

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draïa Adrar



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Hydrocarbures et Energies Renouvelables

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

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

Thème :

**Amélioration du rendement en méthane de la boue de la ville
d'Adrar par Co-digestion anaérobique**

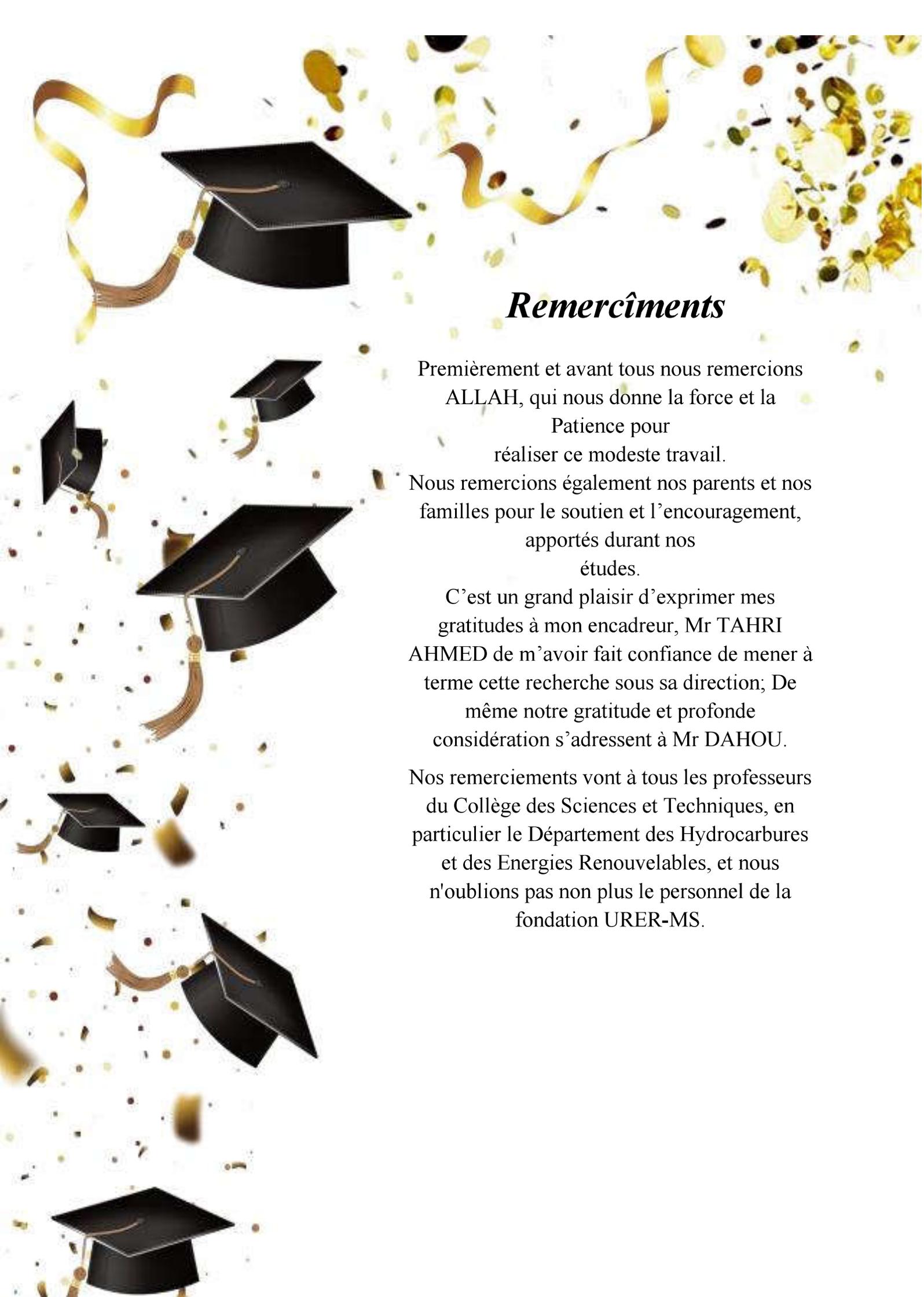
Préparé par :

Mlle. BENSOUNA Meriem

Membres de jury d'évaluation :

M.BENATILAH Ali	Président	Pr.	Univ. Adrar
M. TAHRI Ahmed	Encadreur	MRA	URERMS Adrar
M. DAHOU Mohamed El Amine	Co-encadreur	MCA	Univ. Adrar
M.SAHLI Youcef	Examineur	MAA	URERMS Adrar

Année Universitaire: 2021/2022



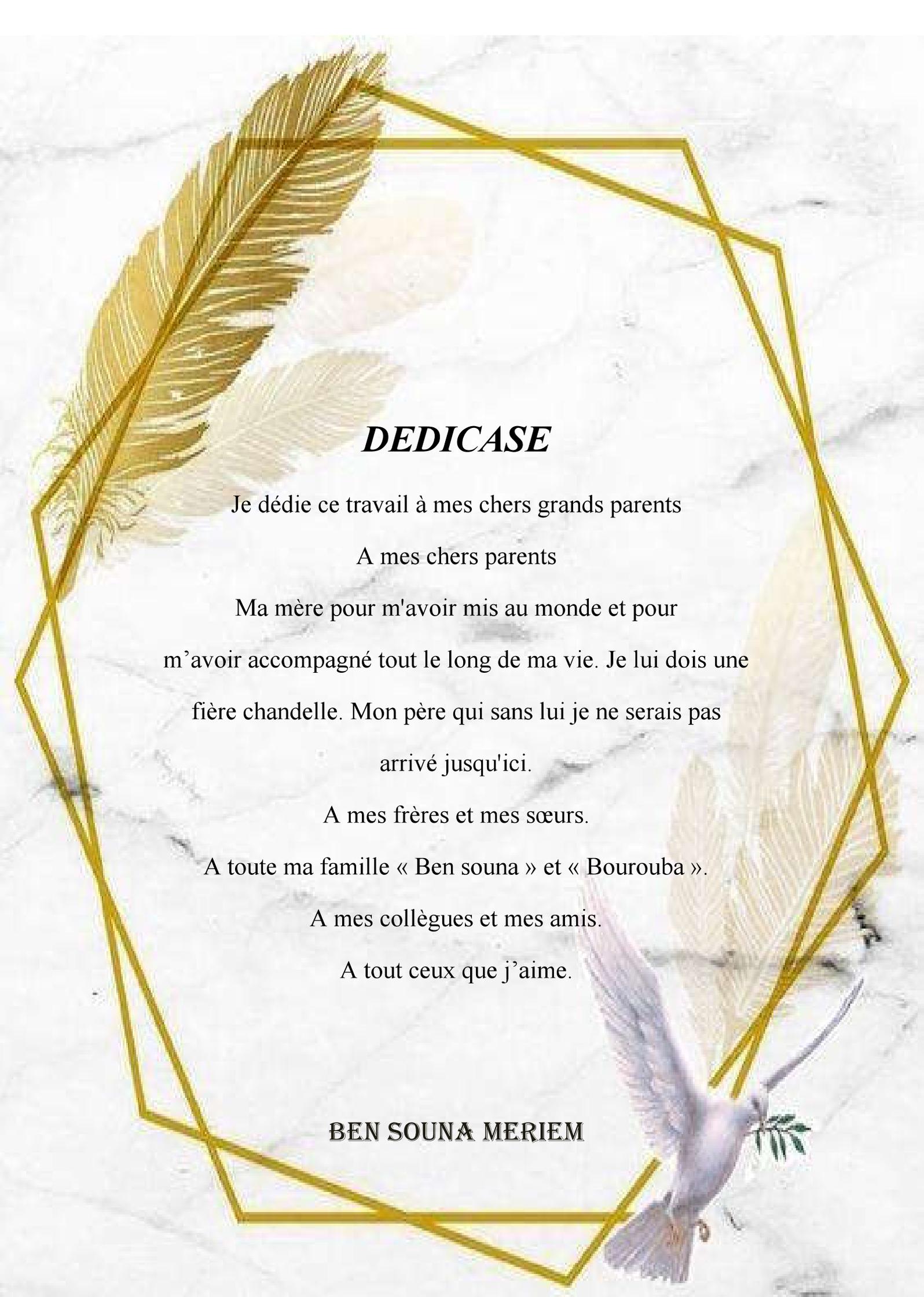
Remercîments

Premièrement et avant tous nous remercions
ALLAH, qui nous donne la force et la
Patience pour
réaliser ce modeste travail.

Nous remercions également nos parents et nos
familles pour le soutien et l'encouragement,
apportés durant nos
études.

C'est un grand plaisir d'exprimer mes
gratitudes à mon encadreur, Mr TAHRI
AHMED de m'avoir fait confiance de mener à
terme cette recherche sous sa direction; De
même notre gratitude et profonde
considération s'adressent à Mr DAHOU.

Nos remerciements vont à tous les professeurs
du Collège des Sciences et Techniques, en
particulier le Département des Hydrocarbures
et des Energies Renouvelables, et nous
n'oublions pas non plus le personnel de la
fondation URER-MS.



DEDICASE

Je dédie ce travail à mes chers grands parents

A mes chers parents

Ma mère pour m'avoir mis au monde et pour
m'avoir accompagné tout le long de ma vie. Je lui dois une
fière chandelle. Mon père qui sans lui je ne serais pas
arrivé jusqu'ici.

A mes frères et mes sœurs.

A toute ma famille « Ben souna » et « Bourouba ».

A mes collègues et mes amis.

A tout ceux que j'aime.

BEN SOUNA MERIEM

Liste des abréviations.....	I
Liste des unités.....	III
Liste des figures.....	VI
Liste des photos.....	V
Liste de tableaux.....	VI
Chapitre I : valorisation des déchets et biogaz.....	4
1. Définition de déchets (Topano, 2012).....	4
2. Les principaux types de déchets.....	4
2.1. D'après leur origine (Abdelkrim et Rabh, 2021).....	4
2.1.1. Les déchets ménagers et assimilés (Abdelkrim et Rabh, 2021).....	4
2.1.2. Les déchets industriels (Ghani, 2021).....	4
2.2.1. Les déchets industriels banals (Ghani, 2021).....	4
2.1.2.2. Les déchets industriels dangereux (DID) (Boudouaya, 2011).....	5
2.2. D'après leur nature.....	5
2.2.1. Déchets dangereux (Huisman, 1984).....	5
2.2.2. Les déchets inertes (Dahmane, 2012).....	5
2.2.3. Déchets ultimes (Omari, 2017).....	5
3. Déchets ménagers (Abdelkrim et Rabh, 2021).....	6
3.1 Définition.....	6
3.2 La composition des déchets ménagers (Abdelkrim et Rabh, 2021).....	6
3.3. La production des déchets ménagers (Biganzoli, 2012).....	7
3.4. Les modes d'élimination et de traitement des déchets ménagers (Tahri, 2014)...	7
3.4.1. La mise en décharge (Duan, 2006).....	7
3.4.2. Le recyclage (LASKRI, 2016).....	8
3.4.3. Traitement thermique.....	8

3.4.3.1. L'incinération (Maozhe Chen, 2012).....	8
3.3.4. Le traitement biologique (Benyoucef, 2013)	8
3.3.4.1. le compostage.....	8
3.3.4.2 La fermentation Alcoolique	9
3.3.4.3.Méthanisation (Boutouta., 2012).....	9
4. Historique de la méthanisation (Gijzen, 2002)	9
5. Mise en œuvre de la méthanisation (GWOGON, 2012).....	10
6. Etapes de la méthanisation (LACOUR, 2012).....	10
6.1. L'hydrolyse (Salvador, 2005)	11
6.2. L'acidogènes (Archer, 1990)	11
6.3. L'cétogenèse (Damien, 2006).....	12
6.4. La méthanogènes(Damien, 2004).	12
7. Les paramètres influençant la méthanisation (Kherboucuhe, 2005).....	12
7.1. pH (Kaidi, 2013)	12
7.2. La température (Kaidi, 2013)	13
7.3. L'absence d'oxygène (Marache, 2001).....	14
7.4. Rapport C /N	14
7.5.Brassage	14
7.6. Pression partielle en hydrogène (Schink, 2002).....	15
7.7. L'absence des inhibiteurs (Boutouta., 2012)	15
7.8 .Temps de rétention hydraulique (TRH) (Hu, 2014).....	17
8. Les digesteurs.....	18
8.1. Définition (Boutouta., 2012).....	18
8.2. Classifications des différents types de digesteurs	19
8.2.1. Mode de l'alimentation (Marache, 2001).....	19
8.2.2. les digesteurs discontinus (Marache, 2001).....	19

8.2.3. Les digesteurs continus	20
8.2.4. Classification selon le nombre d'étapes	22
8.2.4.1 Le procédé en mono-étape (Chen, 2014)	22
8.2.4.2 Le procédé en bi-étape	22
9. Avantages et les inconvénients de la digestion anaérobie (Chen, 2014)	23
10. Biogaz	24
10.1. Définition et composition (Moletta, 2002)	24
10.2. Historique (Ferdjellah, 2017)	25
10.3. Ressources de biogaz (Héteu, 2003)	26
10.4. Valeur énergétique	27
10.5. Purification du biogaz	27
10.6. Valorisation de biogaz :	28
10.6.1. Valorisation thermique en chaudière (Chaslerie, 2002)	28
10.6.2. Valorisation électrique du biogaz (Chaslerie, 2002)	29
10.6.3. Valorisation en carburant automobile (Moletta., 2006)	29
10.6.4. Valorisation par injection dans le réseau de gaz de ville ((Angélique, 2011).	29
11. Substrat (Angélique, 2011)	29
11.1. Les effluents d'élevage	29
11.2. Les eaux usées urbaines (Mottet A. , 2009)	30
11.3. Les déchets agro-alimentaires (Bertan, 1995.)	30
11.4. les ordures ménagères (Mottet A. , 2009)	30
Chapitre II: Matériels et méthodes	34
1. Le substrat utilisé	34
1.1 La boue (Tahri, 2014)	34
1.2 Le déchet l'abattoir	34

2. Description du digesteur	35
3. La détermination du pH :	36
4 .Caractéristique de déchet:	37
4.1 Détermination de la matière sèche (MS).....	37
4.2-Détermination de la teneur en matière organique (MO).....	39
5. Détermination du volume du biogaz et CH ₄ :	41
6. Détermination de la DCO (Ferdjellah, 2017).....	42
Chapitre III: Résultats et discussions	46
1.Caractéristiques initiales du substrat:.....	46
1.1 Taux de la matière sèche	46
1.2Taux de la matière organique et matière minérale du substrat.....	46
2 Evolution des paramètres de fonctionnement pour le trios digesteur	47
2.1 Evolution du pH	47
3. La production de Biogaz	48
4 .Volume de méthane (CH ₄)	50
5 .Cumulation des volumes	51
Conclusion générale	55
Références bibliographiques	58
Résumé :	63

DIS : Déchets industriels spéciaux.

DID : Les déchets industriels dangereux.

DMS : Déchets ménagers spéciaux.

CO₂: Dioxyde de carbone.

CH₄ : Méthane.

N₂ : Azote.

NH₃: Ammoniac.

H₂S : Sulfure d'hydrogène.

C/N : Rapport Carbone / Azote.

Ph : le potentiel Hydrogène.

AGV :Les acides gras volatiles.

T : Température.

TRH : Temps de Rétention Hydraulique.

H₂ : hydrogen.

Na⁺ : Sodium.

K⁺ : Potassium.

Ca⁺ : Calcium.

Mg⁺: Magnesium.

NH₄⁺ : Ammonium.

PO₄⁻³: phosphates.

COV : Composés Organiques Volatils.

ISD : Installations de Stockage de Déchets (ISD) .

DCO : Demande chimique en oxygène.

DCO_S : Demande chimique en oxygènesoleble.

DCO_T : Demande chimique en oxygène totale .

H₂O : Eau.

O₂: Oxygène.

MO :Matière organique.

MS : Matière sèche.

BMP : Potentiel Méthanogène.

DI : Digesteur .

M : Masse .

STEP : Station d'Épuration .

% : Pourcentage

°C : Degré Celsius .

J : Jours .

g : Gramme .

g/l : Gramme par litre .

m³ : Mètre cube

Kcal : Kilocalorie.

mg/m³: Milligramme par mètre cube .

L : Litre .

ml : Millilitre.

M/L : Mole par litre .

h : Heures

Liste des figures

Figure 1 : Schéma simplifié des principales étapes de la digestion anaérobie..... 11

Figure 2 : Différentes formes de digesteurs18

Figure 3: represent un exemple de digesteur discontinu développé par le center internationale de l'énergie et de l'hydraulique(Burkina-Faso..... 20

Figure 4 : une installation de bio-digesteur type chinois.....21

Figure 5 : principe d'un réacteur homogène et exemple d'une installation.....21

Figure 6 : Stratégies de mise en œuvre de la digestion anaérobie en deux étapes : (1) couplage direct, (2) séparation des liquides et des solides avec recirculation du lixiviation épuré.....23

Figure 7: Composition du biogaz des déchets des bovins (en % volumique) 24

Figure 8:Equivalences énergétiques de 1m3 de méthane.27

Figure 9 : Valorisation thermique du biogaz28

Figure 10: Schéma représentatif de système de mesure du volume du biogaz et de CH₄ produit. (Test de potentiel méthanogène ou BMP),.....42

Figure11: l'évolution de pH dans les digesteurs.47

Figure 12 : Evolution des volumes de biogaz avec les jours49

Figure 13: Evolution des volumes de méthane du trois digesteur avec les jour..... 51

Figure 14: Evolution des (substrat +digestat) volumes dans chacun des trois digesteurs pendant la période de fermentation52

Figure 15 : Evolution de la matière organique des (substrat et digestat) dans chacun des trois digesteurs 53

Liste des photos

photo 1 : La boues utilisé34

Photo 2 : le déchet l’abattoir utilise.....35

Photo 3 : Photo et schéma du digesteur en verre au niveau de laboratoire.....36

Photo 4 : pH-mètre.....37

Photo 5 : Matériels utilisés pour Détermination la matière sèche.....38

Photo 6 :La matière sèche s’obtient selon la méthode de Michaud.....39

photo 7: le four a moufle utilisé.....40

Photo 8 : substrat âpre calcination.....40

Photo 9 : La centrifugation.....43

Photo 10 : l’homogénéisation.....44

Photo 11: Photo du thermo réacteur.....44

Liste de tableaux

Tableau 1: comparaison de la digestion en condition thermophile et mésophile 14

Tableau 2 : Concentrations en ions provenant la stimulation ou l'inhibition de la Méthanisation..... 17

Tableau 3: Différents exemples de TRH suivant le procédé de digestions 18

Tableau .4 : Composition caractéristique des biogaz en fonction des substrats et des procédés de production OM / STEP / ISDND.....25

Tableau 5: Les différents composés et leurs techniques d'élimination.....28

Tableau 6 : Pourcentage des substrats dans les 03 digesteurs.....45

Tableau 7: Taux de la matière sèche du substrat.....46

Tableau 8: Taux de la matière organique matière minérale et du substrat46

Tableau 9 : La variation de pH en fonction de temps de les trois digesteur 47

Tableaux 10 : Le Volume de biogaz en fonction de temps de les trois digesteur48

Tableaux 11 : Le Volume de méthane en fonction de temps de les trois digesteur.....50

Tableau 12: Evolution volumes DCO de (substrat et digestat) de trois digesteur 51

Tableau 13: Evolution volumes MO de (substrat et digestat) de trois digesteur52



Introduction générale

Introduction générale

La croissance démographique que le monde a connue au cours du siècle dernier, ainsi que le développement industriel et l'accélération de l'urbanisation, s'accompagnent d'une augmentation de la demande d'énergie, notamment de pétrole, qui est la principale source d'énergie. Face à cette demande croissante, les réserves de combustibles fossiles ne dureront pas éternellement, et les pénuries de pétrole se poursuivront progressivement, entraînant une hausse des prix du pétrole.

L'état a poussé à encourager le développement de sources d'énergie alternatives pour répondre pleinement à la demande d'énergie.

Une de ces alternatives est la production de biogaz par fermentation méthanique des déchets organiques, et ce procédé a été largement utilisé partout dans le monde.

La Méthanisation est un processus biologique de dégradation de la matière organique par une flore microbienne qui se déclenche en conditions anaérobies. Différents consortiums de micro-organismes transforment les substrats organiques complexes en molécules simples (acides, alcools, ... etc.), puis en biogaz, gaz majoritairement composé de méthane (CH_4), de dioxyde de carbone (CO_2) et de sulfure d'hydrogène (H_2S).

Grâce à la digestion anaérobie, les déchets deviennent une source de richesses. Cette technologie devient essentielle dans le processus de réduction des volumes de déchets et la production de biogaz, qui est une source d'énergie renouvelable pouvant être utilisée dans la production d'électricité et de la chaleur.

Durant le processus de digestion anaérobie, seule une partie de la matière organique est complètement dégradée, le reste est un excellent agent de fertilisation des terres agricoles.

Le but de cette étude est l'amélioration du rendement énergétique du biogaz produit à partir des boues, d'autre part, préserver l'environnement en réduisant les déchets et donc en réduisant les émissions de gaz à effet de serre, Sur le plan agronomique : produire un digestat stabilisé utilisable comme fertilisant ou amendement organique. Ce manuscrit est composé de trois chapitres, plus d'une introduction et une conclusion générale.

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur la valorisation de déchets et biogaz ;
- Le deuxième chapitre est consacré pour la présentation de différents matériels et méthode ;

- Dans le chapitre III sont présentées l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus durant le suivi expérimental des différents cas étudiés de la digestion anaérobie.



CHAPITRE I :

VALORATION

DES DECHETS ET

BIOGAZ

Chapitre I : valorisation des déchets et biogaz**1. Définition de déchets (Topano, 2012)**

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

2. Les principaux types de déchets

Ils sont classés en deux grandes catégories

2.1. D'après leur origine (Abdelkrim et Rabh, 2021)**2.1.1. Les déchets ménagers et assimilés (Abdelkrim et Rabh, 2021)**

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

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

2.1.2. Les déchets industriels (Ghani, 2021).

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

2.2.1. Les déchets industriels banals (Ghani, 2021).

Ils sont constitués des :

- Emballages des ménades ;
- Emballages des entreprises ;
- Papiers et cartons ;
- verres ;

- Bois ;
- Plastique ;
- Inertes (gravis, sable.....) ;
- Métaux ferreux et non ferreux .

2.1.2.2. Les déchets industriels dangereux (DID) (Boudouaya , 2011).

Appelés aussi spéciaux (DIS), la nature de ces déchets présentent des risques physiques, biologiques, environnementaux et d'autres liées à des réactions dangereuses.

Ils nécessitent un traitement spécifique dans des installations adaptées car leur élimination nécessite des précautions particulières pour la protection de l'environnement.

2.2. D'après leur nature

2.2.1. Déchets dangereux (Huisman, 1984)

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

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

2.2.2. Les déchets inertes (Dahmane, 2012)

Ils correspondent à des déchets qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières, avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine . Ils correspondent à des déchets minéraux non pollués (tuiles, céramiques, briques, bétons, ... etc.), ils peuvent également s'agir de déchets industriels comme certains laitiers de hauts fourneaux ou encore des scories.

2.2.3. Déchets ultimes (Omari, 2017)

Ils sont les déchets résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment,

notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux.

Ce sont des déchets qui ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique importante.

3. Déchets ménagers (Abdelkrim et Rabh, 2021)

3.1 Définition

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

3.2 La composition des déchets ménagers (Abdelkrim et Rabh, 2021)

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

- Le type habitat (résidentiel ou urbain) ;
- Les saisons, les fêtes et les week-ends ;
- La géographie: à l'échelle d'une région et d'un pays
- La réglementation locale ;
- Les méthodes de gestion des déchets.

La composition des déchets est déterminée par le tri par classe. Les déchets ménagers sont séparés par le tri manuel en un certain nombre de classes correspondant à une classification en sept classes :

- a- Matières fermentescible (résidus de jardin, herbes, feuilles, restes alimentaires, épluchures de légumes et de fruits... etc.) .
- b- Matières plastiques (emballages plastiques, pots de yaourt... etc.) .
- c- Papiers-cartons (journaux, serviettes, enveloppes... etc.) .
- d- Textiles (vêtements, draps, serviettes, couvertures... etc.) .
- e- Métaux (biotes de conserves, casseroles, lames... etc.) .
- f- Verre (emballages en verre, lampes... etc.) .

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

3.3. La production des déchets ménagers (Biganzoli, 2012).

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

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

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

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

3.4. Les modes d'élimination et de traitement des déchets ménagers (Tahri, 2014)

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

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

3.4.1. La mise en décharge (Duan, 2006)

Les décharges produisent spontanément du biogaz car les déchets fermentescibles y sont régulièrement déposés. L'émission peut durer plusieurs dizaines d'années, d'abord à un rythme croissant, puis décroissant. Le processus peut être accéléré en humidifiant la matière, auquel cas le potentiel de production peut être récupéré entre 5 ou 10 ans. Sans

installation particulière autre que le captage des gaz dans les alvéoles, on peut ainsi récupérer 60 m³ de méthane par tonne enfouie.

3.4.2. Le recyclage (LASKRI, 2016)

Est la réintroduction directe d'un déchet dans le cycle de production dont il est issu, en remplacement total ou partiel d'une matière première neuve.

Dans le recyclage, le but principal est d'utiliser les déchets et non d'éliminer son potentiel de contamination. Ainsi, on doit distinguer les déchets qui peuvent être recyclés (valorisation matière) de ceux qui doivent être (valorisation énergétique).

3.4.3. Traitement thermique

3.4.3.1. L'incinération (Maozhe Chen, 2012)

L'incinération correspond à un traitement thermique à haute température en présence d'un excès d'air.

Les résidus solides générés sont les cendres d'incinération et les résidus d'épuration des fumées. L'incinération détruit les parasites et détruit les microorganismes. Les matières résiduelles sont essentiellement minérales et doivent être gérées à l'issue de l'incinération. Elle permet de réduire le volume et la masse de la matière à éliminer.

3.3.4. Le traitement biologique (Benyoucef, 2013)

Le traitement biologique utilise des micro-organismes vivants pour décomposer des déchets organiques, CO₂, et simples substances inorganiques ou en substances organiques plus simples telles que des aldéhydes et des acides, il existe plusieurs traitements biologiques utilisés pour le traitement des déchets comme: traitements aérobies, traitements anaérobies... etc.

3.3.4.1. le compostage

Le compostage est un procédé biologique aérobie de dégradation et de valorisation de matière organique en un produit stabilisé et hygiénistes disposant des caractéristiques d'un terreau enrichi en composés humiques (Damien, 2006) .

Cette décomposition de la fraction organique fermentescible des déchets s'opère en présence d'air et par des micro-organismes aérobies (bactéries, champignons...) dans des conditions contrôlées : d'air, de température et d'humidité (Lebozec, 1994).

Le compostage est une pratique consistant à fabriquer du compost à partir de divers déchets végétaux (DUPRIEZ, 1987) .

3.3.4.2 La fermentation Alcoolique

3.3.4.3 Méthanisation (Boutouta., 2012)

La méthanisation, ou encore appelée «digestion anaérobie » est la transformation de la matière organique en biogaz, composé principalement de méthane (CH_4) et de gaz carbonique(CO_2), par un écosystème microbien complexe fonctionnant en absence d'oxygène.

En plus de ces produits, on peut trouver aussi sous forme de traces de l'azote (N_2), de l'hydrogène sulfuré (H_2S) et de l'ammoniac (NH_3) faisant intervenir essentiellement.

La méthanisation se produit naturellement dans les marais, les lacs, les intestins des animaux et de l'homme et de manière générale dans tous les écosystèmes où la matière organique se trouve en situation .La méthanisation encore peu réaliser dans les digesteurs aussi appelé réacteur à biogaz ou méthaniser qui sont assuré les condition opératoire de réalisation de la méthanisation.

4. Historique de la méthanisation (Gijzen, 2002)

L'utilisation de la digestion anaérobie pour le traitement des eaux usées et la stabilisation des déchets solides ne sont pas nouvelles du tout; elles sont utilisées depuis le 19^{ème} siècle. Dans les régions rurales de la Chine et de l'Inde, des constructions simples de réacteur ont été longtemps employées pour traiter les déchets animaux et agricoles dans le but principal de récupérer l'énergie pour faire cuire et allumer. La digestion anaérobie des boues des stations d'épuration, à grande échelle, employant une technologie de pointe a été présentée dans les années 1860 en France. Cependant, ce n'était qu'aux années 70 que le traitement anaérobie attiré plus d'attention en termes de recherche et développement technologique. Cet intérêt augmenté, à la suite de la prise de conscience environnementale accrue de la population.

En outre, à la fin des années 80, la Co-digestion traite un mélange de différents types de déchets, y compris les déchets d'animaux, les déchets alimentaires et les déchets organiques ménagers, ont été présentés dans plusieurs pays. Aujourd'hui, un nombre important de systèmes technologiques de digestion anaérobie est en service pour le traitement de différents types de substrats et le développement est encore en marche .

5. Mise en œuvre de la méthanisation (GWOGON, 2012)

A l'état naturel, on observe la production de biogaz dans les marais, les rizières ou dans le tube digestif des ruminants.

Le principe des unités de méthanisation est de recréer et d'optimiser ce phénomène dans des digesteurs puis de capter ce biogaz pour le valoriser énergétiquement. Cependant il est à noter que pour une bonne méthanisation, il faut effectuer un tri qui aboutit à la séparation des déchets (déchets dangereux, déchets valorisables, matières organiques) si la collecte sélective des déchets ménagers n'est pas réalisée. La mise en œuvre de la méthanisation en digesteur va dépendre de plusieurs paramètres, parmi les principaux nous retiendrons: le type de digesteur, la température, le pH, les substances inhibitrices, le mixage dans des proportions définies, le rapport C/N, le taux de charges organiques .

6. Etapes de la méthanisation (LACOUR, 2012)

Les étapes intermédiaires à la formation de méthane sont ici résumées pour faciliter la compréhension de l'ensemble du processus et un contrôle effectif de la mise en opération des digesteurs anaérobies.

Le figure 7 présente l'ensemble des voies métaboliques, avec leurs groupes de micro-organismes respectifs, en 3 étapes principales :

1. l'hydrolyse et acidogènes ;
2. l'acétogénèse ;
3. la méthanogénèse .

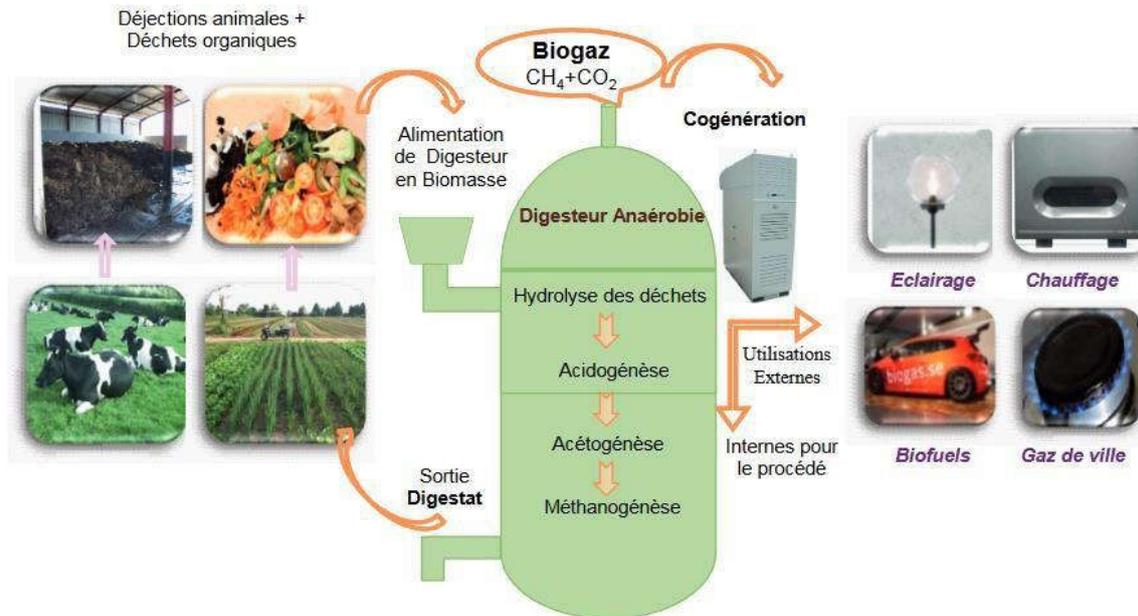


Figure [1] : Schéma simplifié des principales étapes de la digestion anaérobie.

La méthanisation des matières organiques s'effectue en quatre étapes principales sous l'action de différents groupes de micro-organismes.

6.1. L'hydrolyse (Salvador, 2005)

Cette phase concerne la dégradation de molécules organiques complexes en monomères. Les lipides se dégradent en acides gras et glycérols, les protéines se dégradent en acides aminés, en peptides et en chaînes courtes, les polysaccharides se dégradent en monosaccharides et disaccharides, la cellulose enfin se transforme en glucose et en saccharose.

6.2. L'acidogènes (Archer, 1990)

C'est la phase pendant laquelle les monomères sont transformés en acides gras volatils (AGV) tels que les acides formiques, acétique, propénoïque, butyrique, iso-butyrique, valérique et iso-valérique, et en alcool. Le gaz produit pendant la phase de la fermentation est très riche en dioxyde de carbone à 80% (CO₂) et une partie en hydrogène à 20% (H₂). Les bactéries acidogènes (*Clostridium*) sont très souvent anaérobies strictes ou facultatives.

Parmi les 4 étapes de la méthanisation, l'acidogènes est l'étape la plus rapide à cause du temps de multiplication des bactéries très court. La surcharge organique d'un réacteur

est souvent traduite par une accumulation d'intermédiaires tels que l'hydrogène et l'acétate pendant l'étape de l'acidogènes.

6.3. L'cétogenèse (Damien, 2006)

A ce niveau, les micro-organismes transforment les acides gras volatils et les alcools de l'étape précédente en hydrogène, gaz carbonique et acétates, sulfure d'hydrogène se forme également lors de cette phase de transformation.

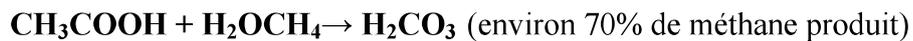
6.4. La méthanogènes(Damien, 2004).

Elle représente la dernière étape de la méthanisation ou le méthane apparait. Les bactéries méthanogènes interviennent pour élaborer le méthane à partir de l'hydrogène, du gaz carbonique et des acétates suivants les deux réactions suivantes

1- De réduction du CO₂ :



2- De décarboxylation de l'acide acétique :



C'est le processus de méthanisation qui se résume en quatre grandes phases se déroulant en même temps dans le méthaniser : l'hydrolyse, l'acidogènes, l'cétogenèse et la méthanogènes.

Celui-ci doit être régulièrement contrôlé, car de nombreux paramètres doivent être réunis pour assurer une transformation optimale de la matière organique (température, pH, taux de charge organique, nutriments, mixage...) ; un équilibre doit être maintenu continuellement par l'exploitant au sein de cette chaîne de dégradation .

7. Les paramètres influençant la méthanisation (Kherboucuhe, 2005).

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

7.1. pH (Kaidi, 2013)

Le pH est un paramètre essentiel car l'écosystème de la digestion anaérobie. En particulier les organismes méthanogène, est sensible à la variation de pH. Celui-ci à également un effet indirect sur le fonctionnement du système par la modification des équilibres chimiques des acides et des bases faible, notamment les AGV, le sulfure

d'hydrogène et l'ammonium dont les formes non ionisées peuvent inhiber la méthanisation. Il est donc important de suivre le pH et, si nécessaire, de l'ajuster dans l'alimentation ou de le réguler automatiquement dans le digesteur.

Le pH optimum de la méthanisation se situe autour de la neutralité, entre 6.5 et 8.5.

Un élément important pour le maintien du pH est l'alcalinité du digesteur .

7.2. La température (Kaidi, 2013) .

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

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

➤ Psychrophile à basse température 5°C à 25°C

Utilisée normalement dans les méthaniser fonctionnant à la température ambiante. Cette technique exige des longs temps de rétention, c'est la raison pour laquelle elle n'est plus utilisée en Europe.

➤ 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 méthaniser.

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 .

Les avantages d'un régime thermophile par rapport à un régime mésophile sont une réduction du temps de séjour du procédé, une destruction des microorganismes pathogènes, une augmentation de la solubilité et de l'accessibilité des substrats. Les inconvénients sont une dépense énergétique importante pour le maintien de la température à 55°C, un

potentiel d'instabilité plus élevé avec notamment un risque d'inhibition par l'ammoniac plus important.

Tableau 1: Comparaison de la digestion en condition thermophile et mésophile.

Critère	Digestion mésophile	Digestion thermophile
Charge organique	Faible	Elevée
Destruction des pathogènes	Faible	Elevée
Sensibilité aux composés toxique	Faible	Elevée
Sensibilité aux changements de T°	Inférieure	Supérieure
Vitesse réactionnelle	Inférieures	Supérieure
Coûts opérationnels	Faible	Elevés
Maintien de la température	Moyenne difficile	Difficile

7.3. L'absence d'oxygène (Marache, 2001)

L'oxygène est évidemment un inhibant (réaction anaérobie), cependant une petite quantité d'oxygène n'inhibe pas totalement et immédiatement la production de biogaz.

En effet, certains groupes de bactéries, appelées anaérobies facultatives, peuvent tolérer et absorber une petite quantité d'oxygène évitant ainsi d'inhiber les autres groupes de bactéries ne tolérant pas du tout l'oxygène (bactéries anaérobies strictes).

L'absence de l'oxygène est une condition pour le développement des bactéries méthanogènes, qui sont anaérobies strictes .

7.4. Rapport C /N

Comme pour la digestion aérobie, la proportion entre le carbone et l'azote présents dans la matière organique est importante pour le bon fonctionnement des réacteurs, des études indiquent que la proportion désirable se situe entre 20 et 30, 25 étant le ratio idéal (Ostrem, 2004).

Une augmentation de l'apport en azote peut mener à une production accrue d'ammoniac, ce qui peut nuire aux microorganismes et inactiver la méthanisation (Zhang, 2008).

7.5.Brassage

Le brassage du digesteur n'est pas essentiel pour que la digestion anaérobie se déroule. Cependant, il permet l'obtention d'un milieu homogène, c'est un moyen de favoriser les transferts thermiques, ioniques et métaboliques (Balk, 2002).

Il permet aussi une augmentation des contacts entre les substrats à digérer et la flore fixée et évite les courts circuits dans le réacteur, un court-circuit correspond à la sortie prématurée d'une partie du substrat de la cuve car celle-ci ne suit pas le parcours habituel, l'effluent ne subit pas donc la méthanisation totale (Balk, 2002).

Le brassage se fait à l'aide d'un agitateur mécanique, ou d'un système hydraulique par la recirculation de la boue ou réinjection du gaz produit (Björnsson, 2001).

7.6. Pression partielle en hydrogène (Schink, 2002)

L'hydrolyse est une étape clé dans le processus de la digestion anaérobie, c'est un substrat indispensable et énergétique pour les bactéries méthanogènes.

Il est produit lors de l'acétogénèse à partir des produits de l'acidogènes (AGV), cette faible pression partielle est assurée par les bactéries homoacétogène et hydrogénophiles qui consomment H_2 au fur et à mesure de sa production.

7.7. L'absence des inhibiteurs (Boutouta., 2012)

La fermentation anaérobie est réputée pour sa sensibilité aux matières toxiques et particulièrement la phase méthanogène, qui est encore plus sensible.

Ces éléments inhibiteurs sont présents dans le substrat lui-même, ou produits lors de la digestion, parmi eux on peut citer.

a- Oxydants

Les oxydants sont des inhibiteurs à cause de leurs grands rôles dans la régulation du potentiel redox. Comme les bactéries méthanogènes exigent de bas potentiels redox, on limite au minimum l'apport de substances oxydantes telles que les nitrates, les nitrites et évidemment l'oxygène (Addou, mai 2009).

b- Ammoniaque

L'ammoniaque est considéré comme un inhibiteur ayant un effet toxique sur les microorganismes de la digestion anaérobie et notamment des méthanogènes acétoclastes.

L'ammoniaque est souvent rencontré dans les supports ayant un fort taux de protéines, il se forme rapidement dans le digesteur, par biodégradation des constituants protéiques et au-delà de 2 à 3 g/l, il devient toxique et inhibiteur pour les micro-organismes méthanogènes (Dahou, 2010).

D'après **Anderson et al.**, l'ammoniaque libre a été reconnu plus toxique que l'ion ammonium (CH_4^+). En générale, les taux d'ammoniac CH_4 libre devraient être maintenus en dessous de 80 ppm pour éviter l'inhibition. Il a été montré par l'ensemble des études faites par **Carty;Ficher et al. Hart, Schmid et Lipper**, qu'une très forte concentration de l'ordre de 1500 à 3000 ppm en ion ammonium est tolérable.

c- Les acides gras volatiles(AGV) (DERBAL, 2009).

L'accumulation des acides gras volatils (AGV) pendant le déséquilibre du processus reflète directement un désaccouplement cinétique entre les producteurs et les consommateurs acides.

La concentration d'AGV a été plus suggérée pour le contrôle et la surveillance du digesteur anaérobie, dans un système faiblement protégé, le pH, l'alcalinité partielle et les mesures d'AGV sont utiles pour le contrôle de processus tandis que dans le système à pouvoir tampon élevé (fortement protégé), l'AGV est fiable pour indiquer le déséquilibre de processus. Cependant, plusieurs études ont précisé que l'AGV individuel peut fournir une information plus importante comme avertissement à têt avant l'échec de processus.

d- Métaux lourds

Certains d'entre eux sont toxiques pour les organismes anaérobies, même à de faibles concentrations.

Les métaux lourds bloquent le métabolisme et tuent les organismes en inactivant le groupe d'enzymes à savoir les sulfhydryles par formation de mercaptides. Par contre il est possible d'éliminer les produits toxiques du support nutritif ou de les diluer jusqu'à passer en dessous du seuil de toxicité (Boutouta, 2012).

e- Cations

Les cations eux aussi présenteraient une toxicité à une certaine concentration vis-à-vis de la méthanisation en se liant aux acides gras volatils. Le tableau suivant montre l'effet des ions (Marache, 2001).

Tableau 2: Concentrations en ions provenant la stimulation ou l'inhibition de la Méthanisation (Marache, 2001).

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

7.8 .Temps de rétention hydraulique (TRH) (Hu, 2014)

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

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

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

Tableau3: Différents exemples de TRH suivant le procédé de digestions

(Hu, 2014)

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

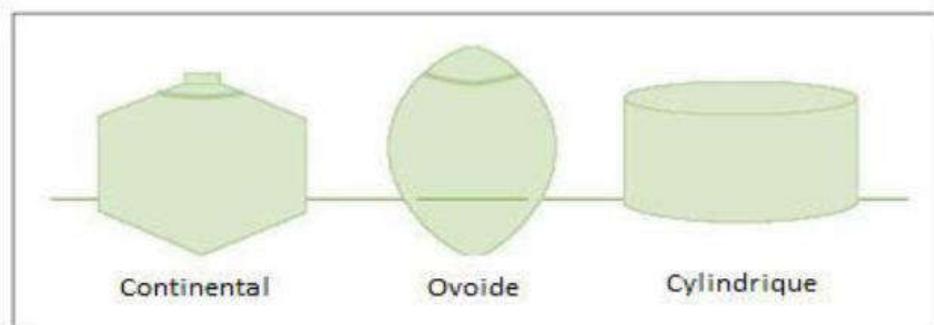
8. Les digesteurs

8.1. Définition (Boutouta., 2012)

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.

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

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

**Figure 2 :** Différentes formes de digesteurs (Boutouta, 2012).

8.2. Classifications des différents types de digesteurs

8.2.1. Mode de l'alimentation (Marache, 2001)

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

8.2.2. les digesteurs discontinus (Marache, 2001)

La cuve de fermentation est chargée, dans les réacteurs discontinus, en une seule fois, avant la fermentation et est déchargée, comme celle-ci est finie. Les substrats peuvent être immergés ou non. Une pré fermentation aérobie est effectuée pendant quelques jours, afin de dégrader les molécules peu polymérisées, qui peuvent acidifier le milieu.

C'est un procédé utilisé, surtout, pour un substrat tel que des fûmes pailleux ou des ordures ménagères.

a. Des exemples de réacteurs discontinus

➤ **Le procédé de Ducellier-Isman** (Marache, 2001)

Ce digesteur est composé d'une cuve de 10 à 50 m³ avec une cloche servant de gazomètre au-dessus. L'étanchéité est assurée par l'eau qui sert de joints gazeux. La présence d'eau entre le couvercle et le corps de la cuve forme un joint hydraulique, empêchant le gaz s'échapper. Une étape initiale de fermentation aérobie de 4 à 7 jours est nécessaire pour faire monter la température et éviter l'acidification du milieu. La fermentation aérobie produit du biogaz pendant deux mois avec une moyenne de 0.17 m³/jour.

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

➤ **Les réacteurs non immergés avec recirculation des liquides**

C'est une amélioration du procédé Ducellier-Isman. Cette amélioration est obtenue par un arrosage séquentiel de la masse en fermentation (voir la figure 3) qui représente un exemple de digesteur discontinu développé par le center internationale de l'énergie et de l'hydraulique (Burkina-Faso) (Marache, 2001).

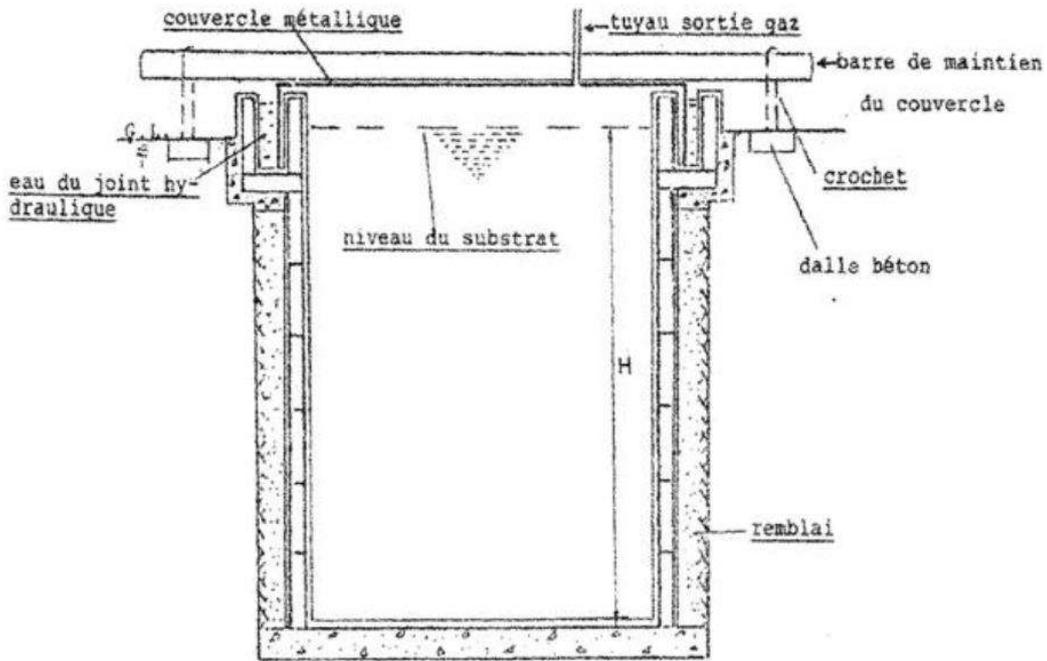


Figure 3: Représente un exemple de digesteur discontinu développé par le centre internationale de l'énergie et de l'hydraulique (Burkina-Faso), (Marache, 2001).

8.2.3. Les digesteurs continus

Les réacteurs continus sont réalimentés quotidiennement avec une quantité spécifique de substrat. Cette introduction est accompagnée par la vidange d'un volume égale d'effluent. Ce procédé réclame des conditions de fonctionnement plus précis que pour les réacteurs discontinus. Il faut une alimentation régulière, un contrôle de pH, de la température et un brassage, si nécessaire (Marache, 2001).

Exemples de digesteur continus

➤ Les réacteurs de type chinois

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

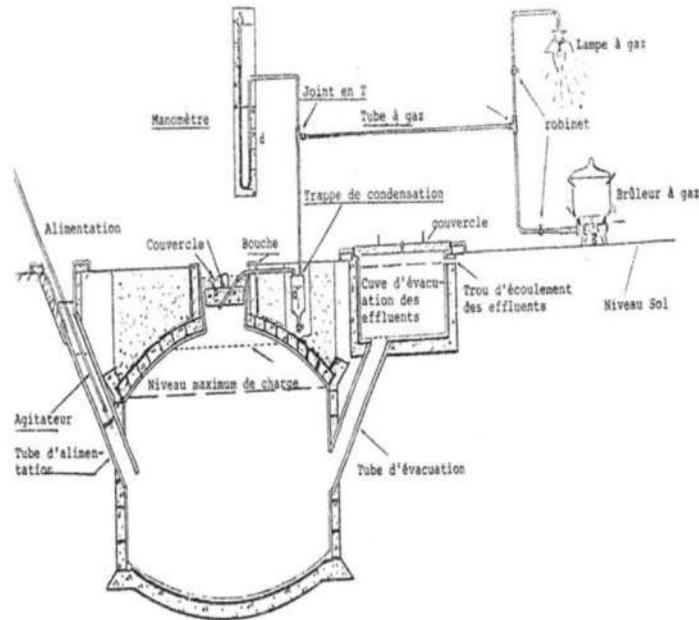


Figure 4 : Une installation de bio-digester type chinois (Marache, 2001).

➤ Les réacteurs homogènes

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

Les temps de séjour dans les réacteurs homogènes sont de l'ordre de l'heure. Il faut donc, pour retenir les micro-organismes dans les réacteurs, penser à des mécanismes comme la formation de granules, la décantation, la fixation sur un support (Marache, 2001).

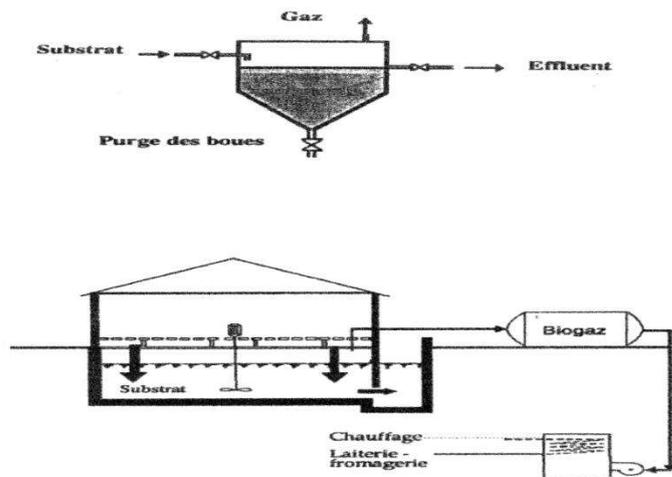


Figure 5: Principe d'un réacteur homogène et exemple d'une installation (Marache, 2001).

8.2.4. Classification selon le nombre d'étapes

Selon les phases méthanogènes et l'acidogènes se déroulent dans le même réacteur ou dans deux cuves séparées (**Hamed, 2014**).

8.2.4.1 Le procédé en mono-étape (Chen, 2014)

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

Exemple de schéma de principe du digesteur à cellules (fermentation discontinue).

8.2.4.2 Le procédé en bi-étape

Ce type de digesteur sépare la phase d'hydrolyse et l'acidogènes dans une première étape, et la méthanogènes dans une seconde étape (**Chen, 2014**).

La recirculation de la phase liquide présente l'avantage de ne pas nécessiter constamment l'ajout d'eau réchauffée (**Hamedi, 2014**).

La technologie à deux étapes peut être utilisée aussi pour méthaniser des déchets solides, dans le réacteur d'acidogènes on réalise une hydrolyse et une acidogènes, ce qui liquéfie la matière organique solide et la transforme en AGV, et dans le second on a la méthanisation de ce lixiviations (**Saidi, 2007**).

Donc, L'avantage des procédés bi-étape réside dans le fait que la décomposition de la matière solide est de l'ordre de quelques jours. Cette séparation des phases, réduit le risque d'intoxication des cellules méthanogènes liée à la présence des acides gras volatils lorsque l'étape d'acidogènes n'est pas complètement terminée, (**Hamedi, 2014**).

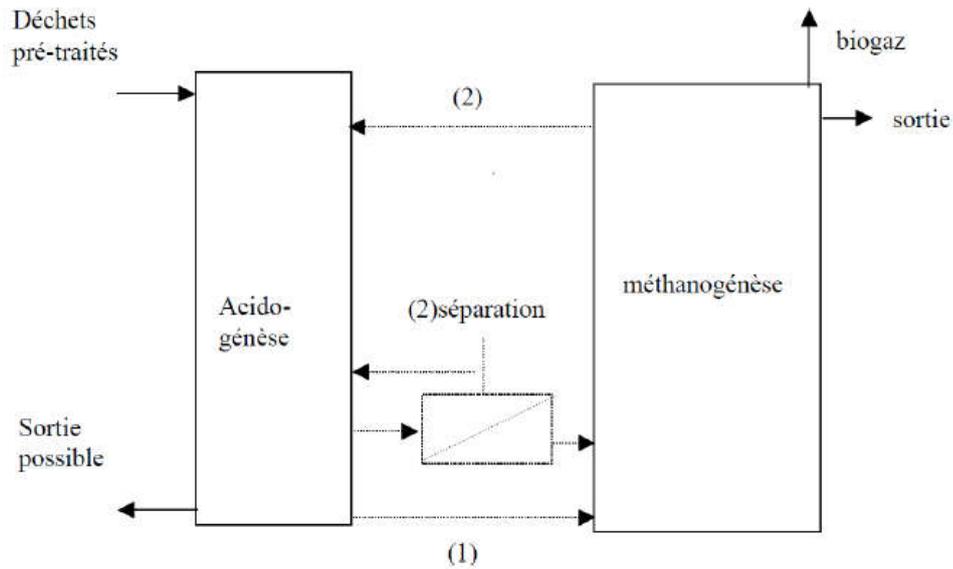


Figure 6 : Stratégies de mise en œuvre de la digestion anaérobie en deux étapes : (1) couplage direct, (2) séparation des liquides et des solides avec recirculation du lixiviat purifié. (Chen, 2014).

9. Avantages et les inconvénients de la digestion anaérobie (Chen, 2014)

Les avantages de la digestion anaérobie sont :

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

Cependant, elle comporte aussi quelques inconvénients :

- Une forte sensibilité aux variations de charges et aux composés toxiques ;

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

10. Biogaz

10.1. Définition et composition (Moletta, 2002)

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).

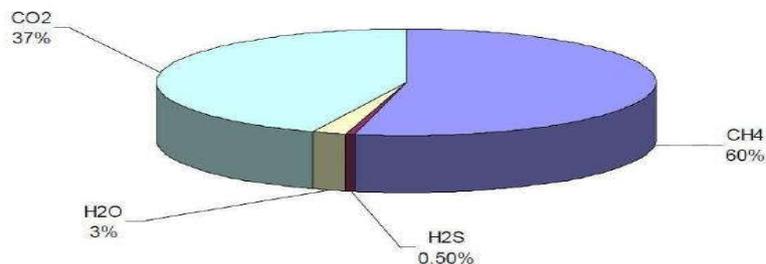


Figure7: Composition du biogaz des déchets des bovins (en % volumique) .

L'énergie du biogaz provient uniquement du méthane: le biogaz est ainsi la forme renouvelable de l'énergie fossile qu'est le gaz naturel. Ce dernier contient essentiellement

du méthane mais aussi du butane, du propane et d'autres éléments. Comme il est indivis dans les facteurs influençant la méthanisation, il y a ces trois intervalles de température qui assurent la production de biogaz (**Laskri, 2007**) et la quantité de biogaz produit change en fonction de ces températures :

- de 10 à 25°C : psychrophile (**Claire, 2011**) ;
- de 25 à 45°C : mésophile (**Bouallagui, 2003**) ;
- de 45 à 65°C : thermophile (**Kashyap, 2003**) .

Le tableau 4 suivants montre la composition caractéristique du biogaz qui varie suivant son origine (composition des déchets organiques, modes de production, etc.) (**Bouallagui, 2003**).

Tableau.4 : Composition caractéristique des biogaz en fonction des substrats et des procédés de production OM / STEP / ISDND / (Kashyap, 2003) .

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

10.2. Historique (Ferdjellah, 2017)

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

En 1630, Von Helmont a constaté que des gaz inflammables pourraient évoluer de la décomposition de matières organiques et dans les notes de Shirley 1667 ses conclusions sur le

biogaz alors le nom de gaz des marais.

On dit que Marco Polo a écrit sur couverte réservoirs d'eaux usées en Chine, mais on ne sait pas si ils ont capture le gaz et l'a utilisé.

Certaines sources indique également des Assyriens et des Perses d'utiliser ce gaz pour chauffer l'eau du bain dans l'Antiquité.

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

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

1895- Le biogaz est utilisé pour illuminer les rues à Exeter, en Angleterre.

1940 - le développement du biogaz et des applications sommeillent jusqu'a ce que les pénuries d'énergie de la Deuxième Guerre mondiale. La guerre oblige les gens à considérer les sources d'énergie alternatives à nouveau.

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

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

10.3. Ressources de biogaz (Héteu, 2003)

Les ressources de biogaz sont variées, les déchets organique sont la première source, ces déchets regroupent les déchets urbains et industriels, déchets d'agriculture, ainsi que les déjections animales. La quantité et la composition chimique du biogaz produit en fermenteur dépendent du substrat, de sa DCO, du débit d'alimentation du digesteur, de la qualité de l'agitation, du temps de séjour dans le réacteur, de la température de fermentation, l'homogénéité et la granulométrie du substrat... etc.

10.4. Valeur énergétique

Le méthane brûlé avec une flamme bleue, lorsque sa combustion est complète. Celle-ci s'accompagne d'un fort dégagement de chaleur. Dans ces conditions, 1 m³ de méthane peut atteindre en brûlant une température de 1400 °C et dégage une quantité de chaleur de 8500 à 9500 kcal, à titre indicatif, 1 m³ de biogaz, contenant 70% de méthane et de 30% de gaz carbonique, libère par combustion environ 6000 Kcal (**Li et al., 2013**).

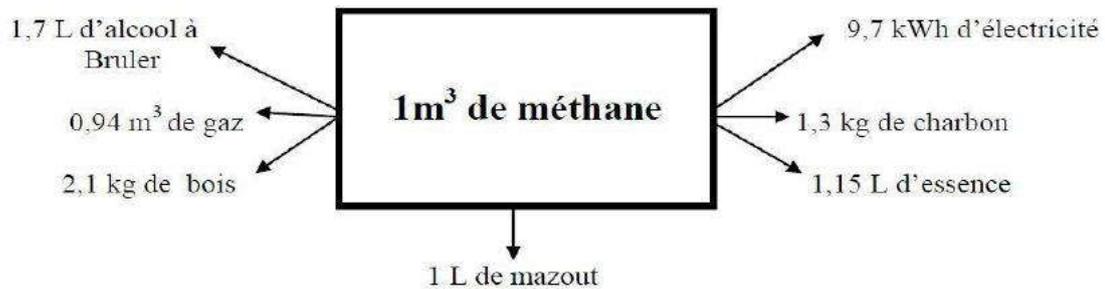


Figure 8: Equivalences énergétiques de 1 m³ de méthane (**Hamed, 2014**).

La variabilité de la quantité du gaz suivant le substrat fermenté est important : De 55% à 75% de CH₄. Sur une installation donnée, en l'absence d'accident de fermentation, la composition du biogaz est stable (**OCDE, 2008**).

10.5. Purification du biogaz

La purification du biogaz nécessite un traitement qui consiste à éliminer les composés toxiques et corrosifs (H₂O, H₂S, CO₂). Ensuite Le biogaz produit passer a l'étapes de purification. Cette dernière permet :

- D'améliorer le pouvoir calorifique ;
- De diminuer le volume de stockage ;
- De supprimer l'effet corrosif et les mauvaises odeurs dus à la présence de l H₂S.

Le procédé le plus efficace pour éliminer l'H₂S est le passage du biogaz dans un filtre composé de limailles de fer (oxyde de fer).

Le filtre est placé sur la conduite de gaz. Pour l'élimination de CO₂, il faut faire barboter le biogaz dans une solution de chaux qui fixera le gaz carbonique (**Hamed, 2014**).

Pour éliminer l'eau on applique des techniques de condensations pour piéger les gouttelettes ou de séchage la vapeur d'eau (refroidissement et piégeage de l'eau, adsorption sur des produits de type silice-gel, séchage au glycol ... etc.) (**Ahring, 1994**).

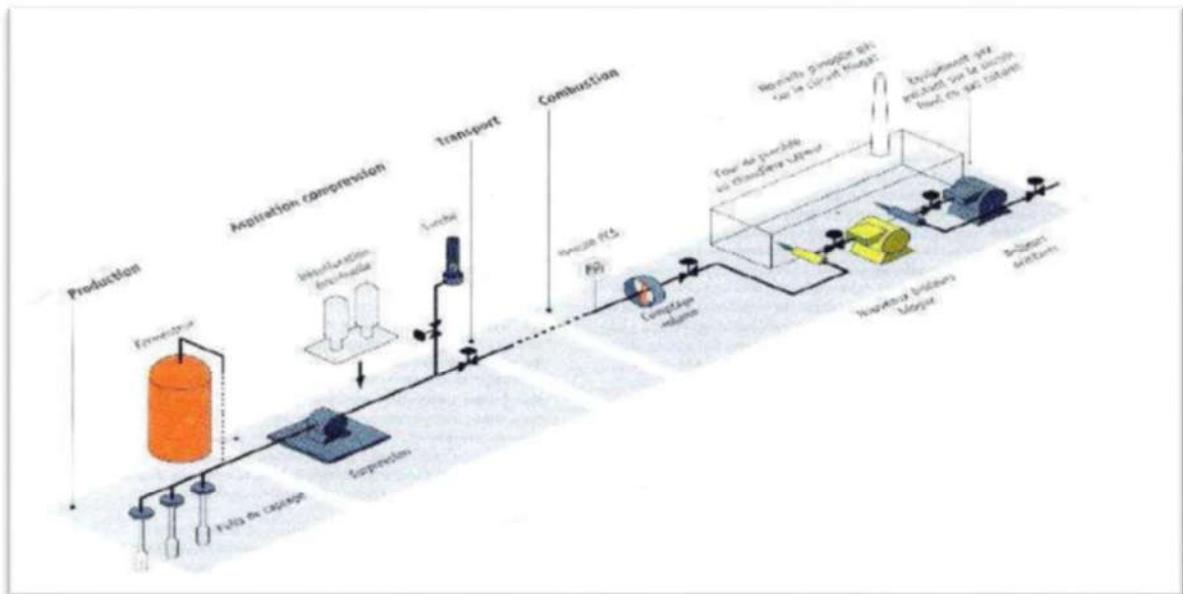
Tableau 5: Les différents composés et leurs techniques d'élimination (LI et al.,2003).

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

10.6. Valorisation de biogaz :

10.6.1. Valorisation thermique en chaudière (Chaslerie, 2002).

La combustion directe du biogaz pour produire de la chaleur (eau chaude ou air chaud) est la solution la plus facile à mettre en œuvre et la moins exigeante en termes de qualité du biogaz. Il est aisé d'adapter des chaudières au gaz naturel pour qu'elles puissent fonctionner avec du biogaz. Les modifications à apporter concernent essentiellement le brûleur pour quel le système d'admission doit être agrandi et la prise d'air diminuée afin d'abaisser le rapport air/carburant. Le rendement typique de ces installations est de l'ordre de 90%.

**Figure 9 :** Valorisation thermique du biogaz (Chaslerie, 2002).

10.6.2. Valorisation électrique du biogaz (Chaslerie, 2002).

Lorsque le centre d'enfouissement technique ou les fermenteurs ne sont pas situés à proximité d'un industriel et lorsque les besoins thermiques locaux sont négligeables en regard de l'énergie biogaz disponible, une source de valorisation possible est la production d'électricité à partir d'un moteur ou d'une turbine à gaz qui entraînent un alternateur, avec autoconsommation locale ou revente partielle du surplus à l'opérateur local chargé de commercialiser l'électricité. Le rendement de ces installations reste tout de même faible de l'ordre de 35%.

10.6.3. Valorisation en carburant automobile (Moletta., 2006)

Pour cette application, les spécifications de pureté du gaz sont très sévères, puisque le biogaz utilisable comme carburant doit contenir un minimum de 96 % de méthane. Il faut en outre que le point de rosée soit inférieur à -20°C (ce qui correspond à une teneur en eau inférieure à 15 mg/m^3), que la teneur en H_2S soit inférieure à 100 mg/m^3 , et que la teneur en hydrocarbures liquides soit inférieure à 1 %, avec une taille de poussières limitée à 40 microns.

10.6.4. Valorisation par injection dans le réseau de gaz de ville (Angélique, 2011).

Il peut aussi être injecté sur le réseau de gaz naturel. C'est la solution qui offre le meilleur rendement énergétique, si le réseau est assez proche du point de production. Le gaz injecté doit être odorisé et subir un certain nombre de prétraitements pour éliminer le CO_2 , H_2S , O_2 , H_2O et les composés halogènes .

11. Substrat (Angélique, 2011)

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

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

11.1. Les effluents d'élevage

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

Les élevages de porcs sont producteurs d'un déchet mixte, mélange d'urines et de fèces: le lisier, qui est produit toute l'année dans des élevages aux forts effectifs d'animaux rassemblés, essentiellement dans des bâtiments de faibles surfaces. Le lisier est aisément stockable et manutentionnable. Les élevages d'ovins sont moins concernés. Les ovins sont essentiellement des animaux de plein air et leurs passages en bergeries n'ont pas l'intensité des stationnements des porcs ou des vaches laitières dans leurs bâtiments spécialisés.

11.2. Les eaux usées urbaines (Mottet A. , 2009)

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

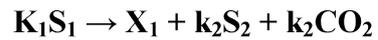
11.3. Les déchets agro-alimentaires (Bertan, 1995.)

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

11.4. les ordures ménagères (Mottet A. , 2009)

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

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

Acidogènes

Avec une vitesse de réaction

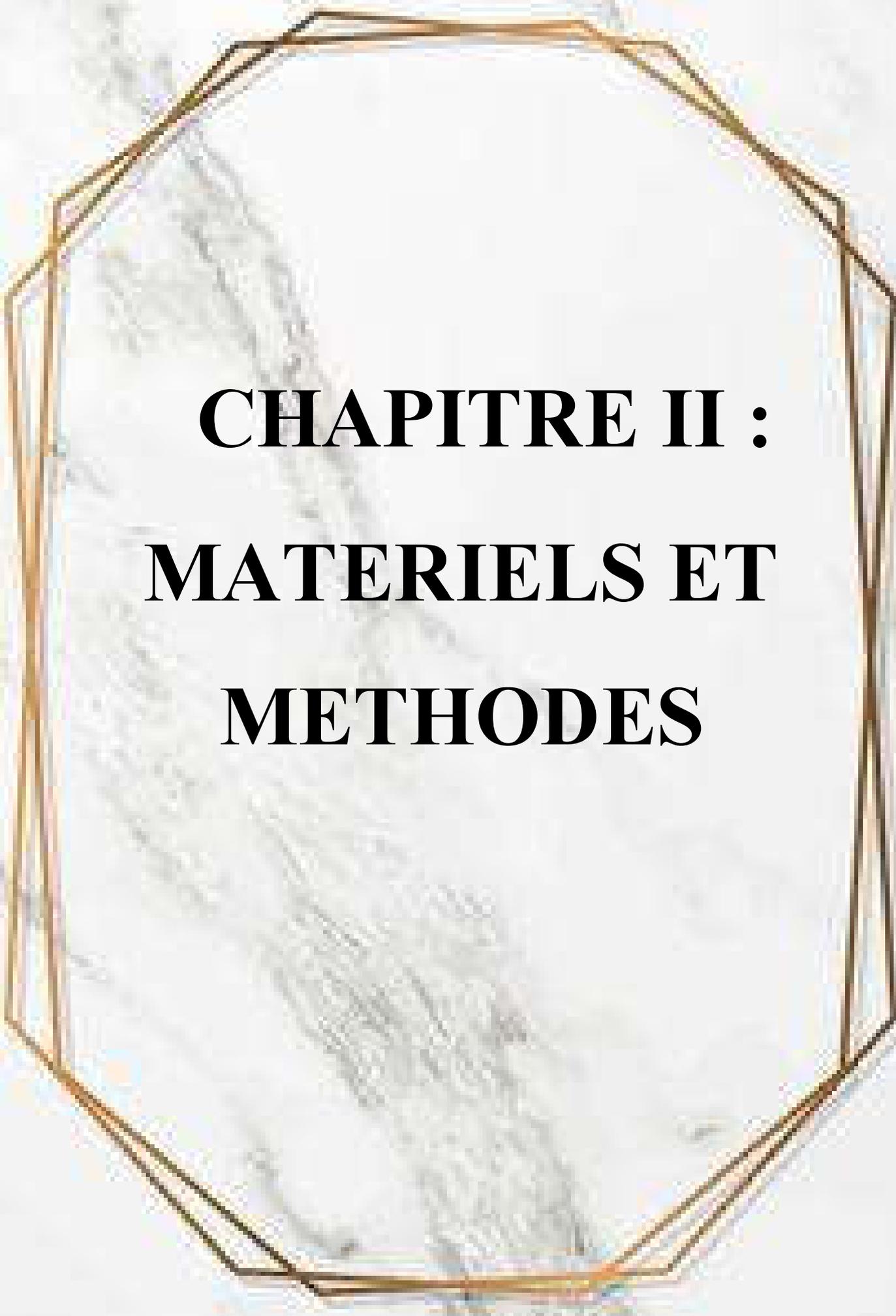
$$r_1 = u_1(S_1)X_1 \text{ telle que } u_1(S_1)$$

est le taux de croissance spécifique de X_1 sur S_1 .

Méthanogènes :

Avec une vitesse de réaction :

$$r_2 = u_2(S_2)X_2 \text{ telle que } u_2(S_2)$$



CHAPITRE II :
MATERIELS ET
METHODES

Chapitre II: Matériels et méthodes

1. Le substrat utilisé

1.1 La boues (Tahri, 2014).

Est le produit finale le plus importants des stations des traitements des l'eau usées , dans les pays développés et en développement , la quantité des boues est en hausse en parallèlement avec l'augmentation du volume d'eaux usées traitées , et comme les autres déchets .



photo 1 : La boues utilisé .

1.2 Le déchet l'abattoir

Le substrat étudié est constitué de l'ensemble des déchets et sous produits engendrés par l'activité des abattoirs, de façon qualitative et quantitative.

Le substrat sélectionné est composé de déchets de contenus de panses (Vavilin, 1996).

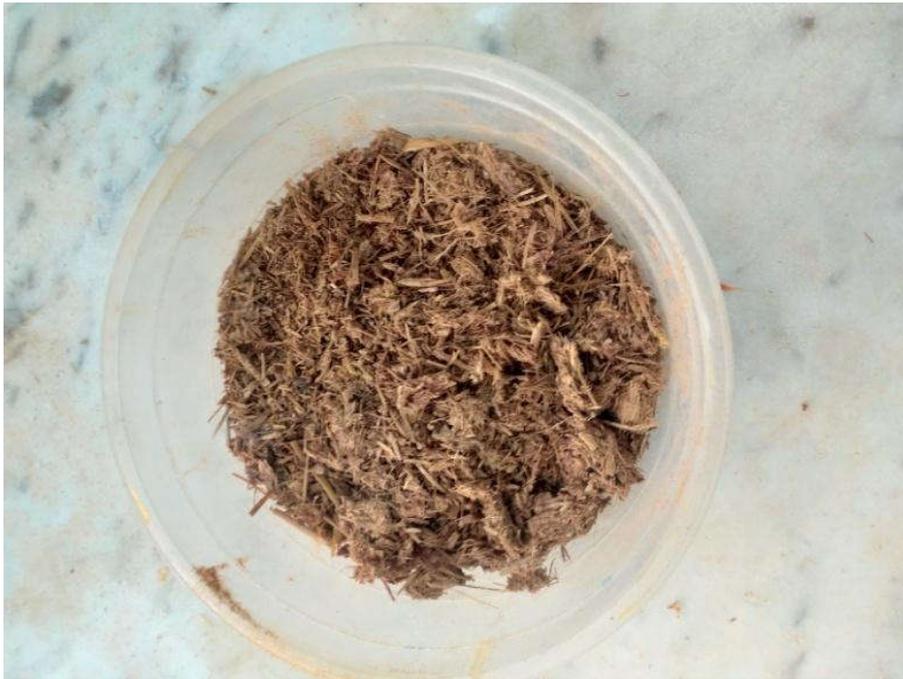


Photo 2 : Le déchet l'abattoir utilise.

2. Description du digesteur

Les essais ont été réalisés dans des digesteurs de type discontinu (Batch), ces digesteurs en verre, très simple (Photo .3), permettant d'assurer l'anaérobiose de milieu de culture. Les réacteurs ont muni de deux trous, le premier pour le prélèvement des échantillons liquides à l'aide d'une seringue, et l'autre pour assurer l'échappement du gaz pour la mesure du volume de biogaz produit. Le volume total de chaque digesteur est de 1 litre avec un volume utile de 800 ml.

Nous avons laissé un petit volume au-dessus du niveau du liquide pour protéger la sortie de gaz et maintenir l'anaérobiose. Le digesteur utilisé est alimenté avec les déchets, la concentration du substrat est de l'ordre de 9 g MO.

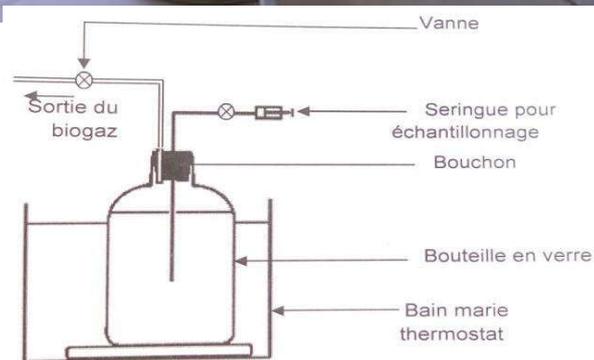
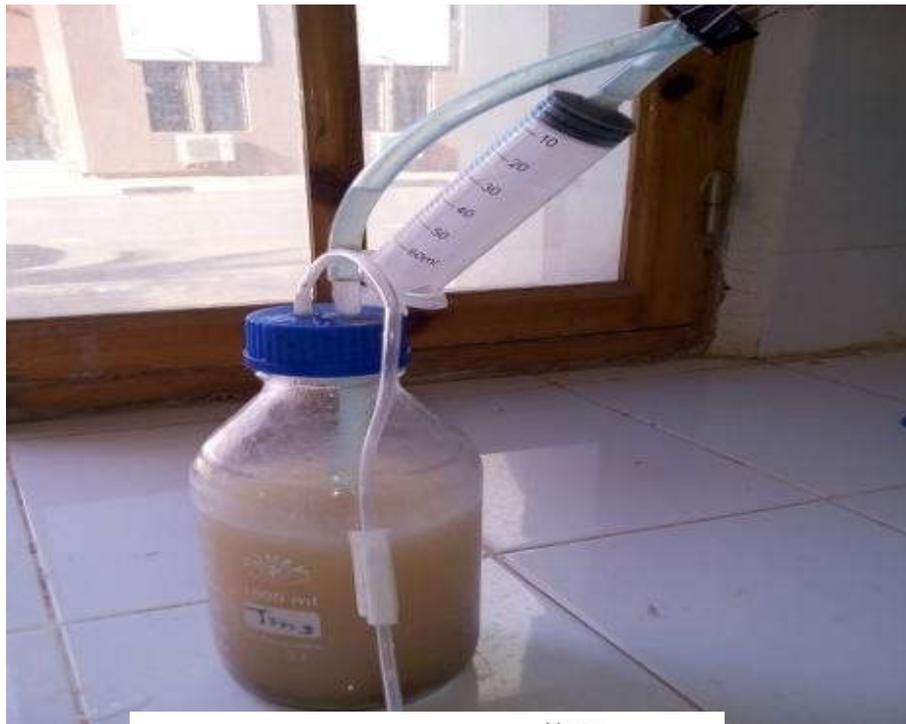


Photo 3 : Photo et schéma du digesteur en verre au niveau de laboratoire.

3. La détermination du pH :

a) Matériels utilisés (Lamir, 2019/2020).

- pH-mètre ;
- bécher.



Photo 4 : pH-mètre.

b) Méthode

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

4 .Caractéristique de déchet:

4.1 Détermination de la matière sèche (MS)

a) Matériels utilisés

- Etuve réglée à 105°C ;
- Creusets ;
- Dessiccateur ;

- Spatule ;
- Balance électronique de précision .

b) Méthode

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

Pour déterminer la matière sèche, une prise d'échantillon de masse 3g, soit (M_1), est versée dans un creuset de masse connue soit (M) préalablement nettoyée et séchée, ensuite l'ensemble est placé dans une étuve à 105 °C pendant 2 heures et en calcul le poids, on répète ce processus jusqu'à ce que nous obtenions un poids d'échantillon stable. Les creusets ont été pesés après refroidissement dans un dessiccateur.

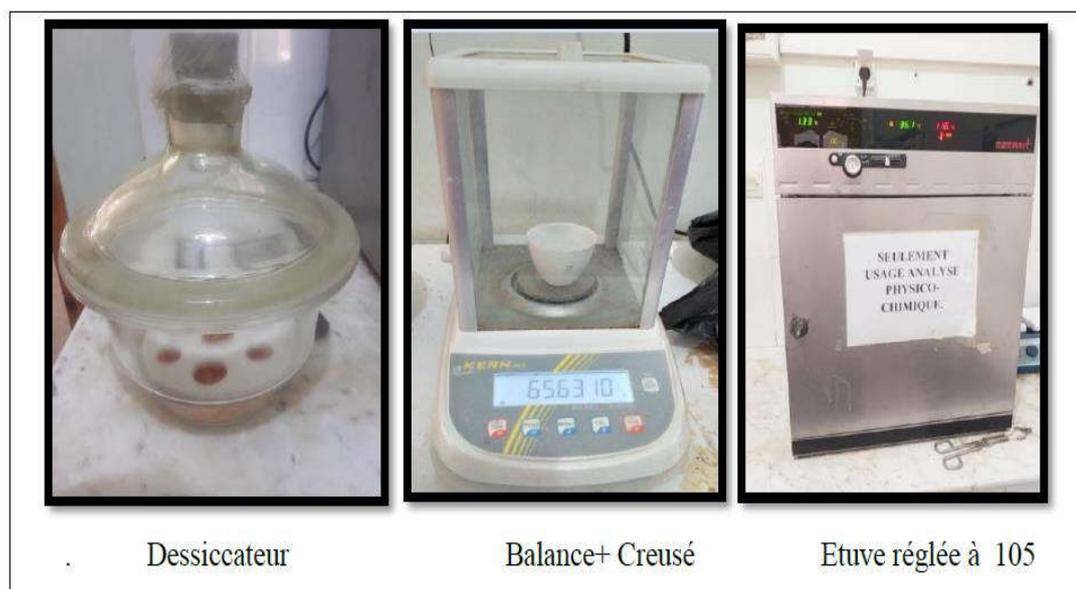


Photo 5 : Matériels utilisés pour détermination la matière sèche.



Photo 6 :La matière sèche s'obtient selon la méthode de Michaud

La matière sèche s'obtient selon la méthode de Michaud (Kalloum, 2006).

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

Avec :

M : masse de la creusé ;

M₁ : masse de l'échantillon avant dessiccation ;

M₂ : masse de l'échantillon après dessiccation ;

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

$$d'humidité \% = 100 - MS\%$$

4.2-Détermination de la teneur en matière organique (MO)

a) Matériels utilisés

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

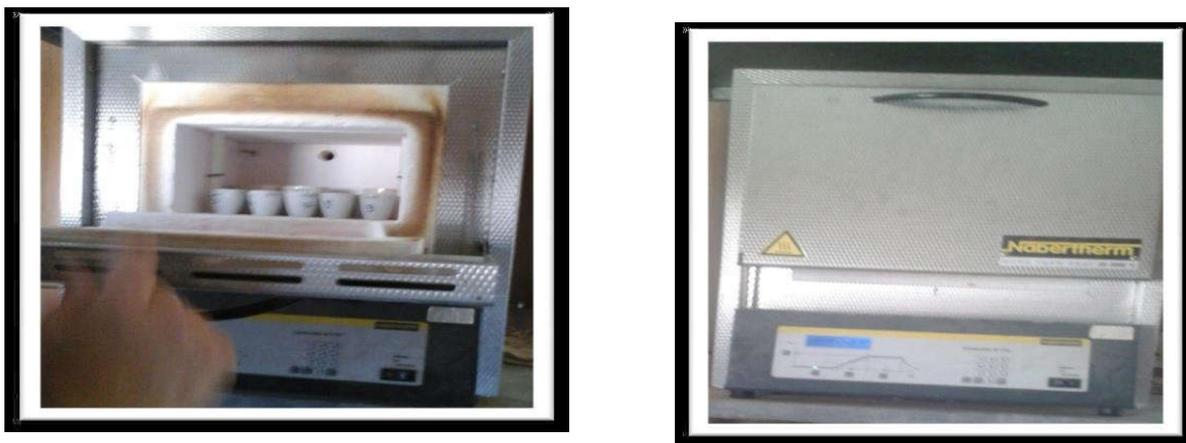


Photo 7: Le four à moufle utilisé.

Le calcul de MO, s'obtient selon la méthode de Michaud (Bastone, 2002).

b) Méthode utilisée

Pour déterminer la teneur en matière organique (MO), la masse (M_2) de

l'échantillon après dessiccation, est introduite dans une creusé préalablement nettoyée et séchée ayant une masse (M), l'ensemble est placé dans un four à moufle pour une calcination à 550 °C pendant 5 heures. Après refroidissement les creusés contenant la matière minérale (Kalloum, 2006).



Photo 8: Substrat après calcination.

c) Les calculs :

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

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

M2 : la masse après la dessiccation ;

M3 : la masse après calcination .

5. Détermination du volume du biogaz et CH₄ :

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

a) Matériels

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

b) Solutions

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

c) Méthode:

Le volume des biogaz produits (4) est mesuré par la méthode du liquide déplacé dans l'éprouvette inversé (2) avec une solution saturée (NaCl 10g/l pH=2) (3) afin de réduire au maximum la dissolution de CO₂; après la quantification le biogaz est pomper(5) dans une solution de NaOH (3M/l) (6) pour l'élimination de CO₂, en fin en obtenons un méthane

pure(7), en le quantifier par la même méthode (Str et al., 2017)Figure 10.

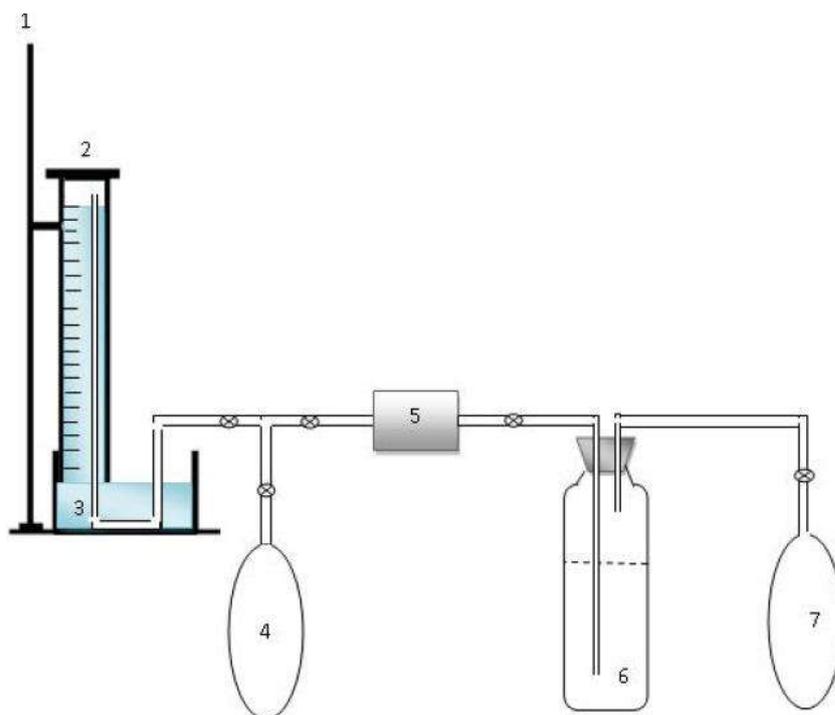


Figure 10: Schéma représentatif de système de mesure du volume du biogaz et de CH_4 produit (Test de potentiel méthanogène ou BMP), (TAHRI, 2019).

- (1) Statif ;
- (2) Éprouvette graduée inversée ;
- (3) Solution saturée (NaCl 10g/l pH=2) ;
- (4) Biogaz non filtré ;
- (5) Pompe à vide ;
- (6) Filtration de CO_2 (solution de NaOH (3M/l)) ;
- (7) Biogaz filtré .

6. Détermination de la DCO (Ferdjellah, 2017)

C'est la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder chimiquement lors de la dégradation chimique d'une quantité de matière organique, cette mesure traduit leurs teneurs et le degré de la pollution.

La DCO est l'unité de mesure de pollution carbonée la plus utilisée en modélisation des procédés biologiques car elle permet de faire des bilans de matière regroupant des produits organiques biodégradables et non biodégradables.

a) Matériels utilisés

- Centrifugeuse ;

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

b) Méthode :

Ce dosage est réalisé par l'emploi de la méthode au bichromate de potassium. Cette méthode analytique est adaptée pour le dosage de la DCO dans la gamme de mesure va de 30 mg/L à 700 mg/L pour des échantillons non dilués. Les valeurs de la DCO de notre échantillon sont plus élevées que ces valeurs, pour cela toutes les mesures de la DCO sont réalisées sur des échantillons dilués. On note DCO_S la demande chimique en oxygène soluble obtenu après centrifugation de l'échantillon et DCO_T la demande chimique en oxygène totale obtenu après l'homogénéisation.



Photo 9 : La centrifugation.

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

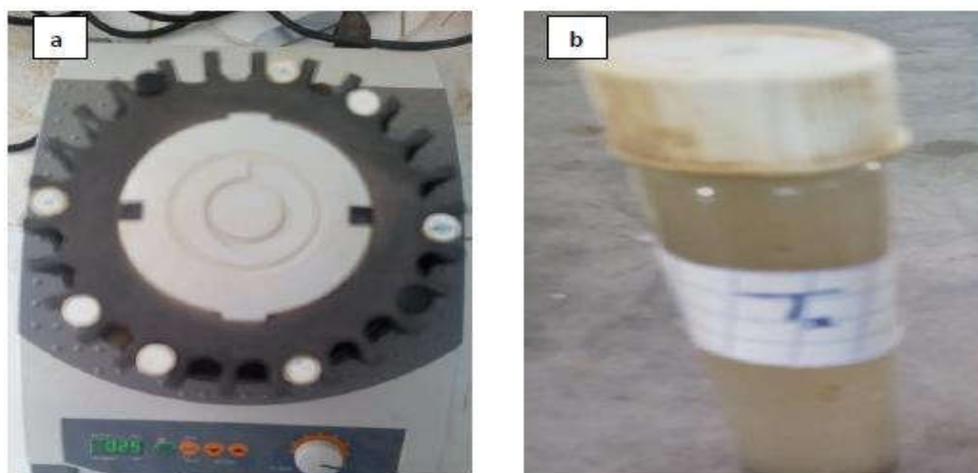


Photo 10: L'homogénéisation.

a- Photo d'homogénéisateur ;

b- Echantillon après l'homogénéisation ;

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



Photo 11: Photo du thermo réacteur.

Après refroidissement, la DCO est déterminée par dosage en retour : de bichromate de potassium est dosé à l'aide d'une solution de sulfate fer ammonium sel de Mohr $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$, après la détermination de leur titre, en présence de quelques gouttes de férœien comme indicateur coloré. L'oxydation de la matière produit des ions Cr^{3+} , donnant une coloration rouge violacé.

La DCO est exprimé par la relation suivante :

$$DCO = \frac{[(Vt - Ve) \times 8000 \times T \times D]}{V}$$

Avec : VT : volume de sel de Mohr pour le témoin

VE : volume de sel de Mohr pour l'échantillon

T : titre de sel de Mohr .

D : facteur de dilution .

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

Méthode utilisées:

L'expérience effectuée avec trios digesteurs DI₁ ,DI₂ et DI₃ avec des pourcentages déferant présenté dans le tableau suivant :

Tableau6: Pourcentage des substrats dans les 03 digesteurs.

Digesteur	%La boue	% Déchet de battoire
DI1	100	0
DI2	50	50
DI3	0	100



CHAPITRE III :
RESULTATS ET
DISCUSSIONS

Chapitre III: Résultats et discussions

1. Caractéristiques initiales du substrat:

Les résultats de taux de matière sèche ainsi que le taux de la matière organique sont présentés dans les deux tableaux suivants.

1.1 Taux de la matière sèche

Le tableau suivant représente les résultats obtenus de la matière sèche de différents échantillons.

Tableau 7: Taux de la matière sèche du substrat.

Paramètre	1er Echantillon	2 ^{ème} échantillon	valeur moyenne
matière Sèche (la boue) %	95.4169	95.9881	95.7025
Matière Sèche (la battoire) %	20.8325	20.6246	20.7285

1.2 Taux de la matière organique et matière minérale du substrat

Tableau 8: Taux de la matière organique matière minérale et du substrat .

Paramètre	1 ^{er} Echantillon	2 ^{ème} échantillon	valeur moyenne
Matière organique(la boue) %	38.9625	35.3004	37.1314
Matière minérale (la boue) %	61.0375	64.6996	62.8686
Matière organique(la battoire) %	88.8497	88.6877	88.7687

Matière minérale (la battoire)%	11.1503	11.3123	11.2313
------------------------------------	---------	---------	---------

2 Evolution des paramètres de fonctionnement pour le trios digesteur .

2.1 Evolution du pH

Tableau 9:La variation de pH en fonction de temps de les trois digesteur .

Les jours	1	7	14	21	28
pH DI ₁	8.23	8.21	8.11	7.78	7.77
pH DI ₂	8.11	7.83	7.75	7.63	7.65
pH DI ₃	7.73	7.71	7.68	7.65	7.61

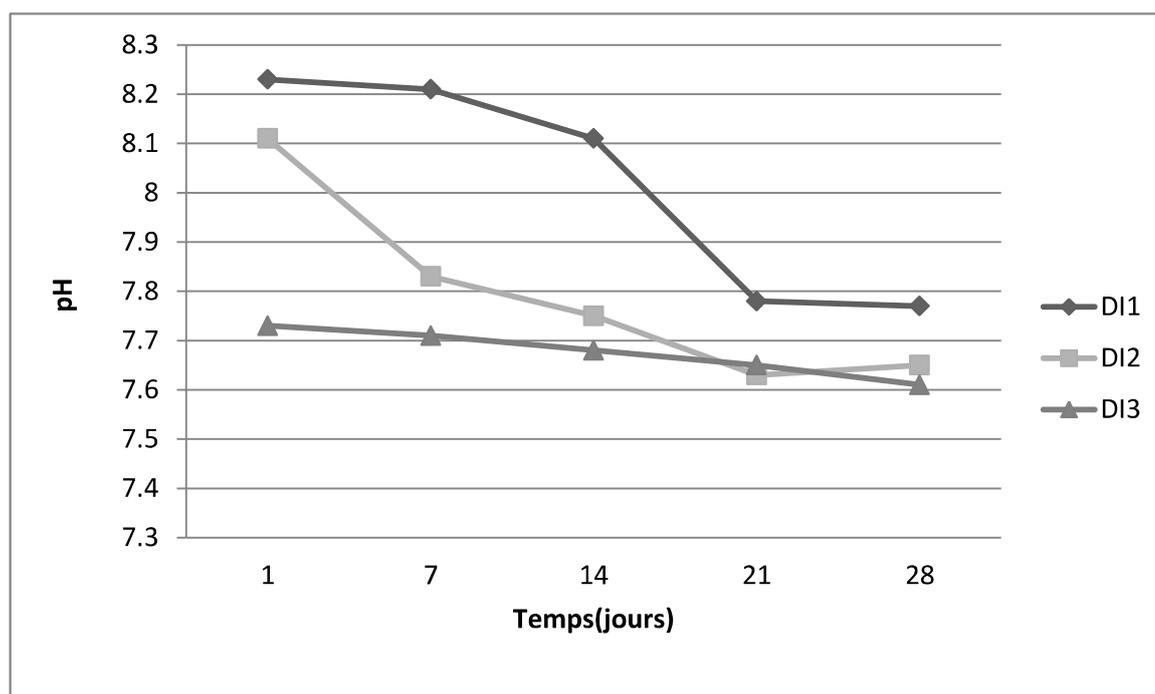


Figure11:l'évolution de pH dans les digesteurs.

L'évolution de la valeur du pH en fonction du temps A noter que la première semaine ; La valeur du pH est presque constante à un pH de base ; ce qui indique que rien ne s'est passé dans le processus ; Comme pour le DI₂ au cours de la première semaine , le

pH a commencé à augmenter vers un pH de 7.75 ,une indication de la formation et de l'accumulation d'acides gras dans le milieu ,et pour DI₃ le degré de pH presque constant avec la valeur 7.7 ; ce qui indique la formation de substrats et la formation d'acides gras et leur accumulation dans le milieu .

Ensuite ,le pH de DI₁ ,DI₂ , DI₃ , a commencé à augmentation vers la neutralité , que s'explique par la production d'éthanol dans le milieu pendant les semaines 2 et 3 ,comme pour la 4^{ème} semaine les ont noté la stabilité du pH entre (7.6 à 7.8) pour les DI₁ , DI₂ ,DI₃ , explique cette stabilité sur la consommation d'acides gras volatils et l'épuisement de la matière organique.

3. La production de Biogaz

Tableaux 10 : Le Volume de biogaz en fonction de temps de les trois digesteur .

Les jours	DI1 (ml)	DI2 (ml)	DI3 (ml)
1	20	23	0
2	30	40	0
3	70	71	0
4	32	52	0
5	52	93	0
6	80	58	0
7	95	78	12
8	90	68	12
9	48	73	9
10	26	37	18
11	22	47	6
12	18	24	16
13	24	23	11
14	30	26	10
15	36	16	6
16	28	15	11
17	27	19	10
18	25	16	8
19	20	18	5
20	19	12	8
21	15	10	5
22	14	8	4
23	12	8	0
24	10	8	0
25	8	0	0
26	8	0	0
27	0	0	0
28	0	5	0

29	0	0	0
30	0	0	0

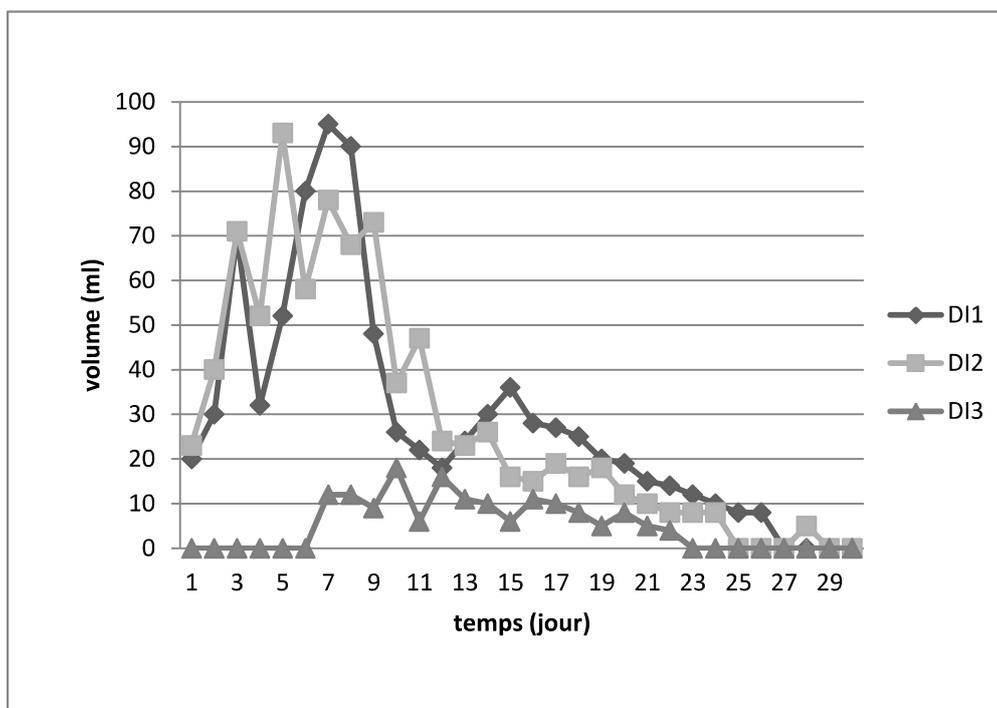


Figure12 : Evolution des volumes de biogaz avec les jours .

Selon la première semaine, le volume a atteint 93 ml et 95 ml de biogaz pour DI₁ et DI₂ respectivement comme volume maximum, comme pour DI₃ pendant les six premiers jours la production de biogaz était complétement nulle.

On note également une diminution significative des volumes de biogaz aussi bien pour DI₂ au cours de la deuxième semaine , et il continue de diminuer au cours du mois jusqu'à son absence en quatrième semaine (ceci indique la fin de la matière organique et l'arrêt de le processus de production de biogaz).

Comme pour DI₃ , le volume de biogaz augmente d'un très faible pourcentage ,entre 0ml et 20ml , puis disparaît à la quatrième semaine .

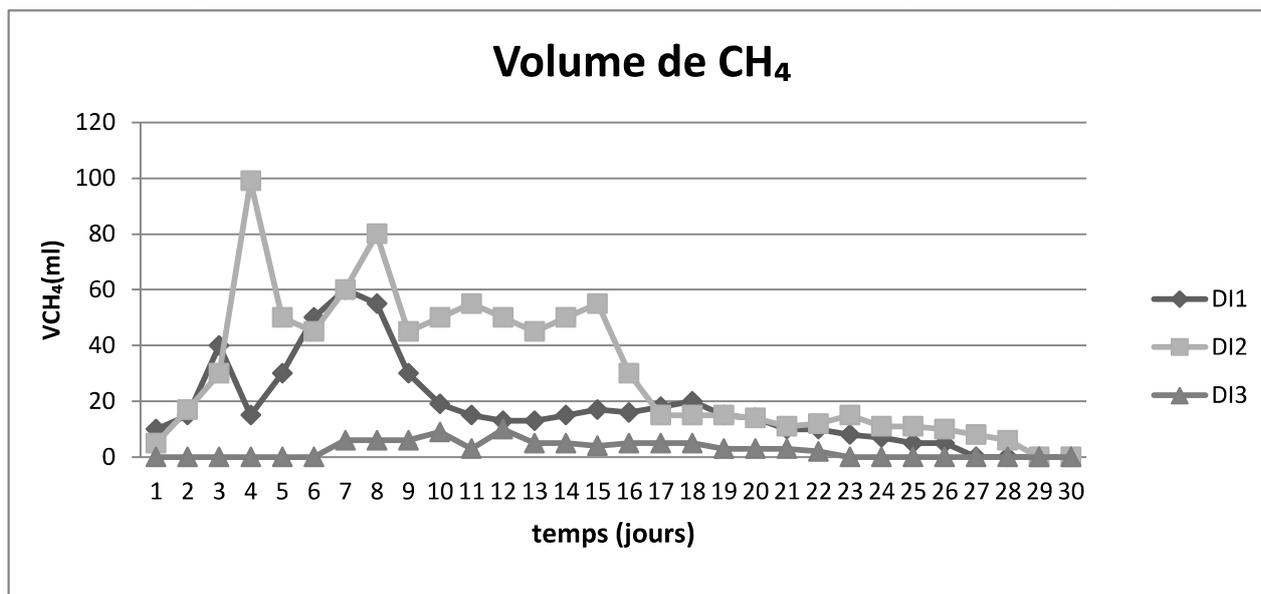
Le manque de volume de biogaz pour chacun des DI₁ , DI₂ , DI₃ explique la fin de l'organique la matière et la fin du processus de production de biogaz .

4 .Volume de méthane (CH₄)

Tableau 11 : Le Volume de méthane en fonction de temps de les trois digesteur .

Les jours	DI1 (ml)	DI2(ml)	DI3(ml)
1	10	5	0
2	15	17	0
3	40	30	0
4	15	99	0
5	30	50	0
6	50	45	0
7	60	60	6
8	55	80	6
9	30	45	6
10	19	50	9
11	15	55	3
12	13	50	10
13	13	45	5
14	15	50	5
15	17	55	4
16	16	30	5
17	18	15	5
18	20	15	5
19	15	15	3
20	14	14	3
21	10	11	3
22	10	12	2
23	8	15	0
24	7	11	0
25	5	11	0
26	5	10	0
27	0	8	0
28	0	6	0
29	0	0	0
30	0	0	0

Figure13: Evolution des volumes de méthane du trois digesteur avec les jours.



Pour DI₂ , selon les premiers jours du processus de fermentation ,le volume de méthane s’est développé en très grande quantité dans les 15 premiers jours , estimé entre 20ml à 99ml comme maximum le quatrième jour ;ensuite le volume diminue progressivement jusqu’à ce qu’il disparaisse le 29 et 30 jour .

Comme pour le DI₁ ,le volume de méthane était aussi élevé que 60ml au 7^{ème} jour ,puis la production de méthane a progressivement diminué au fil des jours jusqu’à ce qu’elle soit absente au jour 27 et établie.

En DI₃ le volume de production de méthane est nul du premier jour au sixième jour ,puis la production de méthane commence avec une très petite quantité , ne dépassant pas 10 ml, Biologique et la fin du processus de bio-fermentation .

5 .Cumulation des volumes

Tableau 12: Evolution volumes DCO de (substrat et détestât) de trois digesteurs.

	DI 1	DI 2	DI 3
Substrat	21333.33	16000	58666.66
Digestat	18645	7666	52833

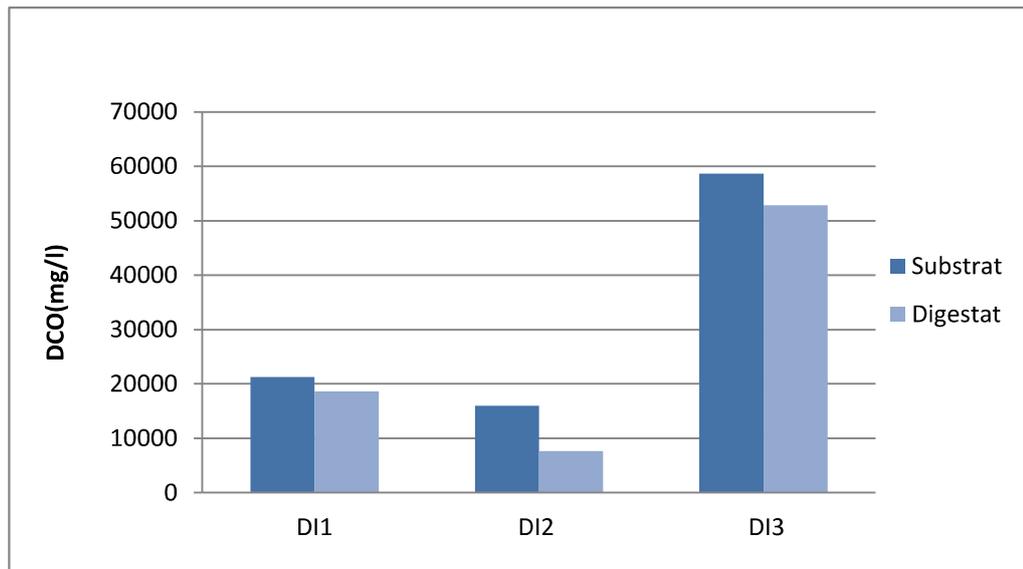


Figure 14: Evolution des (substrat +digestat) volumes dans chacun des trois digesteurs pendant la période de fermentation .

Tableau 13: Evolution volumes MO de (substrat et digestat) de trois digesteur .

	DI 1	DI 2	DI 3
Substrat	75.74	79.22	42.83
Détestât	56.21	56.66	39.98

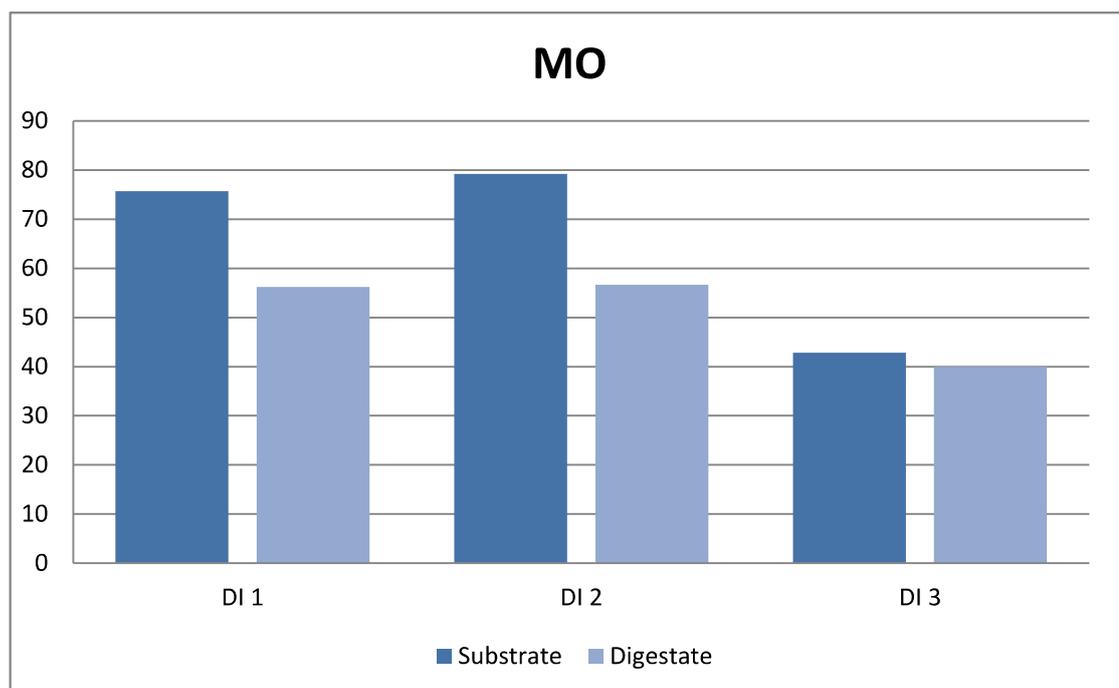


Figure 15: Evolution de la matière organique des (substrat et détestât) dans chacun des dégisteurs.

Pour les graphiques de MO et DCO, je remarque que :

La proportion de MO dans DI_2 est très grande, donc son DCO est très faible, pour la consommation d'oxygène en très grande quantité lors de la décomposition chimique de la matière organique. Suivi de DI_1 , la proportion de matière organique est importante, donc DCO a un volume important, Lors de la décomposition chimique de la matière organique en digestion anaérobie .

En DI_3 la volume de DCO est très grande, ce qui est dû faible pourcentage de la matière organique. C'est la même chose que plus la matière organique est grosse, plus le rapport DCO est petit , car on a besoin d'oxygène pour oxyder les réactifs lors de la décomposition organique .

The background is a light-colored marbled pattern with grey and white swirls. A gold-colored octagonal frame with a double-line border is centered on the page.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le contexte du traitement des déchets et notamment des boues issues des stations d'épuration, la digestion anaérobie apparaît comme la meilleure solution pour traiter ces déchets d'une part, et de les valoriser d'autre part.

Le premier but de notre étude c'est de donner une valeur énergétique en utilisant comme substrat les boues issues de la station de lagunage de la ville d'Adrar, pour cela on a entrepris une série d'expériences.

Les résultats d'analyse du substrat ont montré qu'il renferme une importante.

Dans notre travail, mené une série d'expériences sur trois piliers :

Le premier était un pourcentage de (100% de la boues), le deuxième pilier était un mélange de l'autel en proportions égales (50M pour chaque substance réactive), le troisième pilier était (100% des déchets de battoire).

Les résultats de l'analyse des substrat constitué de (50% de la boues et 50% de la déchets de battoire) contient une grande partie de la matière organique ; Ainsi, devient le substrat le plus approprié pour la production de méthane.

Cette étude expérimentale comprend plusieurs parties. Le processus de digestion simple est étudié. On dilue les différents substrats avec de l'eau distillée. La température est fixée à 37 °C, Tout les paramètres liés au déroulement de la digestion anaérobie sont étudiés, tels que : pH ;et le volume de méthane en plus de la matière organique et du DCO (personnes qui sont facteurs de traitement des divers substrats).

Les valeurs de ces paramètres de stabilité indiquent le bon déroulement du processus de digestion dans le cas où les deux substrats sont combinés. Le bon pouvoir tampon de cette boue permet de fixer les valeurs de pH dans l'intervalle optimal pour la progression de la digestion anaérobie entre (6.5 à 7.5).

Les résultats ont montré une diminution du DCO de rendement (8334mg/l) et une augmentation idéale du volume de biogaz et de méthane, estimés respectivement à 848 ml et 909 ml, pendant un mois.

Des tests de production de biogaz à partir de la digestion anaérobie des boues de la station du lac de la ville d'Adrar ont montré la faisabilité de Cette technique pour augmenter la charge organique des boues en les mélangeant avec des résidus d'Abattoir pour augmenter le rendement en méthane lors de la digestion anaérobie .

Pourcentage de biogaz inflammable en plus d'un bon rendement technique .



Références

Références bibliographiques

- Abdelkrim et Rabh. (2021).** *optimisation De Temps De Rétenion Hydrolique Pour La Digestion Anaérobie Des Déchets ménagers De La Ville D'adrar.* adrar: Universitaire Adrar.
- Addou, A. (mai 2009).** *'développement durable, traitement des déchets, valorisation, élimination'' professeur de chimie de l'environnement.* Mostaganem: l'université de Mostaganem.
- Ahring. (1994).** *." Status on science and application of hemophilic anaerobic Digestion".* . Water Science & Technologie 30, No 12, 241-249,.
- Angélique. (2011).** *bio méthanisation''*, rapport. Liég: université de Liég.
- Archer. (1990).** *The microbiology and control of anaerobic digestion. In Wheatley .Anaerobic digestion, a waste treatment technology.* London: Critical reports an applied chemistry. London, Elsevier.
- Balk. (2002).** *Thermotoga lettingae sp nov a novel thermophilic, methanol-degrading bacterium isolted from a thermophilic anaerobic reactor .* International Journal of Systematic and Evolutionary Microbioloy .
- Bastone. (2002).** *The IWA Anaerobic digestion model no 1.* water Science and Technology .
- Benyoucef. (2013).** *la méthanisation des déchets organiques de la ville d'Adrar.* d'Adrar: université d'Adrar.
- Bertan. (1995).** *'le biogaz procédés de fermentation méthaniques''* . Paris: Masson.
- Biganzoli. (2012).** *Volatilisation and oxidation of aluminium scraps fed into incinération furnaces,.* Waste Manag.
- Björnsson. (2001).** *Evaluation of new methods for the monitoring of alkanity, dissolved hydrogen and the microbial community in anaerobic digestion .* Water Research .
- Bouallagui. (2003).** *Hamdi M« Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester »* . Bioresource Technology .
- Boudouaya . (2011).** *Gestion Des déchets Solides ménagers et hospitaliers de la ville d'Adrar.* Mostaganem : université Abdelhamide Ibnbadis Mostaganem .

- Boutouta. (2012).** *valorisation énergétique des déchets solides urbains de la ville de Blida*”, mémoire master,. Blida: université Saad Dahleb de Blida.
- Boutouta. (2012).** *Valorisation énergétique des déchets solides urbains de la ville de blida.* Blida: université de blida.
- Chaslerie. (2002).** *Techniques de bioconversion : La biométhanisation*,. IUT Génie thermique et énergie projet tuteuré de première année.
- Chen. (2014).** *Jungbluth, “The pressure effects on two-phase anaerobic digestion,”*. Appl. Energy.
- Claire. (2011).** « *Composés Organiques Volatils du Silicium et sulfure d'hydrogène Analyse – Traitement – Impact sur la valorisation des biogaz* » Thèse de doctorat ., Ecole doctorale de Chimie de Lyon .
- Dahmane. (2012).** *Evaluation de la gestion des déchets ménagers et assimilés de la ville d’Oran, mémoire de magister.* Oran: Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Mohamed Boudiaf .
- Dahou. (2010).** *‘la production de biogaz à partir de lagunage de la wilaya d’Adrar ’*, mémoire de magistère. Ouargla: université KasdiMerba Ouargla.
- Damien. (2006).** *Guide du traitement des déchets.* Paris: Dunod, Paris.
- DERBAL. (2009).** *digestion anaérobie des déchets solides mélanges avec les boues de station d’épuration”*, Thèse de doctorat,. Constantine: université Mentouri Constantine.
- Duan. (2006).** *Pyrolysis and gasification modelling of uneround coal gasification and the optimisation of Co2 as agent.* Fuel vol 183.
- DUPRIEZ. (1987).** *Jardin et verger d’Afrique* . Belgique: terre et vie.
- Ferdjellah. (2017).** *Effet du traitement chimique et aérobie sur le rendement de PBM(Potentiel Biochimique Méthanogène)des déchets organique du resaurant* . universitaire de mémoire de master .
- Ghani, H. (2021).** *similation de rendement de méthane des différents types des déchets organique dans la région d'adrar.* Adrar: université Ahmed Draia -Adrar.
- Gijzen. (2002).** *Anaerobic digestion for sustainable development: A natural approach”*. water Sciens and technolog.

- GWOGON, M. G. (2012).** *étude de faisabilité sur la production de l'électricité apartir du biogaz a edéa (camiron)*. Burkina Faso: Ouagadougou01.
- Hamed. (2014).** “ *Biogas upgrading for on-board hydrogen production : Reforming process CFD modeling,*” *Int. J. Hydrogen Energy*.
- Hamedi. (2014).** “*Biogas upgrading for on-board hydrogen production : Reforming process CFD modeling,*” . *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 24, pp. 12532–12540, .
- Héteu. (2003).** *conversion biochimique de la biomasse*”. aspects technologiques et environnement.
- Hu. (2014).** *Influence of recirculation of liquid fraction of the digestate (LFD) on maize stover anaerobic digestion* . Eng: Biosyst Eng.
- Huismans, S. e. (1984).** *La gestion des déchets dangereux: Prencipes directeurs et code de bonne pratique OMS*. européenne: publication régionales Série européenne.
- Kaidi. (2013).** “*Etude comparative de la digestion anaérobie de différents déchets organiques*”. d’Adrar: université d’Adrar.
- Kalloum. (2006).** *la digestion anaérobie des boues de la station d’épuration de la ville d’ADRAR : une opportunité environnementale et énergétique, Mémoire de Magister.*, d’Oran: Ecole Normale Supérieur de L’enseignement Technique d’Oran, .
- Kashyap. (2003)** . «*Biomethanation under psychrophilic conditions: a review* » . *Bioresource Technology* 87, 147-153.
- LACOUR, J. (2012).** « *Valorisation de résidus agricoles et autres déchets organiques par digestion anaérobie en Haïti* ». Quisqueya: Université Quisqueya (Haïti).
- Lamir. (2019/2020).** *Production du biogaz à partir des folioles et pétioles des palmiers dattiers (phoenix dactylifera L) variété H'mira*. Adrar: mémoire de master Université Ahmed draia Adrar .
- Laskri. (2007).** « *Traitement et valorisation des déchets par procédé de digestion anaérobie : production du biogaz* », . Oujda : Revue des Energies Renouvelables CER’07 Oujda .

- LASKRI. (2016).** *Dépollution des déchets riches en matière organique (boues de station d'épuration et déchets d'abattoir par digestion anaérobie valorisation énergétique et production du méthane* . badjia: université badjia mokhtar naba.
- Lebozec. (1994).** *Le service d'élimination des ordures ménagères : organisation, coûts, gestion*. Harmattan.
- Maozhe Chen. (2012).** *"Faisabilité technique et environnementale de l'utilisation dans des matériaux de construction commentaires de centres d'incinération de boues de station d'épuration"*.
- Marache. (2001).** *La méthanisation des effluents et déchets organiques : état des connaissances sur les devenir pathogène* . france: université Paul-Sabatier de Toulouse .
- Michaud. (2001).** *Etude hydrodynamique et biologique d'un procédé de méthanisation à biofilm : le réacteur à lit tubulaire inversé* . thèse de doctorat L'institut National des Sciences Appliquées de Toulouse .
- Moletta. (2002).** *" la méthanisation : Technologies du traitement des effluents par méthanisation"* rédaction.
- Moletta. (2006).** *Procédés biologiques anaérobies. In: Gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires. Technique et documentation*.r. Paris: Éditions Lavoisier.
- Mottet. (2009).** *Recherche d'indicateurs de biodégradabilité anaérobie et modélisation de la digestion anaérobie thermophile*. Montrepelie: université.
- Mottet. (2010).** *recherche anaérobie des déchets solides ménagers avec les boues de stations d'épuration*, . Constantine: université Mentousi, Constantine.
- Mottet, A. (2009).** *Recherche d'indicateurs de biodégradabilité anaérobie et modélisation de la digestion anaérobie thermophile : application aux boues secondaires d'épuration non traitées et prétraitées thermiquement"*,. thèse de doctorat, université Montrepelier.
- OCDE. (2008).** / *AIE De la 1ère à la 2ème génération de technologies des biocarburants, aperçu de l'industrie actuelle et des activités de RD&D*», .

- Omari. (2017).** *Effet du traitement chimique et aérobie sur le rendement de PBM (Potentiel Biochimique Méthanogène) des déchets organiques du restaurant.* adrar: universitaire adrar.
- Ostrem. (2004).** *Greening Waste Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal Solid wastes .* Columbia: University New york .
- Saidi. (2007).** a, '*La bio-méthanisation : une solution pour un développement durable*'. Oujda: revue des énergies renouvelables.
- Salvador. (2005).** "*Etude d'un bioréacteur anaérobie à membranes immergées pour le traitement des eaux résiduaires*", *thèse de doctorat.*, Université de Los Andes – Bogotá – Colombie: Colombie,.
- Schink. (2002).** *Synergistic interactions in the microbial world Antonie van Leeuwenhoek.*
- Tahri. (2014).** *production du biogaz à partir des déchets ménagers de la ville d'Adrar, influence de pH et ensemencement*", *mémoire master*, . Adrar: université d'Adrar.
- Vavilin. (1996).** *description of hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic matter .* Bioresource Technology .
- Zhang. (2008).** *Current Anaerobic Digestion technologies Used for Tretement of Municipal Organic Solide Waste.* biochemical conversion processes.

Résumé :

La digestion anaérobie est un processus naturel que se déroule en l'absence d'oxygène, cette " digestion " ou " fermentation " anaérobie est conduite dans des enceintes fermées ou digesteurs à l'intérieur desquels les réactions de fermentation sont optimisées et contrôlées. Ce travail a pour but d'améliorer la production du biogaz de boues de la station de lagunage de la ville Adrar par Co-digestion avec déchets de battoire. Les résultats de caractérisation de ces déchets montrent que ces boues riches en matières organiques ce qui les rends plus appropriés pour la digestion anaérobie. Le meilleur résultat est celui en digesteur DI2 (50% de la boue et 50 % déchets d'battoire).

Mots clés : Les boues, Déchets de battoire, La Co-digestion, La ville d'Adrar, Bio méthane.

Summary :

Anaerobic digestion is a natural process that takes place in the absence of oxygen, this anaerobic "digestion" or "fermentation" is carried out in closed enclosures or digesters inside which the fermentation reactions are optimized and controlled. This work aims to improve the production of sludge biogas from the lagooning station of the city of Adrar by co-digestion with slaughterhouse waste. The characterization results of these wastes show that the sludges are rich in organic matter which makes them more suitable for anaerobic digestion. The best result is in the DI2 digester (50% sludge and 50% slaughterhouse waste).

Keywords: Sludge, Slaughterhouse waste, Co-digestion, The city of Adrar, Bio methane.

ملخص :

الهضم اللاهوائي هو عملية طبيعية تحدث في غياب الأكسجين ، ويتم إجراء عملية "الهضم" أو "التخمير" اللاهوائية في عبوات مغلقة أو أجهزة هضم يتم فيها تحسين تفاعلات التخمير والتحكم فيها. يهدف هذا العمل إلى تحسين إنتاج الغاز الحيوي للحمأة من محطة بحيرة مدينة أدرار عن طريق الهضم المشترك مع نفايات المسالخ. تظهر نتائج توصيف هذه النفايات أن هذه الحمأة غنية بالمواد العضوية مما يجعلها أكثر ملائمة للهضم اللاهوائي. أفضل نتيجة هي في هضم (50) DI2. حمأة و 50% نفايات المسلخ).

الكلمات المفتاحية: الحمأة ، مخلفات المسلخ ، الهضم المشترك ، مدينة أدرار ، الميثان الحيوي.