaudière est la voie de valorisation la plus ancienne, la mieux maîtrisée et la plus courante ; de nombreuses STEP utilisent la chaleur générée par la combustion de leur biogaz pour maintenir la température des digesteurs. Lorsque l'ISDND ou les digesteurs sont établis à proximité d'un industriel susceptible d'accepter le biogaz, la voie

de la combustion constitue un moyen de valorisation adapté au biogaz, car elle allie simultanément les avantages de la simplicité du procédé, d'un investissement réduit et d'un temps de retour sur investissement souvent très intéressant. La chaleur de combustion du biogaz peut alors servir pour la production d'eau chaude, de vapeur à moyenne ou haute pression, ou bien dans des fours de procédés (fabrication de tuiles, cimenterie, ...).

b- La production de l'électricité :

Pour produire de l'électricité à partir de biogaz plusieurs technologies sont envisageables, allant des technologies simples des moteurs à combustion ou des turbines (systèmes majoritairement utilisés industriellement) aux piles à combustibles (technologies émergentes en développement). La production d'électricité peut être réalisée seule, ou afin d'augmenter les rendements, en cogénération ou tri-génération :

- **Cogénération** : production d'énergie électrique avec récupération de chaleur ordinairement perdue lors d'une production d'énergie mécanique par combustion. Elle permet d'exploiter au mieux le potentiel énergétique du combustible. Le rendement d'une telle installation peut alors atteindre 80 à 90% contre 35 à 40% pour une installation classique ;

- **Tri-génération** : production d'énergie électrique avec récupération de chaleur et production de froid. Ce mode de valorisation est intéressant pour les sites nécessitant de la chaleur, du refroidissement et de l'électricité tels que les hôpitaux, les immeubles, les bureaux, les administrations, les grands magasins, etc. La trigénération à partir de la méthanisation des déchets est appelée à un solide avenir [64].

c- Moteurs à gaz et fioul-gaz :

Le biogaz peut alimenter un moteur ou une turbine à gaz qui entraînent un alternateur pour produire de l'électricité. Les moteurs à gaz sont les plus faciles à modifier pour un fonctionnement au biogaz [66]. Les moteurs fioul-gaz fonctionnent avec un mélange de 90% de biogaz et 10% de fioul. Ils offrent des rendements supérieurs aux moteurs à gaz (40% au lieu de 35%) et l'investissement initial est plus faible. En revanche, les moteurs fioul-gaz nécessitent l'achat et le stockage de fioul. Ces moteurs sont assez bien adaptés aux faibles puissances (quelques kWe) et ils permettent d'utiliser un biogaz ne contenant que 40% de méthane. Plusieurs auteurs ont montré que la performance des moteurs dépendait de la composition du biogaz. Ainsi PORPATHAM et al. (2007) [67] ont conclu, dans le cas d'un moteur à gaz, que

la réduction de la concentration de CO₂ dans le biogaz améliorerait nettement les performances du moteur en termes de puissance et de chaleur produite, et permettrait de réduire le temps d'allumage du carburant. En parallèle les auteurs observent également une baisse des émissions d'hydrocarbures imbrûlés. *HENHAM et MAKKAR (1998)* [68] ont étudié l'influence de la qualité du biogaz sur les performances d'un moteur fioul-gaz ; leurs travaux montrent que pour un rapport diesel/biogaz fixé, les performances du moteur augmentent avec la teneur en méthane. Les résultats de ces différents auteurs mettent en évidence une faible augmentation des oxydes azotés (NO_x) avec la teneur en méthane. L'utilisation du biogaz en remplacement du gaz naturel est bénéfique pour l'environnement puisque les émissions de NO_x seraient réduites.

d- Turbines et cycle combiné :

La technologie des turbines à gaz (TAG) dérive des réacteurs d'avion ; le biogaz est brûlé dans une chambre de combustion alimentée par de l'air sous pression. Les gaz produits sont introduits dans une turbine où ils entraînent le rotor. L'énergie mécanique produite sert à entraîner le compresseur d'air et un générateur électrique. Les turbines à vapeur (TAV) constituent une autre solution. Dans ce cas, le biogaz est brûlé dans une chaudière afin de produire de la vapeur haute pression. La détente de la vapeur dans la turbine assure la production d'énergie mécanique. Les gaz en sortie d'une TAG peuvent être réchauffés pour produire de la vapeur d'eau et alimenter TAV ; on parle alors de cycle combiné. Ces installations permettent d'atteindre des rendements de près de 60%. Les turbines étaient initialement plutôt destinées aux applications industrielles car elles fournissent de fortes puissances (jusqu'à plusieurs MWe). Cependant pour pouvoir valoriser le gaz des centres d'enfouissement techniques (CET), qui sont particulièrement pauvres en méthane, des microturbines ont été développées pour des puissances de quelques kWe, et elles permettent de valoriser un biogaz contenant au minimum 35% de méthane[66].

e- L'utilisation comme carburant pour les véhicules ou dans un réseau de gaz naturel :

Le biogaz est une alternative aux carburants traditionnels ; il permet de réduire les émissions atmosphériques (20 à 30% de réduction des émissions de CO₂, réduction de l'émissions de particules,...). De nombreuses collectivités et entreprises ont investi dans des flottes de véhicules roulant au GNV. L'utilisation de ce carburant est moins répandue chez les

particuliers en raison du faible déploiement des stations de remplissage. Ce mode de valorisation est assez exigeant car les caractéristiques du biogaz doivent être similaires à celles du gaz naturel ; il est donc nécessaire d'augmenter les proportions de méthane jusqu'à 97%. Le biogaz devant être comprimé, il est essentiel de réduire sa teneur en vapeur d'eau pour éviter la formation de glace au moment de la compression. La rentabilité de ce mode de production dépend avant tout de la composition du biogaz brut, et du niveau de purification à lui apporter[66].

II.5 Conclusion

Nous concluons du deuxième chapitre, que la digestion anaérobie est devenue un moyen attrayant pour produire de l'énergie verte et pour le traitement des déchets organiques, dans la perspective d'un avenir vert bioéconomique.

PARTIE II :
Partie Expérimentale

Chapitre III :

Matériels et Méthodes

III.1 Introduction

La gestion des déchets organique issus de l'industrie agroalimentaire est l'une des problématiques environnementales majeures et d'actualité. Ainsi dans la région méditerranéenne, l'industrie oléicole et les abattoirs avicoles produit donc de grandes quantités de déchets (grignons, margines, viscères, plumes et sang...) néfastes pour l'environnement. Bien que leur composition chimique soit très riche en matière organiques, ces déchets sont inexploités et non valorisés en Algérie. De ce fait, leur valorisation est nécessaire.

Alors, notre étude a pour but de valoriser des déchets avicole (viscères, plumes) et des déchets oléicoles (grignon d'olive) par biodégradation anaérobie ou méthanisation. Nous nous intéressons d'une part à la production du biogaz et d'autre part à l'étude des propriétés physicochimiques et des digestats résultants

Ce chapitre présentera les matériels et méthodes expérimentales adoptés au cours de ce travail. Il détaillera ainsi :

- L'origine des déchets organique utilisé,
- Les techniques analytiques classiques (matières sèches, matières volatiles, ...)
- La technique de détermination de la production maximale de méthane en mode batch

Notre travail pratique a été réalisé au niveau du laboratoire de Génie des Procédés de la Faculté des Sciences et Technologie de l'Université de GHARDAIA, durant une période de 27 jours.

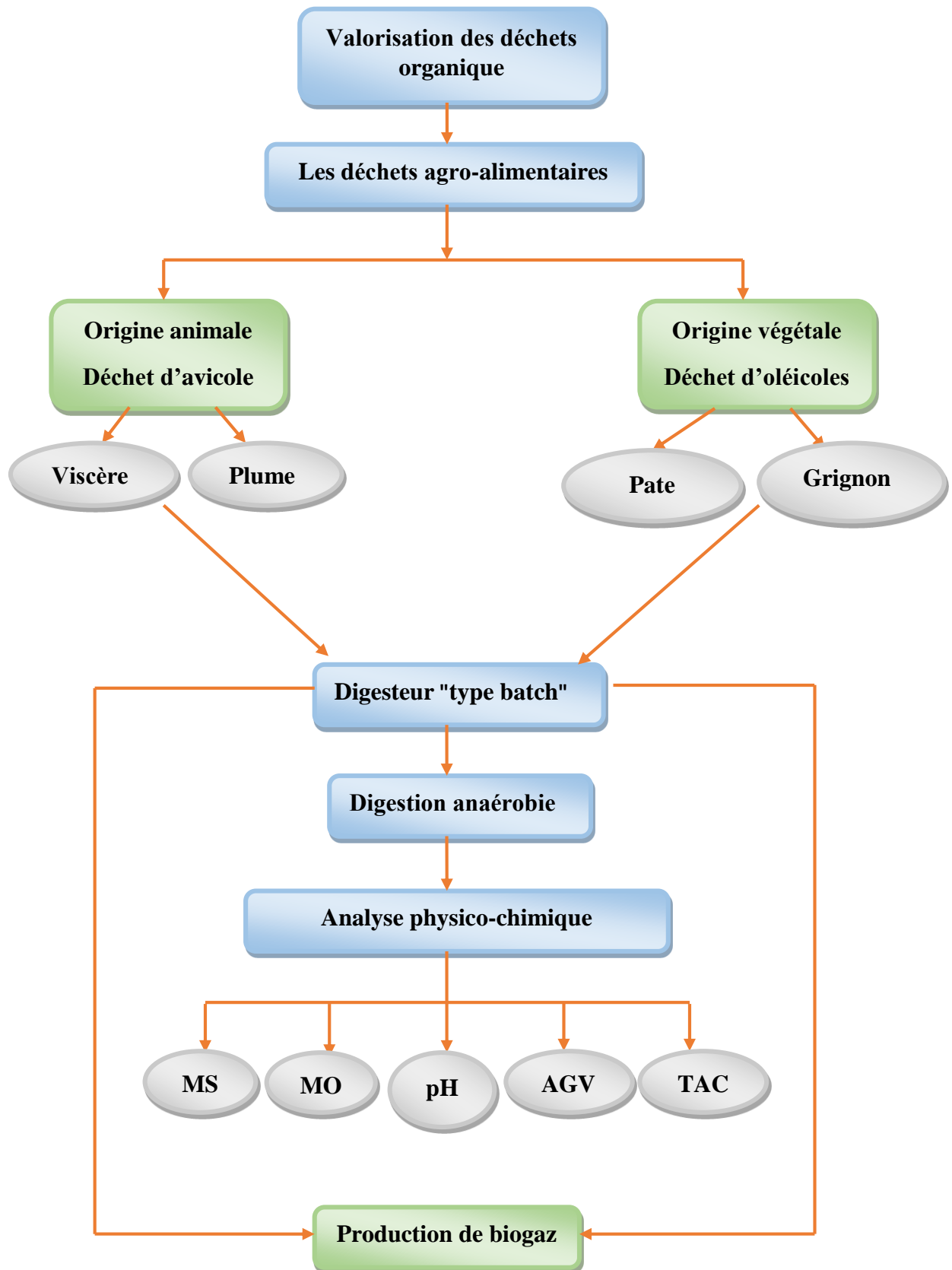


Figure III.1 : Organigramme du travail expérimental

III.2 Les matières organiques utilisées

Dans cette étude expérimentale, deux types de déchet ont été utilisés et sont les suivants : Déchets agricoles d'origine végétale (déchets d'extraction d'huile d'olive) : nous avons prélevé les échantillons d'un pressoir à olive de TIFFIDELLE situé dans ALQURTI de willaya Ghardaïa.



Photo III.1 : les olives avant l'extraction



Photo III. 2 : déchets d'olive utilisé

Les déchets agricoles d'origine animale (déchets Avicole) : nous avons prélevé les échantillons d'un abattoir de poulet situé à NOMRAT de willaya Ghardaïa.



Photo III.3 : viscère de poulet



Photo III.4 : plume de poulet

III.3 Description du prototype de digesteur biomasse

III.3.1 Matériels utilisés :

Le matériel utilisé se présente comme suit :

- Bain-marie remplie d'eau et maintenu à la température de 38 C°
- Quatre tuyaux transparents pour le dégagement de biogaz.
- Quatre bouteilles en verre (digesteur) (deux de volume 1000 ml et deux de volume 500 ml) hermétiquement clos pour créer l'anaérobiose ; équiper d'un système de tuyauterie pour dégager le biogaz.
- Quatre Eprouvette gradué de volume 250ml et de volume 125 ml remplie d'eau pour mesurer le volume du biogaz.
- 4 Support pour garder les éprouvettes en position verticale.
- pH mètre (*AD 130 ph /mV Meter*)
- Balance de précision
- Centrifugeuse (*ROTOFIX 32 A*)
- Plaque chauffante
- Etuve
- Four à moufle

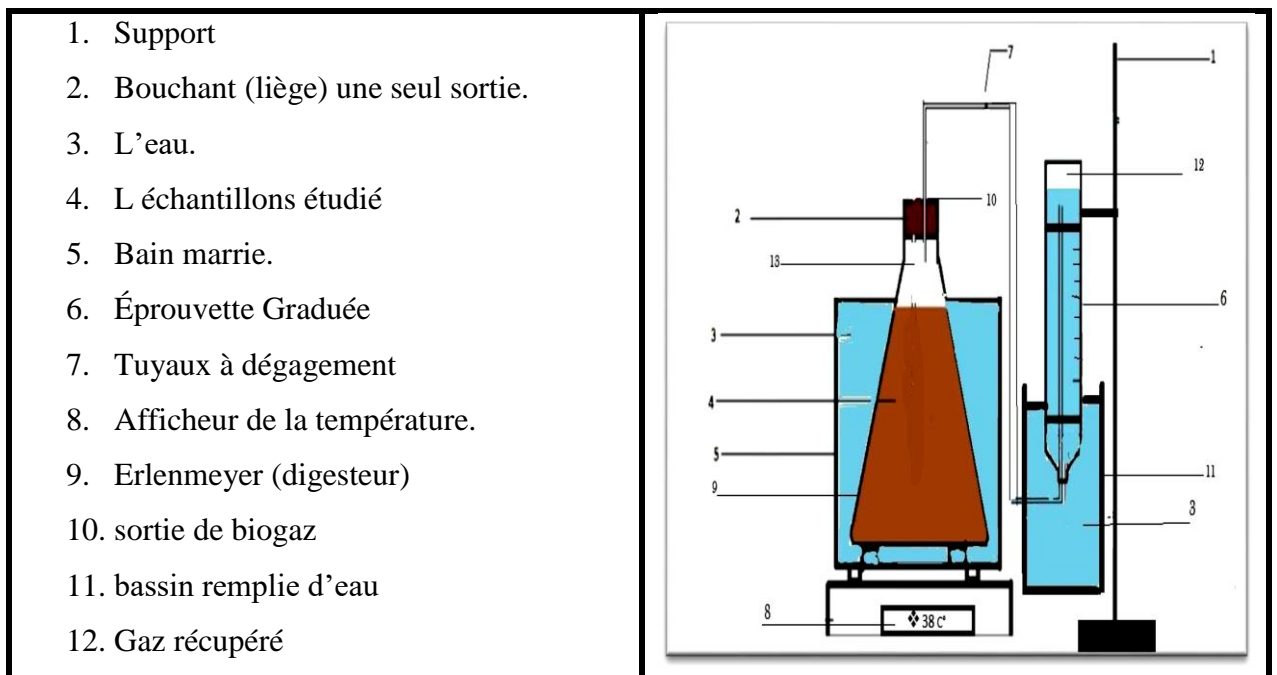


Figure III.2:schéma d'un seul digesteur[69]

III.3.2 Produits chimiques

Tableau III.1 : produits chimiques utilisés

N°	Produits chimiques	Formule chimiques
1	Acide sulfurique	H ₂ SO ₄
2	Hydroxyde de sodium	NaOH

III.3.3 Plan d'expérience :

1) **Digesteur utilisé** : Les essais ont été réalisés dans un réacteur de type batch (type discontinu). C'est un modèle de laboratoire en verre très simple qui permet au milieu de culture d'être anaérobie. Ce réacteur batch se compose d'une bouteille en verre, scellée pour s'assurer l'étanchéité. Le bouchon a une ouverture pour la récupération et la mesure du volume de biogaz produit (photo III.5)



Photo III.5 : Digesteur type batch

2) **Préparation des échantillons** : Nous avons utilisé quatre bouteilles en verre d'une capacité de 1 litre et 0.5 litre.

Digesteur A : 70 g (plume + viscère) + 35 g de fumier de bovin + 600 ml d'eau de robinet

Digesteur B : 35 g (plume + viscère) + 200 d'eau de robinet

Digesteur C : 70 g déchets d'olive + 35 g de fumier de bovin + 600 ml d'eau de robinet

Digesteur D : 35 g de fumier de bovin + 200 ml d'eau de robinet (l'inoculum)

N.B : Le digesteur D est considéré comme un blanc et il est consacré à mesurer la valeur nette de production de méthane par la fermentation des déchets d'olive et de volaille ; cette valeur

est obtenue en soustrayant la production de bouteille contenant l'inoculum seul ; de la production totale

- Les bouteilles A et C d'une capacité de 1 litre et digesteur B et D d'un volume 0.5 L
 - Le but d'addition du fumier de bovin c'est l'enrichissement du milieu par des bactéries méthanogène ;
- 3) Les déchets utilisés sont introduits dans les digesteurs A, B, C et D
 - 4) Le pH des échantillons a été mesuré à l'aide d'un pH mètre à une température ambiante
 - 5) Les digesteurs fortement fermés à l'aide de silicone à fin d'assurer et d'éviter toutes échanges gazeux entre le milieu interne et le milieu externe, car notre expérience nécessitait un environnement pauvre en oxygène. Ensuite sont maintenu après une agitation manuelle afin d'assurer un mélange suffisant dans un bain marie thermostat chauffé et réglé à 38 ° C
 - 6) On s'est servis d'un bassin rempli d'eau pour maintenir la pression d'eau dans les éprouvettes qui serviront à la collecte du biogaz.
 - 7) L'étape suivante est de remplir les éprouvettes jusqu'au bout et vite les inverser dans le bassin afin d'éviter au maximum la formation des bulles d'air dedans pour ne pas fausser les résultats obtenus.
 - 8) Chaque tuyau a été raccordé à une éprouvette.
 - 9) Dès que des bulles de gaz sont formées, elles tentent de s'échapper par le tuyau, puis elles arrivent dans l'éprouvette verticale, remontent le long de la colonne d'eau que l'éprouvette contient, et poussent vers le bas cette eau qui rejoint l'eau contenue dans le bassin ouvert. Cette étape permet la mesure du volume de CH₄ alors libéré, par déplacement de l'eau à l'intérieur des éprouvettes graduées



Photo III.6 : Les quater digesteurs préparés

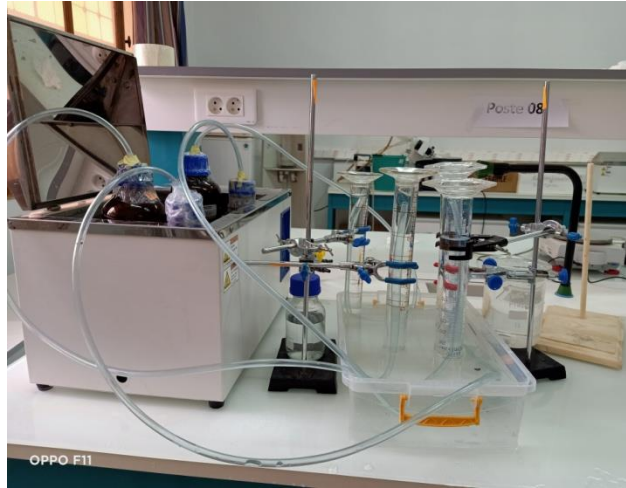


Photo III.7 : dispositif expérimental de la méthanisation

III.4 Conditions de digestion

- Les réacteurs sont maintenus à une température de 38°C (en condition mésophile) dans un bain marie chauffé et régulé par un thermostat
- Chaque digesteur est agité manuellement deux fois par jour, pendant une minute, afin d'assurer un mélange suffisant.
- Le procédé de digestion a été a voie sèche (% matière sèche entre 15% et 40%).



Photo III.8 : un bain marie chauffé est régulé à 38°C

III.5 Méthodes d'analyses physico chimique

III.5.1 Détermination de taux la matière sèche (MS)

a) Matériels utilisés :

- Balance
- Des creusets résistant à 105 °C
- Dessiccateur
- Etuve réglée à 105°C

b) Principe

La matière sèche est déterminée par dessiccation dans une étuve maintenue à 105 °C jusqu'à ce que le poids de l'échantillon à analyser devienne constant, selon la norme NF ISO 11465. [47]

Le pourcentage d'humidité des différents déchets organiques est déterminé par différence de poids de l'échantillon avant et après séchage jusqu'à la stabilisation de la masse[70]



Photo III.9 : L'étuve utiliser et réglée à 105 c°(Mammert)

c) Mode opératoires

- 1) Une prise d'échantillon de masse quelconque
- 2) La masse est déposée dans un creuset préalablement nettoyé, séché et taré (*M*).
- 3) Ensuite l'ensemble est placé dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures jusqu'à l'obtention d'un poids constant.
- 4) Après le séchage le creuset est refroidi dans un dessiccateur et pesée



Photo III.10 : Echantillons avant séchage



Photo III.11: Echantillons après séchage



Photo III.12 : Photo de dessiccateur utilisé pour le refroidissement et la protection contre l'humidité.

Le pourcentage de la matière sèche est donné par la formule suivante :

$$MS (\%) = \frac{\text{Poids de l'échantillon séché à } 105^{\circ}C}{\text{Poids de l'échantillon humide (avant le séchage)}} \times 100$$

Delà on déduit le taux d'humidité par :

$$\text{Humidité}\% = 100 - (MS\%).$$

III.5.2 Détermination de la teneur en matière organique (MO)

a) Matériels utilisés :

- Four à moufle.
- Des creusets résistant à 550 °C
- Balance.
- Dessiccateur

b) Principe

Lorsque l'échantillon, préalablement séché, est soumis à une incinération à 550°C, la matière organique se consomme et la matière résiduelle constitue les matières minérales[51]



Photo III.13 : Four à moufle utilisé (PROTHERM)

c) Mode opératoires

- 1) Peser les creusets remplis en matière sèche, soit (M1),
- 2) Placer les creusets dans le four à moufle pour une calcination à 550 °C pendant 5 heures.
- 3) Après le refroidissement, les creusets contenant la matière minérale sont pesés encore une fois.



Photo III.14 : Echantillons après calcination

La masse de la matière organique est obtenue par différence entre la masse de matière sèche et la masse de matière minérale

$$\% \text{ MO} = \frac{(M1 - M2)}{M1} \times 100$$

Avec :

MO% : la teneur en matière Organique (MO).

M1 : masse initiale de substrat après séchage.

M2 : masse finale de substrat après calcination

- Le taux de dégradation de MO et MS est calculé en appliquant la formule suivante :

$$P(\%) = \frac{(P_i - P_f)}{P_i} \times 100$$

P_i et **P_f** correspondant aux teneurs initiales et finales des paramètres étudiés

III.5.3 Paramètre suivis

Le contrôle des digesteurs est nécessaire pour assurer la réussite de l'opération. A cause de la complexité du processus de la digestion anaérobie due à la sensibilité des groupes microorganismes à plusieurs facteurs, il est important de pouvoir détecter le déséquilibre de processus au début et donc l'action peut être prise à temps pour empêcher l'échec du processus. Pour cela pendant la durée de la digestion, nous avons suivi deux types de paramètres, qui sont les suivants [71]:

1. Paramètres du fonctionnement

- Le pH
- Le volume du biogaz

2. Paramètres d'épuration

- Les acides gras volatils (AGV) ;
- Le titre alcalimétrique complet (TAC)

III.5.3.1 Paramètres du fonctionnement

III.5.3.1.1 *Mesure de Potentiel d'hydrogène (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.[69]

a) Mode opératoires

- Rincer abondamment l'extrémité de l'électrode avec de l'eau distillée Après avoir étalonné le pH-mètre.
- Immerger l'électrode avec précaution dans l'échantillon.
- Appuyer sur le bouton mesure et attendre quelques minutes, puis lire directement la valeur de pH lorsqu'elle s'est stabilisée.
- Retirer l'électrode, la rincer avec de l'eau distillée et l'essuyer.



Photo III.15 : Dispositif de mesure de pH (AD 130 ph /mV Meter)

III.5.3.1.2 *Volume de biogaz produit*

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

a) Matériel :

- Éprouvette graduée
- Bassin remplie d'eau

b) Méthode :

Les productions gazeuses sont suivies avec des fréquences journalières. Le mesure de volume de biogaz est basé sur le déplacement d'eau, de digesteur sort le biogaz passant par l'éprouvette graduée plongé dans le bassin remplis en eau, ce qui va déplacer le niveau du liquide contenu dans l'éprouvette et indique le volume du gaz produit.



Photo III.16 : mesure de volume de biogaz produit

III.5.3.2 Paramètres d'épuration

III.5.3.2.1 La détermination des AGV

Le contrôle des acides gras volatils, stade intermédiaire obligatoire de la digestion anaérobie, est indispensable. Leur accumulation traduit un ralentissement de l'activité des bactéries méthanogènes et peut provoquer le blocage du processus fermentaire. [51]

a) Matériels utilisés

- pH mètre
- Centrifugeuse
- Plaque chauffante
- Burette
- Pipette et pro pipette
- Bécher.

b) Méthode :

✓ Mesurer un volume de l'échantillon. Centrifuger ces échantillons à 5000 t/min, pendant 10 min. recueillir le liquide surnageant dans un bécher.

Le liquide récupéré dans le bécher est mis en agitation manuelle, on plonge les électrodes d'un pH-mètre dans le liquide et on note le pH initial, ensuite on ajoute l'acide sulfurique (H_2SO_4 0.1N) à l'aide d'une burette jusqu'à on obtient la valeur de **pH = 4.00** et on note le volume **V1**.

✓ On verse ensuite l' H_2SO_4 jusqu'à **pH=3.50**, après on fait bouillir le liquide pendant 3 minutes, de manière à dégazer le dioxyde de carbone. La solution est ensuite refroidie à la température ambiante. Après le refroidissement et à l'aide d'une burette, on ajoute de la soude (NaOH) 0,1 N jusqu'à atteindre une valeur de **pH = 4** et on, soit **V2** le volume obtenu. On continue à ajouter la soude jusqu'à atteindre une valeur de **pH = 7**, soit **V3** le nouveau volume obtenu. [47, 51, 58]



Photo III.17: Echantillons avant la centrifugation



Photo III.18 : la centrifugeuse utilisée (ROTOFIX 32 A)

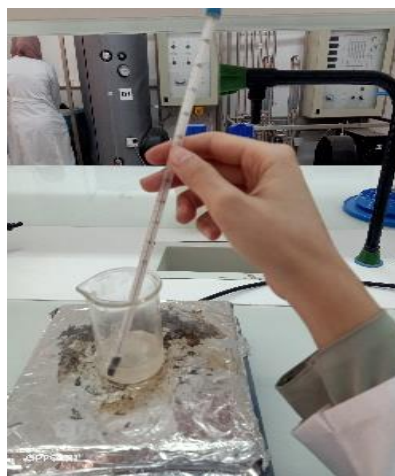


Photo III.19 : L'ébullition de liquide sur la plaque chauffante

L'acidité volatile est exprimée par la relation suivante :

$$AGV = (V_3 - V_2) \times \frac{0.1 \times 1000}{25} \text{ (en meq. l}^{-1}\text{)}$$

$$AGV = (V_3 - V_2) \times 4 \times 0.06 \text{ (en g.l}^{-1}\text{ d'acide acétique)}$$

Avec

V_2 : Volume de NaOH, pH = 4

V_3 : Volume de NaOH, PH = 7

III.5.3.2.2 La détermination des TAC

Le titre alcalimétrique complet permet de connaître les doses de carbonates, d'hydroxydes et d'hydrogénocarbonates alcalins ou alcalino-terreux, responsables du pouvoir tampon du fermenteur vis-à-vis des acides organiques et acides gras volatils.

Cette alcalinité permet au pH de rester aux alentours de la neutralité malgré la présence d'acides.

Le calcul de la TAC se fait à partir de volume V_1 noté précédemment dans la mesure de l'AGV .[47, 58]



Photo III.20 : L'ajoute de l'acide sulfurique (H_2SO_4)

TAC est exprimée par la relation suivante :

$$TAC = V_1 \times \frac{0.1 \times 1000}{25} = V_1 \times 4 \text{ (en meq.L}^{-1}\text{)}$$
$$TAC = V_1 \times 4 \times 0.05 \text{ (en g/l de CaCO}_3\text{)}$$

Avec :

V_1 : Volume de H_2SO_4 , pH = 4

Plusieurs auteurs utilisent le rapport AGV/TAC inférieur à 0.5 comme indice de bon déroulement de la fermentation méthanique [71].

Chapitre IV :

Résultats et Discussion

IV.1 Introduction

Le présent chapitre est consacré à regrouper tous les résultats d'analyses physico-chimiques des échantillons de substrats, afin de nous permettre la visualisation de l'évolution de la production de biogaz ainsi les paramètres de contrôle de processus de digestion anaérobie. Les résultats obtenus sont interprétés tout en faisant une comparaison avec les résultats d'autres chercheurs dans le domaine.

IV.2 Caractérisation du substrat utilisé

Les principales caractéristiques physico-chimiques des déchets organiques utilisés dans cette étude, sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau IV.1 : Caractérisation physico-chimique des déchets de poulet (viscère + plume)

	Avant la fermentation anaérobie	Après la fermentation anaérobie
Matière sèche (%)	25.56 %	16%
Humidité (%)	74.44 %	84%
Matière organique (%)	97.75 %	89.16%

Tableau IV. 2: Caractérisation physico-chimique des déchets d'olive

	Avant la fermentation anaérobie	Après la fermentation anaérobie
Matière sèche (%)	56.63 %	32 %
Humidité (%)	43.37%	68 %
Matière organique (%)	99.42 %	94.58

Discussion :

Les Tableaux (IV-1) et (IV-2) résument les caractéristiques physico-chimiques des deux déchets étudiés avant et après la fermentation anaérobie :

➤ **Caractérisation physico-chimique Avant la fermentation anaérobie :**

Les résultats obtenus démontrent que les substrats étudiés sont riches en matière organique ce qui rend ces derniers plus appropriés pour la digestion anaérobie. Avec un taux qui arrive à 97.75% pour (viscère +plume) et 99.42 % pour les déchets d'olive. Nos résultats sont en accord avec ceux trouvés pour des études menées par A. **Tahri et M. Djaafri** [5] pour les déchets de volailles et **Ajmia Chouchene** [72] pour les déchets d'olive .

Et d'une autre part les échantillons étudiés présentent une teneur importante en humidité (supérieure à 40 %). 43.37% pour les déchets d'olive et 74.44% pour les déchets de volaille. Donc ce sont difficilement combustibles, c'est pourquoi la fermentation méthanique reste la meilleure technique de valorisation de ces déchets. [70]

➤ **Après la fermentation anaérobie**

Les résultats d'analyse enregistrés dans les tableaux IV.1 et IV.2 révèlent que la matière organique est légèrement diminuée. Cette diminution s'explique qu'il y'avait une dégradation de la matière organique.

Un taux de dégradation faible de matière organique a été noté pour les deux types de déchets, en effet la quantité de MO est abaissée de **5%** pour les déchets d'olive, Sachant que pour les déchets de poulet, le pourcentage de dégradation arrive à **8%**, cependant que la consommation de MO dans le système de digestion pourra être perturbée par l'instabilité des paramètres de fonctionnement pH et AGV [73]

IV.3 Évolution des paramètres d'épuration

IV.3.1 L'évolution des acides gras volatils (AGV) et Le titre alcalimétrique complet (TAC)

a. L'évolution avant la fermentation

Tableau IV.3: les valeurs de volume (V_1 , V_2 , V_3) pour chaque digesteur avant la fermentation

		Digesteur A	Digesteur B	Digesteur C
PH= 4	$V_1(\text{H}_2\text{SO}_4)$ (ml)	1.28	0.73	0.88
PH=4	V_2 (NaOH) (ml)	0.2	0.3	0.4
PH=7	V_3 (NaOH) (ml)	0.7	0.4	0.8

Tableau IV.4: Les valeurs de l'AGV et TAC pour digesteur (A, B, C) avant la méthanisation

	Digesteur A	Digesteur B	Digesteur C
AGV (<i>en meq. l⁻¹</i>)	2	0.4	1.6
TAC (<i>en meq. l⁻¹</i>)	5.12	2.92	3.52

b. L'évolution après la fermentation

Tableau IV.5 : les valeurs de volume (V_1 , V_2 , V_3) pour chaque digesteurs après la fermentation

		Digesteur A	Digesteur B	Digesteur C
PH= 4	$V_1(\text{H}_2\text{SO}_4)$ (ml)	35.4	41.3	10.5
PH=4	V_2 (NaOH) (ml)	6	7.3	3.7
PH=7	V_3 (NaOH) (ml)	28	30.3	26.8

Tableau IV.6 : Les valeurs de l'AGV et TAC pour digesteur (A, B, C) après la méthanisation

	Digesteur A	Digesteur B	Digesteur C
AGV (en meq. l ⁻¹)	88	92	94.4
TAC (en meq. l ⁻¹)	141.6	165.2	42

Afin de mieux illustrer les résultats d'analyses la figures ci-dessous présente la Variation de l'AGV avant et après la fermentation pour les 3 digesteurs

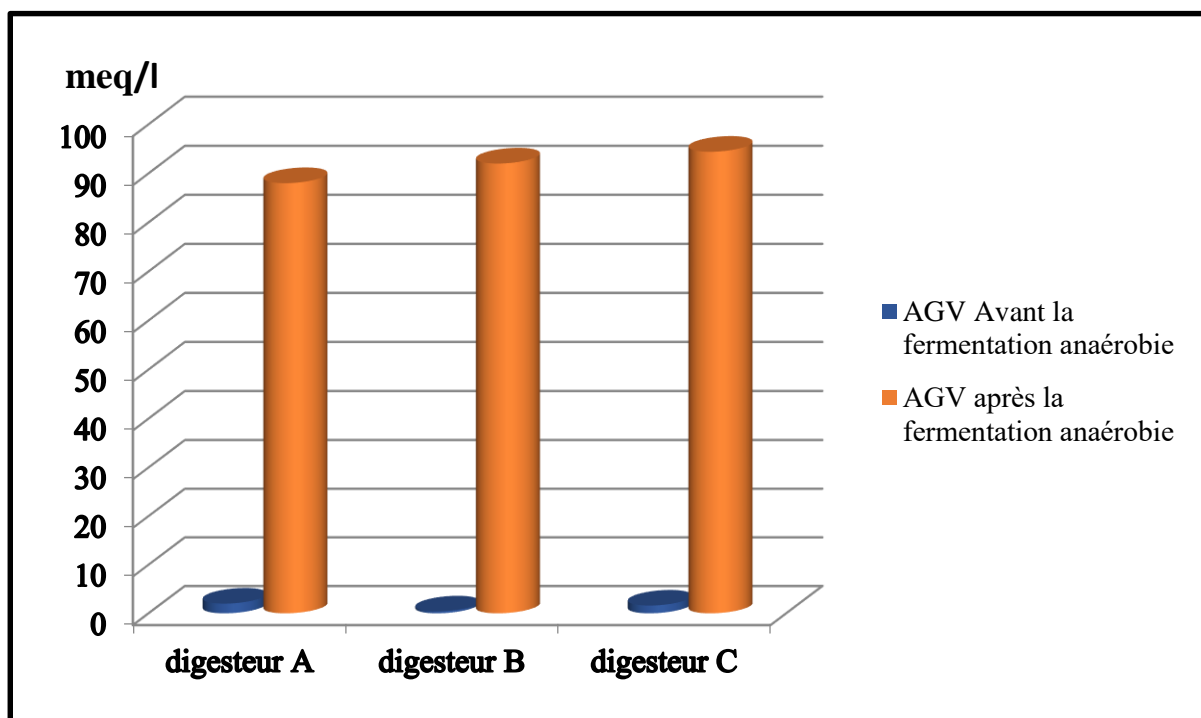


Figure IV.1 : Variation de l'AGV avant et après la fermentation

Discussion :

La concentration en acides gras volatils (AGV) est un paramètre caractéristique des premières phases de la méthanisation. Le suivi de son évolution permet d'estimer l'état de dégradation du substrat [74]. La **figure IV.1** représente les changements des AGV avant et après la fermentation pour les trois digesteurs (A, B, C).

On remarque que les valeurs de l'AGV étaient faibles par rapport au résultat du dernier jour. Nous pouvons expliquer cette diminution par le fait que la concentration des bactéries acidogènes est faible et lorsque cette concentration augmente, cela s'accompagne également d'une augmentation de la concentration d'AGV. Ceci est expliqué ainsi par le fait que les bactéries acidogènes consomment les substrats organiques pour grandir et les transforme en AGV [75]

Donc une augmentation importante des valeurs des AGV de 2 à 88 meq.L⁻¹ de CH₃COOH dans le digesteur A (déchets de poulet) et de 1.6 à 94.4 meq.L⁻¹ de CH₃COOH pour le digesteur C (déchets d'olive). Cette augmentation est expliqué par le fait que les bactéries acidogènes consomment les substrats organiques pour grandir et les transforme en AGV et donc l'accumulation des acides volatile (AGV) qui affecte négativement sur le déroulement de la méthanisation [58, 75]

IV.3.1.1 Rapport acides gras volatils/Titre alcalin complet

Tableau IV.7: la variation de rapport (AGV /TAC) avant et après la fermentation anaérobie

	Digesteur A	Digesteur B	Digesteur C
AGV /TAC (Avant la fermentation anaérobie)	0.39	0.13	0.45
AGV /TAC (après la fermentation anaérobie)	0.62	0.55	2.2

Discussion :

Le rapport AGV/TAC est un autre critère permettant de confirmer la stabilité des bioréacteurs anaérobies qui doit être inférieur à 0.5 [76] .

Au début de la digestion, les valeurs de rapport AGV/TAC de 0,39 et 0,13 ,0,45 sont enregistrées pour les digesteurs A et B et C respectivement. Les résultats montrent que ces ratios sont inférieurs à 0.5, ce qui témoigne de la stabilité du procédé.

A la fin de la digestion, et a partir le figure IV.2 , on remarque une augmentation significative du rapports AGV/TAC avec une valeur de 0,62 pour digesteur A, 0.55 pour digesteur B et

2.2 pour digesteur C. Ces valeurs expriment la forte présence des acides gras volatile produit durant la digestion, ce qui entravé le processus de méthanisation.

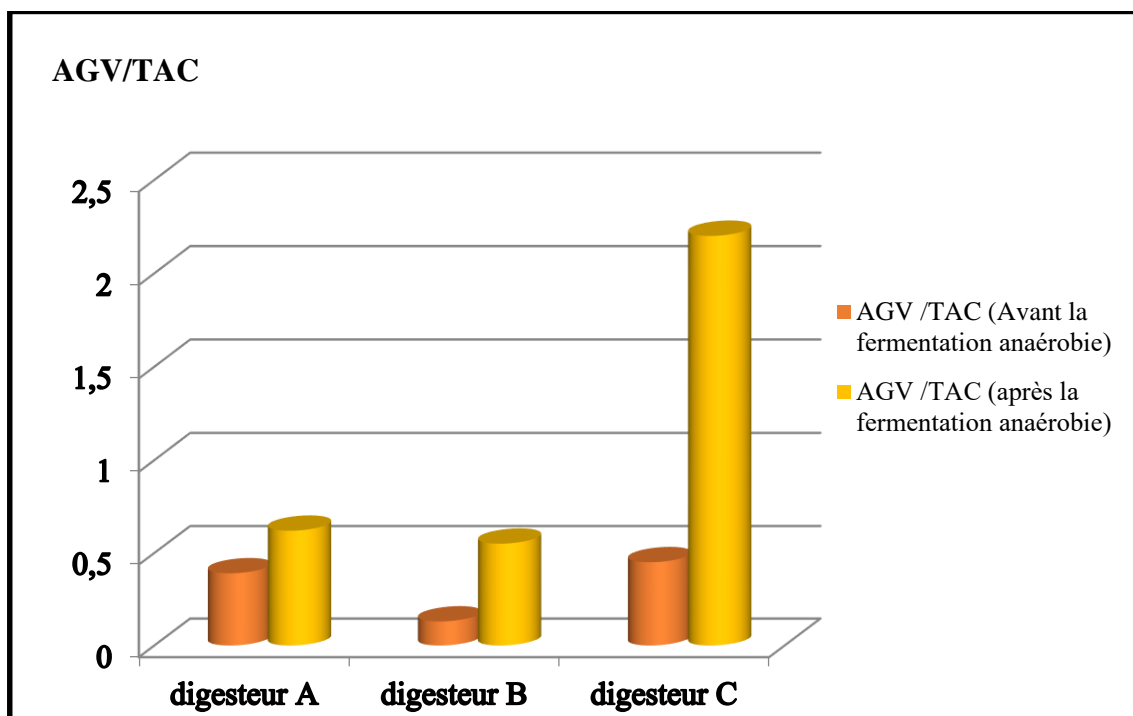


Figure IV. 02 : Variation de rapport AGV/TAC avant et après la fermentation

IV.4 Evolution des paramètres de fonctionnement

IV.4.1 Évolution du pH

Tableau IV.8: Les valeurs de PH Avant et après la fermentation anaérobie pour les quatre digesteurs

	Digesteur A	Digesteur B	Digesteur C	Digesteur D
pH Avant la fermentation anaérobie	7.41	7.28	6.9	7.31
pH Après la fermentation anaérobie	6.03	6.35	5.01	/

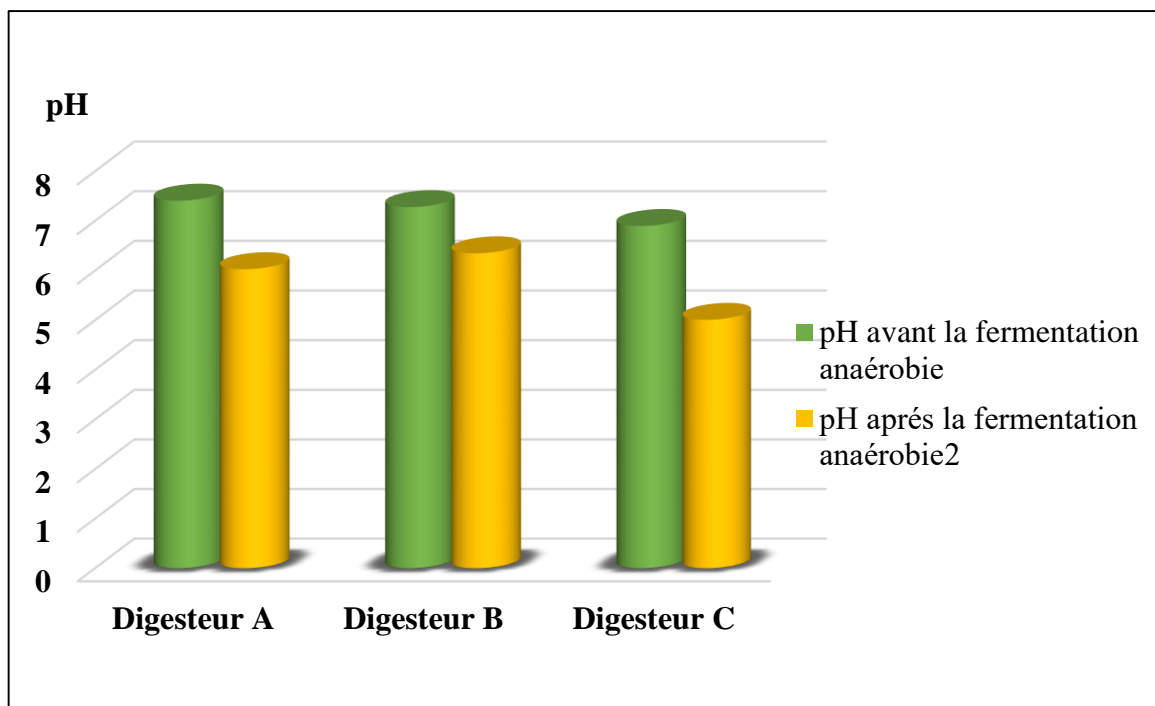


Figure IV.3 : Variation du pH avant et après la fermentation

Discussion :

Afin d'assurer un bon déroulement de la digestion anaérobie dans le réacteur discontinu, il est important de suivre l'évolution de pH de milieu. Il est connu que la digestion anaérobie se déroule de façon optimale au voisinage de la neutralité $\text{pH} = 7$ avec une valeur optimale entre 6.5 et 7.5 [77]

La figure IV.3 représente les valeurs du pH avant et après la fermentation dans la période de 22 jours dans chaque digesteur, on remarque une diminution du pH du premier jour et au dernier jour pour chaque substrat, tel que la valeur de pH pour le digesteur A est diminué de 7.41 à 6.03 , pour le digesteur B de 7.28 à 6.35 , et pour le digesteur C de 6.9 à 5.01 cette diminution est expliquée par la dégradation de matière organique et la formation des acide gras volatiles. Les mêmes constatations ont été enregistré par **KALLOUM et al** [78] et **LAMIR et KALLOUM** [47] .

➤ L'alcalinité (TAC, Titre Alcalimétrique complet) mesure le pouvoir tampon dans un digesteur anaérobie et donc sa capacité à maintenir un pH stable. Ce paramètre, lié principalement à la présence de CO_2 dissous nécessaire pour la croissance des bactéries autotrophes, doit être maintenu au-dessus de $2 \text{ g eq. CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ pour éviter des chutes drastiques de pH.[58], donc on peut interpréter la chute de pH dans les trois digesteurs par l'augmentation des valeurs de TAC .

IV.4.2 Evolution du volume de biogaz

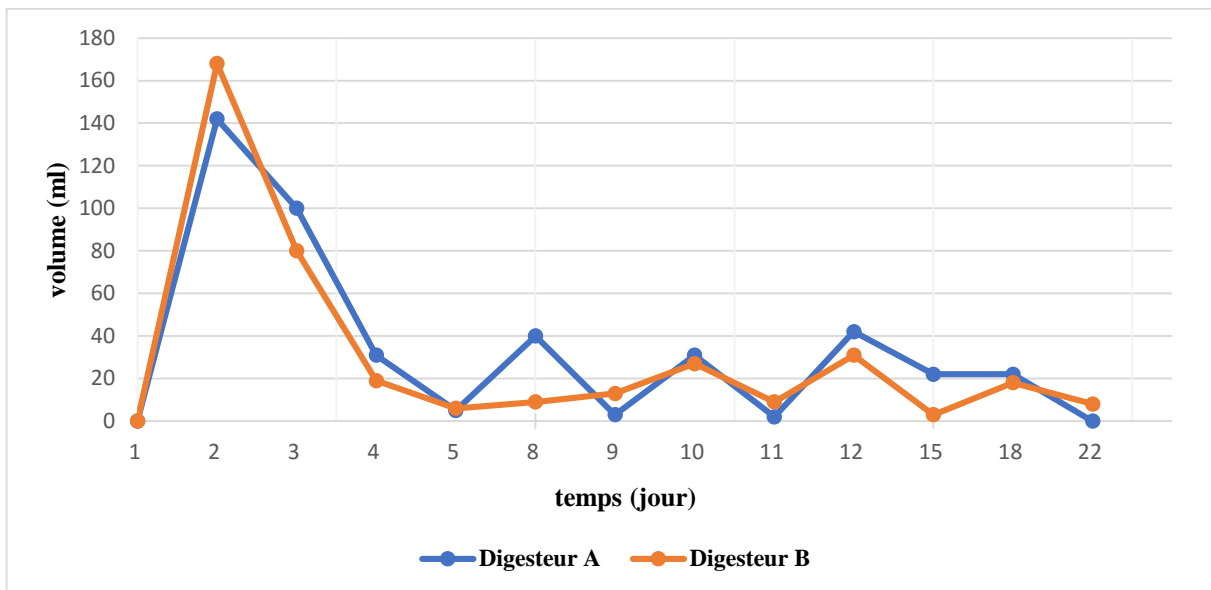


Figure IV. 4 : Le volume journalier de production de biogaz au cours du temps pour digesteur A et B

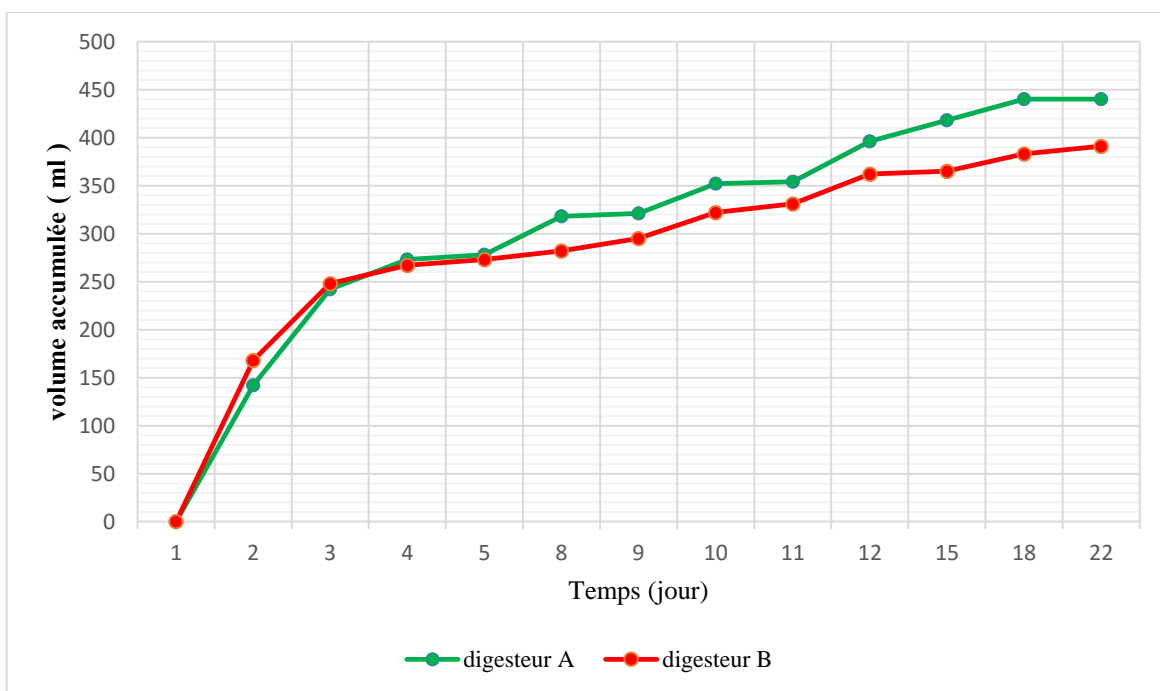


Figure IV.5 : Cinétique de la production cumulée du biogaz pour digesteur A et B

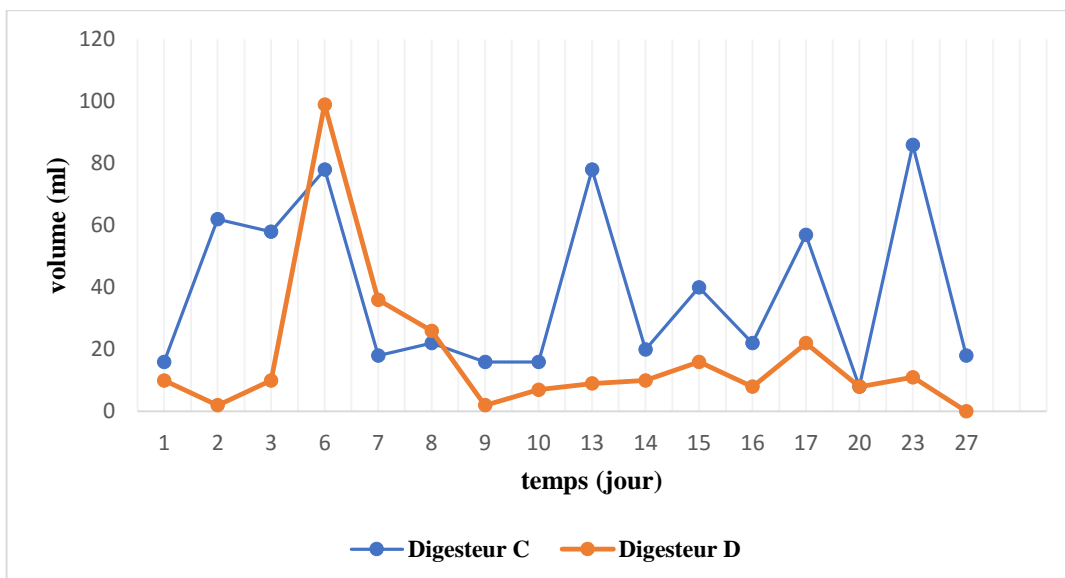


Figure IV.6 : Le volume journalier de production de biogaz au cours du temps pour accumulée digesteur C et D

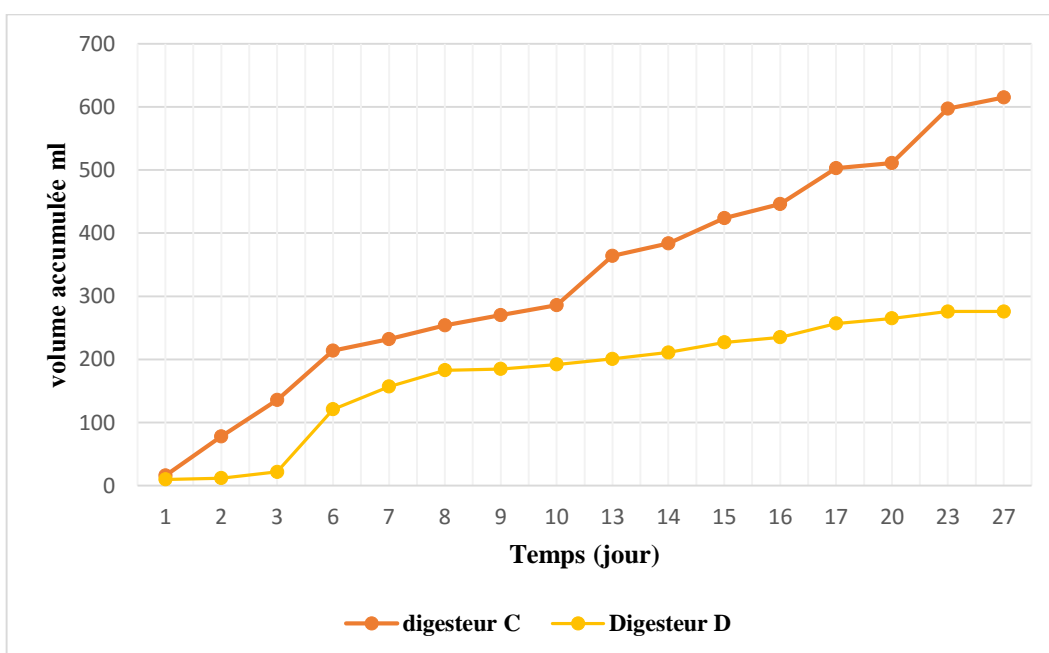


Figure IV.7: Cinétique de la production cumulée du biogaz pour digesteur C et D

Discussion :

Durant un temps de séjour de 22 jours pour les déchets de poulet et 27 jours pour les déchets d'olive, la quantité de biogaz produite est évaluée à 440 ml pour le digesteur A et de 391ml pour le digesteur B et de 615 ml et 276 ml pour les digesteurs C et D respectivement. Comme il est illustré dans les figures IV.5 et IV.7.

- L'allure générale de la production montre que la quantité du biogaz produite par digestion des déchets d'olives est plus grande que celle produite de déchets de volaille ; Ce résultat est corrélé avec les compositions chimiques des déchets organiques. [70]
- Le volume du biogaz total obtenu dans ce processus par le digesteur A et C pendant 22 j de digestion est calculer avec le blanc ; donc après la soustraction des valeurs du blanc estimé de 276ml ; la nouvelle valeur devienne 393ml pour les déchets d'olive et 164 ml pour les déchets de volaille.
- on peut conclure que la production de biogaz est en forte concordance avec l'addition du fumier de bovin qui enrichisse du milieu par des bactéries méthanogène qui facilitent la dégradation de la matière organique

La cinétique de production de biogaz (figures IV.4 et IV.6) se divise en trois principales phases

- **La première phase (phase d'hydrolyse et acidogénèse):** Cette période comptabilise une durée de 4jours depuis la fermeture du digesteur. Une très grande production de gaz non inflammable a été cependant enregistrée, estimée à 273 ml pour Digesteur A, 267ml pour Digesteur B, 214 ml pour Digesteur C, et 121 ml pour Digesteur D. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux trouvées pour des études menées par **Ouahabi et al** en 2012 [8] et par **TAHRI Ahmed et al** en 2016 [5] , pour production de biogaz par co- digestion des déchets organiques (déchets d'abattoir et de volaille) et pour production de biogaz à partir du déchet de la pomme de terre respectivement.

Cette période correspond à la phase de liquéfaction durant laquelle se déroulent l'hydrolyse, l'acidogénèse et l'acétogénèse correspond à la conversion intracellulaire des produits solubles d'hydrolyse en composés tels que l'eau, le dihydrogène H₂, le dioxyde de carbone CO₂ [58]

Cette phase précède la phase de gazéification ou la méthanogénèse qui est responsable de la production du biogaz

- **Phase exponentielle (stationnaire):** A partir de 5^{ème} jour, les conditions de production sont atteintes, ce qui permet de comptabiliser les quantités de biogaz les plus importantes. nous avons remarqué une stabilité du volume du biogaz produit quotidiennement jusqu'au 18^{ème} jour pour les digesteurs A et B et jusqu'au 23^{ème} jour avec de fortes productions journalières passant pour les digesteurs C et D

- **Phase de déclin :** A partir du 18^{ème} jour jusqu'au 22^{ème} jour pour le digesteur A et B et du 23^{ème} jour au 27^{ème} jour pour les digesteurs C et D, nous avons constaté pour les 4

digesteurs une chute brusque de la production de biogaz jusqu'à ce qu'elle devienne nulle probablement sous l'effet de l'accumulation des acides gras volatiles.

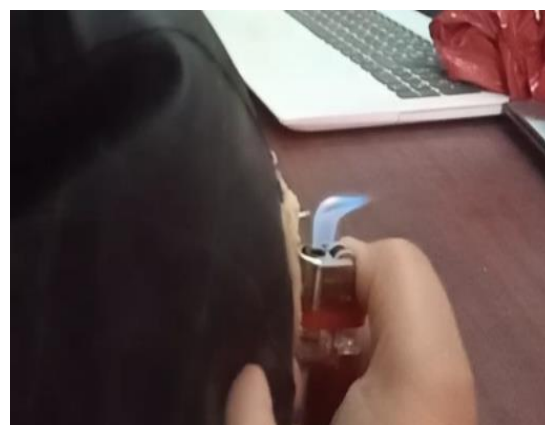
Ainsi que les valeurs de pH mesurées dans les digesteurs, à la fin des expérimentations, ont été inférieures à 6,5 ce qui prouve que l'arrêt de la production de méthane est dû à l'acidification du milieu et non pas à l'épuisement de la biomasse.

IV.5 L'inflammabilité de biogaz

Les deux photos suivantes représentent l'inflammabilité de gaz produit de deux types du déchet étudié. Le test d'inflammabilité de biogaz, donne une idée sur le rendement énergétique de l'échantillon utilisé. Le biogaz est retiré à l'aide d'une seringue et subi à une flamme discontinue d'un briquet avec un débit très petit.



**Photo IV. 01 : inflammabilité
De biogaz (d'olive)**



**Photo IV. 02 : inflammabilité de biogaz
(poulet)**

IV.6 Conclusion

Les résultats analytiques obtenus dans ce chapitre pendant la courte période de fermentation, montrent qu'il est possible de réaliser un processus de méthanisation idéale avec une bonne productivité en biogaz. Donc, ces résultats permettent d'envisager des études plus approfondies pour la mise au point d'un procédé de valorisation de milliers de tonnes de biomasse produite par ce type des déchets agroalimentaires.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans le contexte actuel de l'augmentation des quantités de déchets générés par la population, la digestion anaérobie et la valorisation du biogaz ainsi produit, apparaissent comme des solutions d'avenir pour le traitement de ces déchets dans un esprit de développement durable.

La biomasse est une des plus abondantes sources de carbones renouvelables et aura un rôle prépondérant à jouer dans la production d'énergie dans le futur. La technologie du biogaz repose sur un concept de recyclage des déchets lors duquel la masse organique est convertie par fermentation méthanique en énergie.

Le procédé de méthanisation est largement développé à travers l'Europe et d'après les études de marché cette technique n'a pas vu la lumière jusqu'à maintenant en Algérie donc elle est encore au stade embryonnaire et le potentiel de développement se situe principalement dans la partie de nord parce qu'elle est le centre économique de toutes production (les usines de transformations de la viande, les décharges publiques, les abattoirs ... donc la matière organique est disponible quotidiennement. La naissance d'une technique pareille en Algérie nécessite un grand intérêt par l'état il est nécessaire de recueillir des références sur les performances technico-économiques afin de pouvoir plus efficacement encourager financièrement et le bon accompagnement de la mise en place des petites nouvelles unités.

Dans cette étude nous démontrons que les déchets organiques restent valorisables par fermentation méthanique, d'une part ils génèrent une source d'énergie renouvelable et d'autre part les résidus de fermentation constitue un apport important pour la fertilisation du sol, car une partie de la matière organique contenue dans le substrat est dégradée au cours de la bio méthanisation, laquelle aurait été dégradée par les micro-organismes du sol au cours des mois suivant l'épandage s'il n'y avait pas eu de bio méthanisation, et l'autre partie de la matière organique intéressante pour la structuration du sol, celle qui formera l'humus, est conservée lors de la bio méthanisation. Pour optimiser la bio méthanisation des déchets organiques il est nécessaire de maîtriser plusieurs facteurs, dont l'agitation, quantités et activité des bactéries présentes, pH, température, composition.

A partir du dispositif expérimental de digestion réalisé, la fermentation mésophile (38° C) menée en batch de notre substrat a permis de produire 393 ml de biogaz durant un temps de séjour de 27 jours pour déchets d'olive et de 164 ml pour les déchets poulet dans une période de 22 jours.

Conclusion Générale

Les analyses effectuées ont montré la richesse de ces substrats en matière organique avec un pourcentage de 99.42 % et 97.75 % pour déchets d'olive et déchets poulet respectivement. De plus, le suivi des paramètres de contrôles (AGV et TAC) montre une augmentation de ces derniers et un changement important dans le process de méthanisation avec un dépassement de la valeur optimale du rapport AGV/TAC (> 0.5) et une diminution de pH dès la fin de la digestion et cela pour les deux substrats. Cette diminution est traduite par une diminution de production importante de biogaz pour les deux substrats.

Les résultats obtenus sont prometteurs et montrent la grande valeur énergétique de ces déchets, D'autant que l'Algérie bénéficie d'une grande superficie d'oliviers et consomme de grandes quantités de viande de poulet.

Dans le but de compléter notre étude, il serait souhaitable d'étudier la digestion anaérobie du même substrat avec un système bien définie pour mesurer (pH et AGV et TAC) pour chaque jour et au cours de phénomène de fermentation , et mesurer les propriétés que nous n'avons pas pu mesurer, comme le dioxyde de carbone et Demande Chimique en Oxygène , afin de obtenir des bonne résultat . et d'une autre part l'optimisation des conditions opératoire pour augmenter le rendement de production de biogaz.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

1. MALIKA, B. and P.T. MOHAMED, *Le Biogaz Source D'énergie Renouvelables Cas des déchets ménagers «biodéchet»*. International Journal of Scientific Research & Engineering Technology 2019. **11**: p. 15-19.
2. Bouyahia, S., *Commande et supervision d'un procédé biotechnologique: Application à la production d'un biogaz*. 2020. thèse de doctorat, université Ferhat Abbas Setif-1
3. Moletta, M., *Caractérisation de la diversité microbienne aéroportée des biogaz*. 2005, thèse de doctorat. Université Montpellier 2 (Sciences et Techniques).
4. Douag-Tirichine, N., A. Benkhelifa, and K. Bousdira, *Production de biogaz à partir des déjections bovines en milieu aride: cas du M'Zab (Algérie)*. Revue des Energies Renouvelables, 2014. **17**(3): p. 419-426.
5. Ahmed, T., *Valorisation Energétique par la Production d'Electricités à Partir de la Digestion Anaérobie de Déchet Organique dans le Milieu Saharien*. 2019, thèse de Doctorat, université de Ghardaia ; .
6. Mellak, A., et al., *Contribution à la production du biogaz à partir d'effluents d'élevage animaliers en Algérie*. Algerian Journal of Environmental Science Technology, 2019. **5**(1).
7. Bataiche, I., *Recherche de nouvelles potentialités de Yarrowia lipolytica, isolé de différents milieux naturels pour des applications biologiques*. 2014, thèse doctorat , Université Constantine 1.
8. Ouahabi, Y., N. Maamir, and K. Bensadok, *Etude du potentiel biométhane des déchets d'abattoirs*. Revue des Energies Renouvelables, 2016. **19**(1): p. 111-118.
9. Nawel, M.B., *Valorisation des résidus agro-industriels*. 2015, Université de Béjaia, polycopie
10. Boukria, A. and G. Ouahrani, *Valorisation des déchets ménagers et des grignons d'olive par dégradation anaérobie et production de compost et de biogaz*. 2018, université de constantine
11. Mendil, M.J.F.I., *L'oléiculture: expériences algériennes*. Filaha Innove, 2009. **4**(6).
12. Djemaci, B., *La gestion des déchets municipaux en Algérie: Analyse prospective et éléments d'efficacité*. 2012, thèse de doctorat , Université de Rouen.
13. Belkebir, Z., *Valorisation des déchets agro-alimentaires cas des grignons d'olives*. 2007. Thèse de doctorat. Boumerdes, Université M'hamed Bougara. Faculté des sciences de l'ingénieur.
14. AOUKLI MANEL, N. and C. SOUAD, *Etude et qualitative des huiles d'olive de la région de DJAAFRA*. 2019. mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi B.B.A
15. Belkadi, M.E.A., *Etude technique pour la valorisation énergétique des microalgues*. 2009. Thèse de doctorat.

Références Bibliographiques

16. Hadjou, L., O. Lamani, and F. Cheriet, *Labellisation des huiles d'olive algériennes: contraintes et opportunités du processus?* New Medit, 2013. **12**(2): p. 35-46.
17. Benabid, H.J.I.U.M.D.C., Algérie, *Caractérisation de l'huile d'Olive Algérienne, Apports des méthodes chimiométriques*. 2009, Université Mentouri De Constantine, Algérie.
18. Abichou, M., et al., *Essais de valorisation des margines par epandage en oliveraies*. Revue Ezzaitouna, 2003. **9**(1): p. 1-21.
19. Yildiz, A. and A. Gür, *Adsorption of phenol and chlorophenols on pure and modified sepiolite*. J Journal of the Serbian Chemical Society, 2007. **72**(5): p. 467-474.
20. Morisot, A. and J.-P. Tournier, *Répercussions agronomiques de l'épandage d'effluents et déchets de moulins à huile d'olive*. J Agronomie, 1986. **6**(3): p. 235-243.
21. Achak, M., et al., *Caractérisation des margines issues d'une huilerie moderne et essais de leur traitement par coagulation-floculation par la chaux et le sulfate d'aluminium*. Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science, 2008. **21**(1): p. 53-67.
22. Hamdi, M., *Anaerobic digestion of olive mill wastewaters*. J Process Biochemistry, 1996. **31**(2): p. 105-110.
23. Kapellakis, I.E., K.P. Tsagarakis, and J.C. Crowther, *Olive oil history, production and by-product management*. J Reviews in Environmental Science Bio/Technology, 2008. **7**(1): p. 1-26.
24. Amrane, F., S. Amrane, and D.E. Belhadi, *Effet des margines et du grignon d'olive sur la croissance des rhizobiums*. 2017. Mémoire de Master; Université A.MIRA-BEJAIA
25. Alburquerque, J., et al., *Composting of a solid olive-mill by-product ("alperujo") and the potential of the resulting compost for cultivating pepper under commercial conditions*. J Waste Management, 2006. **26**(6): p. 620-626.
26. Yacoub, Y., *Valorisation des sous produits*. J. L'investisseur agricole, 1997. **19**: p. 17-18.
27. Nastri, A., et al., *Olive pulp and its effluents suitability for soil amendment*. J Journal of hazardous materials, 2006. **138**(2): p. 211-217.
28. Alcaide, E.M., et al., *Chemical composition and nitrogen availability for goats and sheep of some olive by-products*. Small Ruminant Research, 2003. **49**(3): p. 329-336.
29. Kademi, A., M. Ismaili-Alaoui, and A. Houde, *Des arômes synthétiques... au naturel*. 2003, entre de Recherche et de Développement sur les aliments Saint Hyacinthe, Québe.
30. Hemsas, S., *Contribution à l'étude de la décoloration des eaux sur grignons d'olives valorisés étude dynamique*. 2008.
31. Hammad, M., D. Badarneh, and K. Tahboub, *Evaluating variable organic waste to produce methane*. J Energy conversion management, 1999. **40**(13): p. 1463-1475.

Références Bibliographiques

32. Djamer, S., *Contribution à la connaissance et à la gestion des déchets d'abattoir-Cas de l'abattoir de l'Office Régionale Avicole du Centre (ORAC) de TAboukirt, Wilaya de Tizi-Ouzou*. 2014, Université Mouloud Mammeri.
33. Elamin, P.A.M., *Potentiel des déchets organiques et valorisation énergétique au Maroc*.
34. Horman, D.B.G.d.r.p.u.s.é.a., *Le poulet africain étouffé par l'Europe. Agrobusiness, dumping, souveraineté alimentaire*. 2004.
35. Penven, A. and E. Cesbron, *Atlas cartographique projet Valdor. Etude des potentialités de VALorisation des Déchets ORganiques en Vendée*. Projet VALDOR 2013. **20**: p. 6-7.
36. Elmoualdi, L., et al., *Caractérisation, transformation et valorisation de déchets d'éviscération de volaille de Kénitra, Maroc*. Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie 2006. **2**(1).
37. Nouad, M., *Étude technicoéconomique de projets de valorisation/gestion de déchets liés à la filière avicole en Algérie*. J Gtz-REME. 58p, 2011.
38. Appels, L., et al., *Anaerobic digestion in global bio-energy production: potential and research challenges*. J Renewable Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(9): p. 4295-4301.
39. Poulleau, J., *Caractérisation des biogaz-Bibliographie-Mesures sur sites*. J Rapport final INERIS,DRC, 2002(,-02-27158-AIRE-n316b-JPo).
40. Ohannessian, A., *Composés organiques volatils du silicium: un frein à la valorisation énergétique des biogaz:" génèse et mécanismes de formation"*. 2008, Lyon, INSA.
41. Ahmed, T., *Valorisation Énergétique par la Production d'Electricités à Partir de la Digestion Anaérobie de Déchet Organique dans le Milieu Saharien*. 2019,univ Ghardaia.
42. Laskri, N., O. Hamdaoui, and N. Nedjah, *Traitement et valorisation des déchets par procédé de digestion anaérobie: production du biogaz*. Revue des Energies Renouvelables CER, 2007. **7**: p. 23-26.
43. ALLEMAND, N., *La biomasse, le bois et les déchets de bois—définitions Biomass, wood and wood wastes—definitions*. 2009. **19**: p. 19.
44. Wallrich, A., et al. *Définition de classes de digestats agricoles en vue d la préconisation de leur insertion dans les pratiques de fertilisation*. in *JRI biogaz méthanisation 2018*. 2018.
45. Eyraud, M., *Biomasse-Energie, bilan carbone et émissions polluantes*. 2019.
46. Louai, N., *Evaluation énergétique des déchets solides en Algérie, une solution climatique et un nouveau vecteur énergétique*. 2009, Batna.

Références Bibliographiques

47. Lamir, A. and S. KALLOUM, *Production du biogaz à partir des folioles et pétioles des palmiers dattiers (Phoenix dactylifera L) variété H'mira*. 2020, université Ahmed Draia-ADRAR.
48. Bachiri, A., *Etude d'une installation de chauffage géothermique*. 2018, Université Mohamed Boudiaf-M'sila.
49. Mancini, F., *Traitement des déchets issus de la biomasse pour la génération d'énergie*. 2006, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.
50. Dumas, C. *Analyses du biogaz de digesteurs*. in *Ecole technique Analyse des gaz*. 2011.
51. BENDJERAD, F.Z., R. BENKHEIRA, and A. BOULAL, *Production de biogaz à partir des tourteaux des noyaux des dattes dans la région d'Adrar*. 2020, université Ahmed Draia-ADRAR.
52. Moletta, R., *Méthanisation de la biomasse*. Techniques de l'ingénieur Bioprocédés dans les domaines de l'énergie et de l'environnement, 2008.
53. LEVET, R.P.A., *ETAT DE L'ART DE LA MICRO-METHANISATION*. 2020.
54. Tanios, C. *Caractérisation, évaluation de la toxicité du biogaz issu de déchets ménagers et valorisation par reformage catalytique*. 2017. Université du Littoral Côte d'Opale.
55. Tatangelo, P., *La méthanisation: principe et inhibition par les antibiotiques*. 2016, Université de Lorraine.
56. ADEOSSI, F.G.F., *CARACTERISATION DU BIOGAZ PRODUIT A PARTIR DES SUBSTRATS BOVINS ET PORCINS DANS LA REGION DU CENTRE DU BURKINA FASO*. 2013, MEMOIRE DU MASTER D'INGENIERIE
57. Bollon, J., *Etude des mécanismes physiques et de leur influence sur la cinétique de méthanisation en voie sèche: essais expérimentaux et modélisation*. 2012, INSA de Lyon.
58. El Achkar, J., *Méthanisation de marc de raisin. Caractérisation et optimisation du procédé et des prétraitements*. 2017, Lorient.
59. Houari, M., *Etude de la valorisation par méthanisation des déchets des abattoirs de volailles*. 2018, MEMOIRE DU MASTER, UNIVERSITE de TLEMCEN. p. 26,40,41.
60. Moletta, R., *La méthanisation*. 2008: book, Tec et Doc.
61. Guillaume, B., *Service Prévention et Gestion des Déchets Direction Consommation Durable et Déchets*, ADEME Angers. 2015 Février.
62. Ravard, B., *Evaluation du potentiel méthanogène de différentes rations et des effets des digestats (fraction sèche et fraction liquide) sur des indicateurs de fonctionnement biologique du sol en lien avec le service de fertilité*. 2014, Université de Lorraine.
63. Saidi, A. and B. Abada, *La biométhanisation: une solution pour un développement durable*. J Rev. Energ. Ren.: CER, 2007. 7: p. 31-35.

Références Bibliographiques

64. Chottier, C., *Composés Organiques Volatils du Silicium et sulfure d'hydrogène-Analyse-Traitement-Impact sur la valorisation des biogaz*. 2011, INSA de Lyon.
65. Meres, M., *Analyse de la composition du biogaz en vue de l'optimisation de sa production et de son exploitation dans des centres de stockage des déchets ménagers*. 2009, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Jagiellone
66. Hess, J., *Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation*. 2007, Université Nice Sophia Antipolis.
67. Porpatham, E., A. Ramesh, and B. Nagalingam, *Effect of hydrogen addition on the performance of a biogas fuelled spark ignition engine*. International journal of Hydrogen energy, 2007. **32**(12): p. 2057-2065.
68. Henham, A. and M. Makkar, *Combustion of simulated biogas in a dual-fuel diesel engine*. J Energy Conversion Management, 1998. **39**(16-18): p. 2001-2009.
69. Houari, M., *Etude de la valorisation par méthanisation des déchets des abattoirs de volailles*. 2018, MEMOIRE DU MASTER, UNIVERSITE de TLEMCEN.
70. Afilal, M., O. Elasri, and Z. Merzak, *Caractérisations des déchets organiques et évaluation du potentiel Biogaz (Organic waste characterization and evaluation of its potential biogas)*. J. Mater. Environ. Sci, 2014. **5**(4): p. 2014.
71. Gaffour, H. and K. Ferdjellah, *Effet du traitement chimique et aérobie sur le rendement de PBM (Potentiel Biochimique Méthanogène) des déchets organiques du restaurant universitaire*. 2017, Université Ahmed Draia-ADRAR.
72. Chouchene, A., et al., *Thermal degradation of olive solid waste: influence of particle size and oxygen concentration*. Resources, Conservation Recycling 2010. **54**(5): p. 271-277.
73. Derbal, K., *Digestion anaérobie des déchets solides mélangés avec les boues de station d'épuration*. 2007.
74. Álvarez, J., et al., *Start-up alternatives and performance of an UASB pilot plant treating diluted municipal wastewater at low temperature*. J Bioresource Technology, 2006. **97**(14): p. 1640-1649.
75. KAHOUADJI, S. and F.F. TEMMOURI, *Commande de la charge organique en sortie des bioréacteurs anaérobie: Application au modèle AM2*. 2020, UNIV TELMCEN.
76. NEKILI, A. and M. DJAAFRI, *Digestion anaérobie mésophile des boues liquide de premier bassin de la station de lagunage de la ville d'Adrar (sud-ouest de l'Algérie)*. 2015, Université Ahmed Draya-Adrar.
77. Djaafri, M., et al., *Méthanisation des déchets organiques issus de la résidence universitaire de l'université Africaine de la ville d'Adrar Sud-Ouest de l'Algérie (Methanation of organic waste issued from African university campus in Adrar city (southwestern of Algeria))*. Journal of Materials Environmental Science. **5**: p. S2.

Références Bibliographiques

78. Kalloum, S., et al., *Etude de l'influence du pH sur la production du biogaz à partir des déchets ménagers*. Revue des Energies Renouvelables, 2007. **10**(4): p. 539-543.

Annexes

**Annexes 01 : Les Tableaux de mesurer du volume de production de biogaz journalier
au cours du temps pour Les 4 digesteur (A,B,C,D) au cours de 27 jour**

Jour	DigesteurA		DigesteurB	
	V (ml/j)	V _a (ml)	V (ml/j)	V _a (ml)
1	0	0	0	0
2	142	142	168	168
3	100	242	80	248
4	31	273	19	267
5	05	278	06	273
8	40	318	09	282
9	03	321	13	295
10	31	352	27	322
11	02	354	09	331
12	42	396	31	362
15	22	418	03	365
18	22	440	18	383
22	0	440	08	391

Jour	Digesteur C		Digesteur D (Balnc)	
	V (ml/j)	V _a (ml)	V (ml/j)	V _a (ml)
1	16	16	10	10
2	62	78	2	12
3	58	136	10	22
6	78	214	99	121
7	18	232	36	157
8	22	254	26	183
9	16	270	2	185
10	16	286	7	192
13	78	364	9	201
14	20	384	10	211
15	40	424	16	227
16	22	446	8	235

17	57	503	22	257
20	8	511	8	265
23	86	597	11	276
27	18	615	0	276

Annexes 02 : Les étapes de Processus d'extraction d'huile d'olive



Annexes 03 : les digesteurs d'olive et poulet pour le test de l'inflammabilité

