

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de Fin d'Etude De MASTER PROFESSIONNEL

Spécialité : énergétique
Filière : **énergie renouvelable**

Présenté par
MEFTAH
Amine

Mémoire dirigé par **BELKADI Arab** et codirigé par **ZOUAOUI Salah**

Thème

Valorisation énergétique par la méthanisation
de boues de station d'épuration (STEP),
Cas d'étude station Est de la ville Tizi-
Ouzou (pont de bougie).

Mémoire soutenu devant le jury composé de :

M_r OUIBRAHIM Ahmed

Enseignant au département de Génie Mécanique

Président

M_r TEBBICHE Hocine

Enseignant au département de Génie Mécanique

Examineur

Travail réalisé on collaboration avec l'ONA de Tizi-Ouzou

Remerciements

Louange à notre seigneur et créateur ALLAH qui nous a doté de la merveilleuse faculté de raisonnement et de nous avoir incité à acquérir le savoir. C'est à lui que nous adressons notre gratitude en premier lieu.

Nous tenons à remercier vivement notre encadreur :

Monsieur BELKADI Arab. Professeur à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Vice chef de Département Génie Mécanique.

Nous tenons à remercier les chercheurs du Laboratoire de la Station D'épuration DE pont de bougie. Nous remercions tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire particulièrement Mr Si Ahmed Enseignant au Département.

Madame OUAR Chef de département de la station d'épuration DE pont de bougie, Ville de TIZI OUZOU.

Nous tenons à remercier tout les membres de jury pour avoir accepté de présider et d'examiner ce travail :

Monsieur Mr OUIBRAHIM Ahmed Enseignant au Département De Génie Mécanique a l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour la présidence

Monsieur Mr TEBBICHE Hocine Enseignant au Département De Génie Mécanique a l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour l'examinassions.

Enfin, nous remercions tout ceux ou celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions tous les étudiants(es) de master en génie mécanique, option : énergies renouvelables, promotion 2016 – 2017.

Nous remercions vivement nos parents pour leur aide et leur contribution à l'aboutissement de nos études et en témoignage de reconnaissance.

NOMENCLATURE

Abréviations :

STEP : Station d'épuration

MVS : Matières volatils en suspension g/l

MO : Matières organique g/l

DBO : Demande biochimique en oxygène mg/l

DCO : Demande chimique en oxygène mg/l

MS : Matière sèche g/l

ONA : Office National D'assainissement

PH : Potentiel Hydrogène

AGV : Acides gras volatils (mg DCO/l)

CH₄: Méthane

CO₂ : Dioxyde de carbone

H₂S : Sulfure dihydrogène

GES : Gaz a effet de serre

ERU : Eaux Résiduaires Urbaines

ERI : Eaux Résiduaires Industrielles

TDC : Détecteur de conductivité thermique.

FID : Détecteur d'ionisation de flammes.

Cm : Charge massique.

VBA : volume du bassin d'aération [m³]

Lettres latines:

C : Carbone

N : Azote

Q : le débit journalier entrant dans le bassin d'aération [$m^3.j^{-1}$]

S₀ : Substrat à l'entrée de l'aérateur [$kg.m^{-3}$]

X : concentration en MS des boues dans le bassin d'aération [$kg.m^{-3}$]

P : Production journalière de boues [kg MS]

Le : Masse journalière de DBO éliminée [kg DBO/j]

Me : la masse de l'eau dans le récipient en [Kg]

C_{pe} : chaleur spécifique de l'eau en [J/ Kg. °C]

T_f : la température limite des procédés en [°C]

T_i : la température ambiante de l'eau en [°C]

t : le temps de chauffe

Bo : le potentiel de production de gaz

Et : Energie totale disponible annuellement

Ev : Energie valorisable annuellement

Liste des figures

Figure N°1 : Schéma récapitulatif des différentes étapes de la méthanisation.....	13
Figure N°2 : Schéma réactionnel de l'acidogenèse[6].....	14
Figure N°3 : Schéma réactionnel de l'acitogenè[6]	14
Figure N°4 Schéma de Fonctionnement d'une unité de méthanisation.....	15
Figure N°5 : Production de biogaz en fonction de la température [21].....	16
Figure N°6: les différentes formes de digesteurs [6].....	18
Figure N°7 Schéma d'un digesteur cylindrique à membrane souple. [39].....	18
Figure N° 8 Une usine de méthanisation en Allemagne [40].....	19
Figure N°9 : Equivalence énergétique du méthane [12].....	21

Figure N°10: STEP Est de TIZI OUZOU [37]	25
Figure N°11: Situation géographique de la STEP [38]	26
Figure N°12 : Photo du dégrilleur mécanique [46].....	27
Figure N°13 : Photo du déssableur-déshuileur [46].....	28
Figure N°14 : Photo du bassin d'aération [46].....	29
Figure N°15: Photo du décanteur [46].....	29
Figure N°16 : Photo du bassin de stabilisation [46].....	30
Figure N°17 : Photo de l'épaississeur [46].....	31
Figure N°18 : Photo des lits de séchage des boues [46].....	31
Figure N° 19: quantités des boues produites et valorisée dans la STEP Est de Tizi-Ouzou durant les dernières années [36].....	32
Figure N° 20 : destination final des boues [36].....	32
Figure N°21:Schéma du bio digesteur.....	36
Figure N°22: Image du dispositif (photo originale, 2017).....	37
Figure N°23 : La boue utilisée (photo originale, 2017).....	37
Figure N°24 : lancement de l'expérience (photo originale, 2017).....	38
Figure N°25: pH Mètre de type HANNA HI2210 (photo originale, 2017).....	39
Figure N°26 : Les étapes de détermination de la MS (photos originale, 2017).....	40
Figure N°27 : Appareil d'analyse de biogaz (CPG), (SHIMADZU GC-2014), (photo originale, 2017).....	43
Figure N°28 : La mesure du biogaz par la CPG (photo originale,).....	44
Figure N° 29 : Représentation graphique de la puissance fournie a l'eau dans le procédé mésophile.....	47
Figure N° 30 : Représentation graphique de la puissance fournie à l'eau dans le procédé thermophile.....	49
Figure N° 31 : Représentation graphique de la puissance fournie à la cuve dans le procédé mésophile	51
Figure N° 32 : Représentation graphique de la puissance fournie à la cuve dans le procédé thermophile.....	53
Figure N° 33 : Représentation de la détection TCD (première injection).....	57

Figure N° 34 : Représentation de la détection FID (première injection).....	57
Figure N° 35 : Représentation de la détection TCD (deuxième injection).....	59
Figure N° 36 : Représentation de la détection FID (deuxième injection).....	59
Figure N° 37 : Représentation de la détection TCD de CO2 pur.....	60

Liste des tableaux

Tableau N° 1 : Composition du biogaz [10]	18
Tableau N°2 : les avantages et les inconvénients de la méthanisation.....	21
Tableau N°3: les différents installations de traitements dans la STEP [36].....	26
Tableau N°4 : Les résultats de la détection TCD (première injection).....	57
Tableau N°5 : Les résultats de la détection FID (première injection).....	58
Tableau N°6 : Les résultats de la détection TCD (deuxième injection).....	59
Tableau N°7 : Les résultats de la détection FID (deuxième injection).....	60

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	---

PARTIE BIBLIOGRAPHIE

Chapitre I : Généralités et valorisation des boues des stations d'épuration

1. Introduction	3
1.1. Définition et origine des boues de la station d'épuration	3
1.2. Nature et origine d'eau usée	3
2. Composition des boues résiduaires	4
2.1. Matière organique	4
2.2. Eléments fertilisants et amendements	5
2.3. Eléments chimique inorganique et organique	5
2.4. Les micro-organismes pathogènes	5
3. Les types des boues	6
3.1. Les boues primaires	6
3.2. Les boues secondaires (boues activées)	6
3.3. Les boues mixtes	6
3.4. Les boues physico-chimiques	7
4. Les différentes filières de traitement des boues	7
4.1.1. L'épaississement	7
4.1.2. La stabilisation	7
4.1.3. La déshydratation	8
4.2. Filières d'élimination des boues résiduaires urbaine	8
4.2.1. La mise en décharge contrôlée	8
4.2.2. L'incinération	9
4.2.3. Epandage direct sur le sol	10
5. Historique sur la méthanisation	10
5.1. Définition de la méthanisation	11
5.2. Les procédés biologiques de la digestion anaérobie	11
5.3. Première phase aérobie	11
5.4. Deuxième phase anaérobie	11
5.4.1. Hydrolyse	13
5.4.2. Acidogenèse	13
5.4.3. Acétogenèse	13
5.4.4. Méthanogenèse	14
5.4.5. Fonctionnement d'une unité de méthanisation	14
5.5. Les conditions de la réaction de méthanisation	14
5.5.1. La température	15
5.5.2. Le pH	15
5.5.3. Le rapport Carbone / Azote	16
6. Digesteurs : Définition, Technologie et Géométries	16
7. Définition de biogaz et sa composition	17
7.1. Valorisation du biogaz	18

7.2. Valorisation thermique	19
7.3. Valorisation électrique	19
7.4. Le biogaz carburant	20
7.5. L'injection dans le réseau de gaz naturel.....	20
8. Les avantages et les inconvénients de la méthanisation.....	21
8.1. Suivi de la méthanisation.....	22
8.2. Quelques travaux récents sur la méthanisation.....	22
9. Conclusion.....	24

PARTIE EXPERIMENTALE

Chapitre II : Matériels et méthodes

1. Présentation de la station d'épuration d'Est de TIZI OUZOU (STEP).....	25
1.1. Composition de la STEP de TIZI OUZOU.....	26
2. Technique d'épuration des eaux usées.....	27
2.1. Les prétraitements.....	27
2.2. Traitement primaire (physico-chimiques.....	28
2.3. Traitement secondaire (biologique).....	28
2.4. Clarification.....	29
2.5. Stabilisation.....	30
2.6. Epaissement.....	30
2.7. Déshydratation.....	32
2.8. Estimation de la production et la destination finale des boues de la STEP.....	32
3. Les paramètres caractéristiques des boues.....	33
3.1. La charge massique C_m	33
3.2. Le temps de séjour (t s)	34
3.3. L'âge des boues	34
4. Matériel d'étude.....	35
4.1. Description du bio-digesteur	36
4.2. Le substrat utilisé.....	36
5. Les analyses physico-chimiques des boues.....	38
5.1. Le potentiel d'hydrogène.....	39
5.2 Matière sèche (MS).....	39
5.3. La matière organique.....	40
5.4. Détermination de demande biologique en oxygène (DBO_5).....	41
5.5. Détermination de la demande chimique en oxygène (DCO).....	42
5.6. Le rapport DCO/DBO_5	42
6. Analyses de biogaz.....	43

Chapitre III: Bilan Energétique et Discussion des Résultats

1. Introduction :	45
2.1. Procédé mésophile [32 – 42°C] :	45

2.1.1. La quantité de chaleur fournie à l'eau dans le procédé mésophile :	46
2.1.2. La puissance fournie à l'eau dans le procédé mésophile :	46
2.1.3. La variation de la puissance fournie à l'eau en cours de temps dans le procédé mésophile.	47
2.2. Procédé thermophile [50 – 57°C] :	47
2.2.1. La quantité de chaleur fournie à l'eau dans le procédé thermophile :	48
2.2.2. La puissance fournie à l'eau dans le procédé thermophile :	48
2.2.3. La variation de la puissance fournie à l'eau en cours de temps dans le procédé thermophile :	49
2.3.1. La quantité de chaleur fournie à la cuve (digesteur) dans le procédé mésophile :	49
2.3.2. La puissance fournie à la cuve (digesteur) dans le procédé mésophile :	50
2.3.3. La variation de la puissance fournie à la cuve (digesteur) en cours de temps dans le procédé mésophile :	50
2.4.1. La quantité de chaleur fournie à la cuve (digesteur) dans le procédé thermophile :	51
2.4.2. La puissance fournie à la cuve (digesteur) dans le procédé thermophile :	52
2.4.3. La variation de la puissance fournie à la cuve (digesteur) en cours de temps dans le procédé thermophile :	52
3. Propriétés de biogaz :	53
4. Bilan de matière et bilan énergétique :	54
4.1. Production de méthane :	54
4.2. Energie totale disponible annuellement « Et » :	55
4.3. Energie valorisable annuellement « Ev » :	55
4.4. Conversion énergétique de biogaz :	55
5. Détection de la composition de biogaz :	56
5.1. Le détecteur TCD :	56
5.2. Le détecteur FID :	56
5.3. Détection de CO ₂ pure :	61
6. Conclusion :	61
Conclusion et perspectives	63

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Introduction générale

Il y'a quelques décennies, les économistes ont prédit la raréfaction de l'or noir à cause des réserves de brut qui arrivent à épuisement. Grâce à la recherche scientifique, l'évolution des techniques d'extraction de l'or noir a conduit à exploiter des poches de pétroles jadis non accessibles et aussi à exploiter les sables bitumineux ou encore le gaz de schiste.

Cependant, cette demande est en perpétuelle croissance, liée à une activité industrielle humaine toute aussi croissante, a aggravé les taux d'émissions de polluants et des gaz à effet de serre. Une des solutions préconisées est l'utilisation d'énergies renouvelables dites propres comme l'énergie solaire, éolienne, géothermique, hydraulique et celle issue de la biomasse (déchet de la biomasse).

Avec l'explosion démographique et la recherche d'un certain confort de vie par la population, la production de déchets ne cesse d'augmenter, ce qui engendre d'énormes risques sur l'environnement et, par conséquent sur la santé de la population, surtout dans les pays en développement. L'exploitation de ces déchets est ainsi très importante, pas uniquement du point de vue énergétique, mais aussi sur le plan écologique et économique.

Parmi ces méthodes de valorisation des déchets existe la fermentation méthanique ou la Bio-méthanisation, qui est une méthode de valorisation de la biomasse en vue de produire du biogaz. Ce dernier peut être mis en valeur par différentes voies : production de chaleur et d'électricité, utilisation du gaz produit comme carburant ou encore injection directe dans le réseau du gaz naturel.

Les boues des stations d'épurations, qui sont des déchets résultants des traitements des eaux usées, sont en partie mises en décharge. Cela s'avère que c'est une technique interdite dans de nombreux pays. Aussi, l'incinération des boues a un coût prohibitif et présente un risque lié à l'impact de gaz toxiques sur l'environnement.

La valorisation énergétique (production de biogaz comme source de chaleur et d'électricité) et la valorisation agricole (production d'engrais) constituent des technologies vertes permettant de transformer les boues en produits à haute valeur ajoutée en minimisant les risques de pollution.

Introduction générale

La station d'épuration (STEP) Est de la ville de Tizi-Ouzou n'engendre pas moins de 60 % de boues mis en décharge, ce qui offre une opportunité de valorisation et de préservation de l'environnement.

C'est dans ce contexte qu'a été proposé notre sujet de PFE, qui vise à prouver la faisabilité de produire du méthane à partir des boues résiduelles de la STEP Est de la ville de Tizi-Ouzou gérées par l'office national d'assainissement (ONA) Est de la même ville.

Le compte rendu du travail réalisé est structuré en deux grandes parties, chacune d'entre elle organisée en chapitres.

Ainsi, la partie théorique comporte tout l'état de l'art portant sur les techniques de traitement des boues en station d'épuration, mais aussi les techniques employées afin de valoriser énergétiquement ces boues par le procédé de méthanisation.

Ensuite, la partie expérimentale qui comprend deux chapitres :

Le premier concerne une présentation du site de travail, le matériel et les méthodes utilisés au cours de la pratique pour l'obtention du méthane à l'échelle de laboratoire,

Le deuxième chapitre présente le bilan énergétique et les différents résultats ainsi que leurs interprétations.

En fin, notre travail est terminé par une conclusion générale, des perspectives de recherches et des recommandations.

CHAPITRE I

Généralités et Valorisation Énergétique des boues par méthanisation

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation.

Table des matières

1. Introduction	3
1.1. Définition et origine des boues de la station d'épuration	3
1.2. Nature et origine d'eau usée	3
2. Composition des boues résiduaires	4
2.1. Matière organique	4
2.2. Eléments fertilisants et amendements	5
2.3. Eléments chimique inorganique et organique	5
2.4. Les micro-organismes pathogènes	5
3. Les types des boues	6
3.1. Les boues primaires	6
3.2. Les boues secondaires (boues activées)	6
3.3. Les boues mixtes	6
3.4. Les boues physico-chimiques	7
4. Les différentes filières de traitement des boues	7
4.1.1. L'épaississement	7
4.1.2. La stabilisation	7
4.1.3. La déshydratation	8
4.2. Filières d'élimination des boues résiduaires urbaine	8
4.2.1. La mise en décharge contrôlée	8
4.2.2. L'incinération	9
4.2.3. Epannage directe sur le sol	10
5. Historique sur la méthanisation	10
5.1. Définition de la méthanisation	11
5.2. Les procédés biologiques de la digestion anaérobie	11
5.3. Première phase aérobie	11
5.4. Deuxième phase anaérobie	11
5.4.1. Hydrolyse	13
5.4.2. Acidogénèse	13
5.4.3. Acétogénèse	13
5.4.4. Méthanogénèse	14
5.4.5. Fonctionnement d'une unité de méthanisation	14
5.5. Les conditions de la réaction de méthanisation	14
5.5.1. La température	15
5.5.2. Le pH	15
5.5.3. Le rapport Carbone / Azote	16
6. Digesteurs : Définition, Technologie et Géométries	16
7. Définition de biogaz et sa composition	17
7.1. Valorisation du biogaz	18
7.2. Valorisation thermique	19
7.3. Valorisation électrique	19
7.4. Le biogaz carburant	20
7.5. L'injection dans le réseau de gaz naturel	20

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation.

8. Les avantages et les inconvénients de la méthanisation.....	21
8.1. Suivi de la méthanisation.....	22
8.2. Quelques travaux récents sur la méthanisation	22
9. Conclusion.....	24

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation.

1. Introduction :

Chaque jour, l'homme consomme de fortes quantités d'eau, tant pour son usage personnel que professionnel. Ces eaux, une fois utilisées, sont recueillies afin d'être épurées. Le traitement de ces dernières s'accompagne d'une production de quantités de boues non négligeables. Les eaux usées ainsi collectées ont donc deux origines : une origine domestique (Eaux Résiduaires Urbaines : ERU) et une origine industrielle (Eaux Résiduaires Industrielles : ERI) [1].

Dans le cas de zones peu ou moyennement industrialisées, ces eaux résiduaires sont mélangées et traitées ensemble dans une station d'épuration (STEP), qui a pour objectif de réduire la charge polluante qu'elles véhiculent afin de rendre au milieu aquatique une eau de qualité [1].

1.1. Définition et origine des boues des stations dépurations :

Les boues des STEP, constitués essentiellement d'eaux, de sels minéraux et de matières organiques, désignent l'ensemble des résidus de l'activité biologique des microorganismes vivant dans les stations d'épurations, qui transforment les matières transportées par les eaux usées pour qu'elles puissent en être extraites [2].

On distingue les boues urbaines et les boues industrielles. Les premières sont produites dans les stations d'épurations traitant les effluents dits "urbains", c'est à dire majoritairement des eaux usées d'origine domestique. Les secondes sont issues du traitement d'eaux usées industrielles [3]. Dans notre travail, on s'est intéressé aux boues urbaines.

1.2. Nature et origine des eaux usées :

Une eau résiduaire est une eau contenant des rejets d'activités humaines, industrielle et agricoles qui peut provoquer ou accroître la pollution du milieu naturel dans lequel elle est rejetée. Cette pollution peut être provoquée par des matières en suspension, colloïdales ou en solution organique ou minérale.

Le premier critère de choix d'un procédé d'épuration est donné par la connaissance de la nature de la matière polluante contenue dans les effluents. On distingue quatre grandes catégories d'eaux usées [4] :

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation.

- **Eaux usées d'origine domestique** qui proviennent des habitations, et sont généralement véhiculées par le réseau d'assainissement jusqu'à la station d'épuration. Ces eaux se caractérisent par leurs fortes teneurs en matières organiques, en sels minéraux (azote, phosphore), en détergents et en germes fécaux.
- **Eaux usées d'origine industrielle** caractérisées par une grande diversité, suivant l'utilisation origininaire de l'eau (industries agroalimentaires et/ou chimiques, centrales thermiques, centrales nucléaires, etc.).
 - **Eaux usées d'origine agricole** où les effluents renferment diverses substances d'origine agricole ou animale.
 - **Eaux de ruissellement** qui sont essentiellement des eaux de pluie et de lavage des chaussées.

2. Composition des boues résiduaires :

La composition exacte des boues varie en fonction de l'origine des eaux usées, de la période de l'année, du type de traitement et de conditionnement pratiqués dans les stations d'épurations. Les boues résiduaires représentent avant tout une matière première composée de différents éléments (matière organique, éléments fertilisants (N, P, etc.), d'éléments traces métalliques, d'éléments traces organiques et d'agents pathogènes) [4].

2.1. Matière organique :

La concentration en matière organique (MO) peut varier de 30 à 80 % de la matière sèche (MS). La MO des boues est constituée de matières particulaires éliminées par gravité dans les boues primaires, des lipides (6 à 19 % de la matière organique), des polysaccharides, des protéines et des acides aminés (jusqu'à 33 % de la matière organique), de la lignine, ainsi que des produits de métabolisation et des corps microbiens résultant des traitements biologiques (digestion, stabilisation) [4].

2.2. Eléments fertilisants et d'amendements :

Selon la dose appliquée, les boues peuvent couvrir, en partie ou en totalité, les besoins des cultures en azote, en phosphore, en magnésium, calcium et en soufre ou peuvent aussi corriger des carences à l'exception du potassium [4]. Les éléments en traces tels que le cuivre, le zinc, le chrome et le nickel présents dans les boues sont aussi indispensables au développement des végétaux et des animaux [4].

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation.

2.3. Eléments chimiques organiques et inorganiques :

Les éléments traces métalliques (cuivre, le zinc) indispensables au développement des végétaux et des animaux, qui peuvent se classer dans la catégorie des éléments chimiques inorganiques, présentent de la toxicité à trop fortes doses [3]. En effet, un polluant peut être défini comme un élément ou un composé chimique ordinaire dont la nocivité n'apparaît qu'à partir d'une certaine concentration. À noter aussi que les éléments, tels que le cadmium et plomb sont des toxiques potentiels [4].

Aussi, dans les boues, une multitude de polluants organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), etc...) peuvent se trouver en concentrations en général de l'ordre de $\mu\text{g}/\text{kg}$ de matière sèche (MS). La nature et la concentration des eaux usées en polluants organiques et inorganiques sont très dépendantes des activités raccordées au réseau.

L'essentiel des contaminations chimiques vient des rejets industriels et dans une moindre mesure des rejets domestiques (utilisation de solvants, déchets de bricolage...). Du fait de la décantation lors du traitement, ces contaminants chimiques se retrouvent dans les boues à de très grandes concentrations par rapport aux eaux usées [3,4].

2.4. Les micro-organismes pathogènes :

Les boues contiennent des milliards de microorganismes vivants qui jouent un rôle essentiel dans les processus d'épurations. Seule une infime partie est pathogène (virus, bactéries, protozoaires, champignons, helminthes, etc.) et provient en majorité des excréments humains ou animaux [3,4].

La concentration d'une eau usée en germes pathogènes dépend du secteur d'activité d'origine : les eaux provenant d'abattoirs ou de toute industrie traitant de produits d'animaux sont très largement contaminées. Ainsi, par mesure de précaution, et afin d'éviter de propager la maladie de la vache folle, il est interdit d'utiliser les boues d'épuration provenant des eaux usées des abattoirs ou des équarrissages pour fabriquer de la fumure ou du compost.

De ce fait, d'une façon générale, les boues doivent subir un prétraitement avant leur utilisation en agriculture [3,4].

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation.

3. Les types des boues :

Lors de l'épuration des eaux usées, en fonction des différentes étapes du prétraitement, différents types de boues sont produites.

3.1. Les boues primaires :

Elles sont issues du traitement primaire et sont produites par simple décantation, en tête de station d'épuration [5]. Ces boues sont fraîches, c'est-à-dire non stabilisées (forte teneur en matière organique) et fortement fermentescibles [5].

3.2. Les boues secondaires (autrement appelées boues activées) :

Issues du traitement secondaire et récupérées après le décanteur secondaire (clarificateur), elles sont des boues fraîches biologiques, essentiellement sous forme de floccs de bactéries [5,6]. Leur pouvoir fermentescible dépend du temps de séjour dans le bassin d'aération [5].

3.3. Les boues mixtes :

Le mélange de boues primaires et secondaires conduit à l'obtention des boues mixtes, dont la composition est dépendante de la quantité de boues primaires et secondaires produites [5,6]. Très fermentescibles, ces boues subissent un traitement de stabilisation [5,6].

3.4. Les boues physico-chimiques :

Ces boues sont issues d'un traitement utilisant des flocculants minéraux (sel de fer ou d'aluminium). Le traitement physico-chimique est principalement utilisé sur des boues industrielles ou pour l'élimination du phosphore en complément au traitement biologique [5].

4. Les différentes filières de traitement des boues :

Les boues résiduaires se présentent sous une forme liquide et avec une forte charge en matière organique hautement fermentescible. Ces deux caractéristiques sont gênantes et posent beaucoup de problèmes techniques pour leur évacuation « quelle que soit la destination », parmi lesquels leur transport et leur stockage qui conduisent souvent à des problèmes de manipulation et des nuisances olfactives. Généralement, le traitement des boues possède trois objectifs :

- La réduction du pouvoir fermentescible (limitation des odeurs) par stabilisation,
- La réduction du volume par épaissement et déshydratation,
- Éliminer l'essentiel des organismes pathogènes.

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation.

4.1.1. L'épaississement :

C'est le premier stade de traitement des boues, dont le principe consiste à enlever une partie plus ou moins importante de l'eau contenu dans les boues. Il a pour objectif de réduire le volume des boues brutes et d'augmenter la concentration des matières sèches (3 à 8 % de siccité selon les techniques utilisées) [7]. Cet épaississement peut se faire simplement par voie gravitaire « décantation » dans un concentrateur ou par des moyens mécaniques (égouttage, flottation ou centrifugation) [7].

4.1.2. La stabilisation :

Elle est mise en œuvre pour empêcher ou réduire les problèmes de fermentation et d'éviter ainsi les nuisances olfactives. Elle peut être biologique par voie aérobie ou anaérobie (méthanisation), ou chimique (chaulage ou autres traitements) [4,8]. La stabilisation biologique présente l'avantage de limiter l'évolution ultérieure de la composition des boues [4, 9,10]

4.1.3. La déshydratation :

La concentration des boues par déshydratation ou par épaississement, a pour objectif de réduire leur volume afin de faciliter par la suite leur transport et leur stockage. Un conditionnement est souvent utilisé en amont pour favoriser la séparation liquide-solide à l'aide de flocculants organiques de synthèse ou minéraux, et autoclavage.

Selon la puissance du procédé de séchage utilisé, l'épaississement, la déshydratation ou le séchage thermique, on obtient des boues à différents pourcentages de siccité : boues liquides (4 à 10 % de MS), boues pâteuses (10 à 25% de MS), boues solides (25 à 50 % de MS), boues granulées ou en poudre pour une siccité supérieure à 85 % [4, 9, 10].

4.2. Filières d'élimination des boues résiduaires urbaine :

S'il existe de nombreux traitements pour réduire le volume, les nuisances, la nocivité des boues, Actuellement il y a trois filières qui sont utilisées pour évacuer les boues, selon que l'on privilégie un mode de digestion basé sur l'élimination ou sur le recyclage. Il s'agit [11] :

- de la mise en décharge contrôlée,

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation.

- de l'incinération,
- du retour au sol par épandage.

4.2.1. La mise en décharge contrôlée :

La mise en décharge se fait dans des centres d'enfouissement technique (CET) modernes, les déchets sont confinés dans les alvéoles, étanches recouverts de terre végétale [4]. Il faut dire d'emblée que cette dernière est une mauvaise solution pour l'élimination des boues de STEP, et dans la mesure du possible, on lui préférera la valorisation, ou à défaut, l'incinération [4,11].

Ces dernières solutions ne sont toutefois pas toujours possibles, soit que les quantités ou qualités des boues ne se prêtent pas à leur valorisation dans l'agriculture, soit que les installations d'incinération présentent des insuffisances de capacité ou des interruptions d'exploitation [11]. Dans ces cas, la mise en décharge peut devoir être l'ultime recours pour l'élimination des boues [11].

4.2.2. L'incinération :

Elle réalise la destruction de la matière organique des déchets par combustion à haute température (+ de 500 °C) produisant des fumées et des matières minérales résiduelles nommées cendres [4,9].

Dans l'objectif d'une valorisation énergétique des déchets, la chaleur produite est récupérée sous forme de vapeur ou d'électricité pour le fonctionnement du four lui-même, pour le chauffage urbain ou industriel. Encore, les résidus de l'incinération (Mâchefer) sont utilisables [9].

En France, 14 à 16 % des boues urbaines sont incinérés, tandis qu'en Europe, le pourcentage varie de 0 à 55 % selon les pays, alors qu'en Algérie, le traitement par incinération n'est pas encore effectué [9].

Cependant, malgré l'intérêt de ce procédé pour une réduction importante des volumes de déchets, il présente des contraintes principalement liées à un investissement très coûteux

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation.

[9]. Les boues seules ne sont pas auto-combustibles, elles nécessitent des fours spéciaux et un mélange avec d'autres déchets tels les déchets ménagers, et l'élimination des cendres et des mâchefers exige une décharge contrôlée de classe 1 [9].

Cette technique reste aussi néfaste du point de vue écologique et environnemental puisqu'elle contribue en plus du gaspillage de matières organiques utiles pour le sol à la diffusion de gaz très toxiques (NO, CO, SO, dioxine, etc.) [4,9].

4.2.3 Epandage direct sur le sol :

À l'heure actuelle, l'épandage agricole des boues reste la principale filière d'élimination, toutefois, cette dernière est pratiquée que si celles-ci respectent le principe "d'intérêt agronomique" et soit exempte de grandes teneurs en polluants inorganiques ou organiques [9].

Ce mode de recyclage est le plus adapté pour rééquilibrer les cycles biogéochimique (carbone, Azote, Phosphore), pour la protection de l'environnement et pour son grand intérêt économique [9]. Elle vise à ménager les ressources naturelles et à éviter tout gaspillage de matière organique dû à l'incinération ou à l'enfouissement dans les décharges [9]. Les boues résiduelles peuvent ainsi remplacer ou réduire l'utilisation excessive d'engrais coûteux [4,9].

5. Historique sur la méthanisation :

La découverte de la méthanisation remonte à 1776 lorsque A. Volta durant une de ses promenades observa que du gaz se libérait d'un marais. Après avoir étudié ce phénomène et fait plusieurs expériences, il mit en évidence que le "gaz des marais" était inflammable [12]. Un peu plus tard (1787), A. L. Lavoisier lui donne le nom de "gashydrogeniumcarbonatrum" mais le terme de "méthane" fut proposé en 1865 et confirmé en 1892 par un congrès international de nomenclature chimique [12]. Pendant ce temps, la présence de ce gaz est mise en évidence dans d'autres milieux (dont le fumier) et son origine est attribuée à l'activité microbienne, qui se développe dans des milieux anaérobies naturels [12].

Le gaz des marais qui contient une forte proportion de méthane provient de la décomposition des déchets organiques végétaux des marécages, et ce phénomène se déroule également dans les lacs et des rizières [13]. Les sols des zones humides tels que les forêts

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation.

tropicales, la toundra et les tourbières participent aussi à la production du méthane atmosphérique [13]. Les phénomènes anaérobies qui se déroulent dans les sédiments marins sont responsables aussi d'une partie du méthane dissous dans l'eau de mer [13].

Enfin, les processus de digestion des animaux libèrent aussi du méthane. En effet, les ruminants et les termites sont la source d'une quantité importante de gaz. [13].

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation

5.1. Définition de la méthanisation :

La méthanisation, également appelée digestion anaérobie, est une voie de dégradation microbienne au cours de laquelle, en conditions anaérobies, la matière organique complexe est minéralisée en un biogaz composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone [13]. Ce mécanisme de dégradation est constitué d'une chaîne réactionnelle complexe, mais décomposé en quatre principales étapes faisant intervenir des populations microbiennes spécifiques constituant un réseau trophique : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse [13].

5.2. Les procédés biologiques de la digestion anaérobie :

5.3. Première phase aérobie :

Cette phase de dégradation aérobie prend place dès la mise en décharge des déchets ou leurs dépôts dans le digesteur [14,15]. Sa durée correspond au temps de consommation de l'oxygène présent au sein du milieu, et l'énergie libérée au cours de cette phase est utilisée pour l'accroissement exponentiel des microorganismes [16].

Cette étape est importante car elle élimine la totalité de l'oxygène contenu dans les déchets, l'O₂ étant toxique pour les organismes strictement anaérobies qui interviennent dans la suite du processus [16].

5.4. Deuxième phase anaérobie :

Cette phase est la plus importante de l'ensemble du processus qui aboutit à la formation de méthane. Elle est caractérisée par quatre sous-étapes successives qui sont récapitulés dans la figure (N°1).

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation

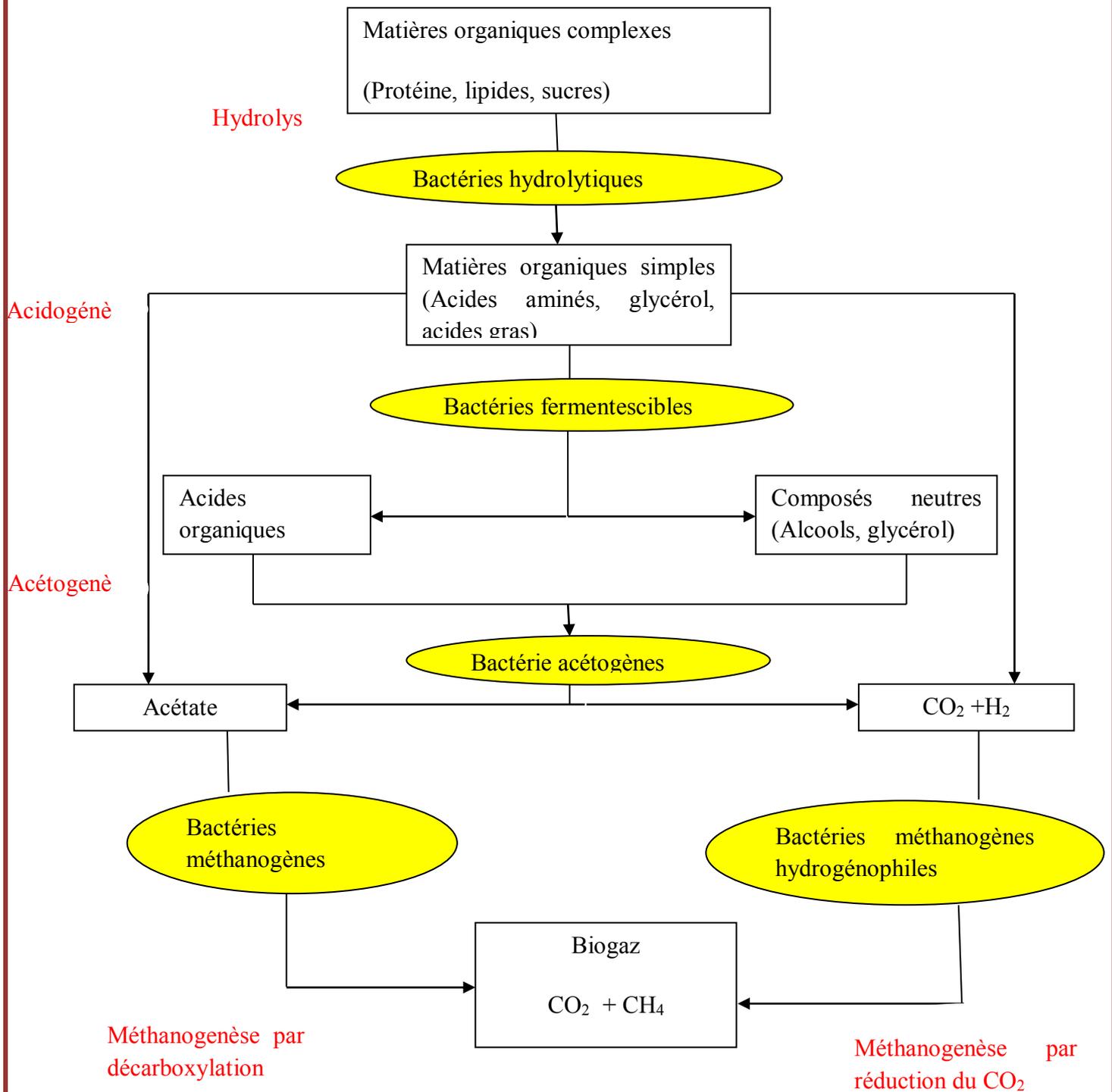


Figure N°1: Schéma récapitulatif des différentes étapes de la méthanisation [17].

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation

5.4.1. Hydrolyse :

Cette étape d'hydrolyse correspond à la dégradation des macromolécules organiques (protéines, lipides, polysaccharides...) en monomères (acide aminé, acide gras, oses...). Ce sont les bactéries dites hydrolytiques qui vont permettre de casser des structures organiques complexes en libérant des enzymes (protéases, lipases, cellulases...) [6].

Cette étape est déterminante pour la suite de la fermentation, car seules les molécules simples seront biodisponibles pour la suite du traitement. D'un point de vue cinétique l'hydrolyse est considérée comme une étape limitante [6].

Les principales espèces qui sont impliquées dans cette étape d'hydrolyse sont celles des genres Clostridium, Bacillus, Ruminococcus, Enterobacteroïdes, Propionibacterium et Butivibrio [18].

5.4.2. Acidogénèse :

Les monomères sont fermentés principalement en acide gras volatil (AGV), en alcools, en hydrogène H₂ et en dioxyde de carbone CO₂. Les bactéries responsables de cette étape sont nombreuses, on les appelle les bactéries fermentaires [6].

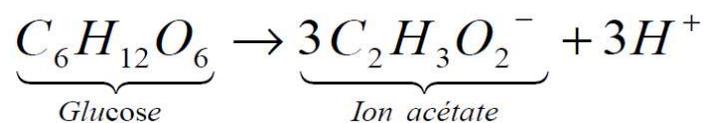
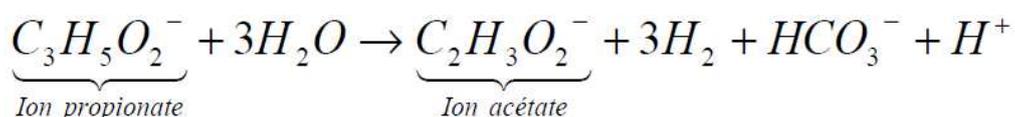


Figure N°2 : Schéma réactionnel de l'acidogénèse [6].

5.4.3. Acétogénèse :

Dans cette étape, une grande partie des acides gras volatils (AGV) et des alcools sont assimilée par les bactéries acétogènes autotrophes pour former de l'acide acétique (CH₃COOH). Une autre partie est convertie en hydrogène et dioxyde de carbone [6].



Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation

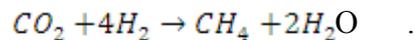
FigureN°3 : Schéma réactionnel de l'acétogène [6].

Ces deux étapes sont représentées par l'activité de trois groupes bactériens : les homoacétogènes des genres *Clostridium*, *Acetobacterium*, *Sporomusa*, *Acetogenium*, *Acetoanaerobicum*, *Pelobacter*, *Butyribacterium*, *Eubacterium* etc, les syntrophes des genres *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas*, *Syntrophus* et les sulfato-réductrices des genres *Desulfovibrio*, *Desulfobacter*, *Desulfotomaculum*, *Desulfomonas* [19-20].

5.4.4. Méthanogenèse :

Il y a deux voies de production du méthane :

- À ~ 70% par les bactéries méthanogènes acétoclastes, le méthane est produit à partir de l'acétate. $3C_2H_4O_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$
- À ~ 30% par les bactéries méthanogènes hydrogénéophiles, le méthane est produit à partir du dioxyde de carbone et l'hydrogène.



Les bactéries méthanogènes hydrogénéophiles les plus représentées sont celles des genres *Methanobacterium*, *Methanococcus* et *Methanobrevibacter* [6].

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation

5.4.5 Fonctionnement d'une unité de méthanisation :

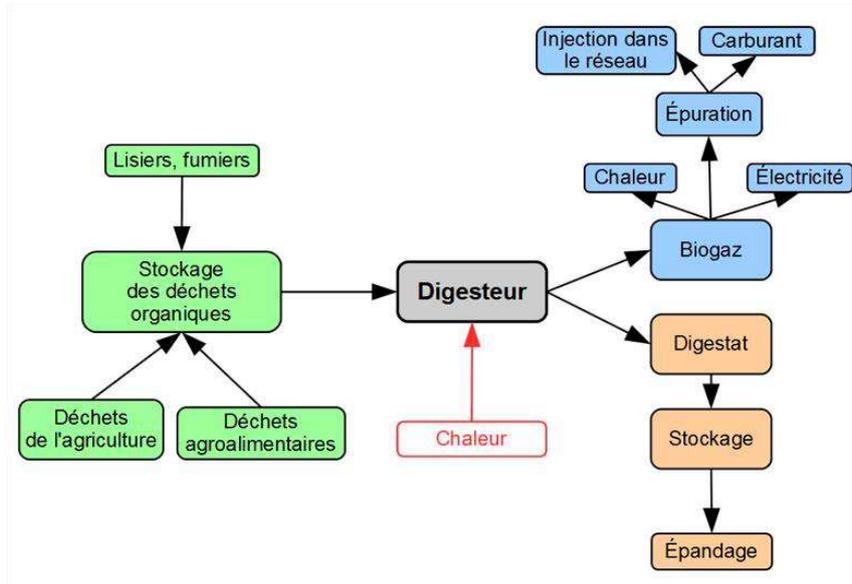


Figure N°4 : Schéma de Fonctionnement d'une unité de méthanisation. [39]

5.5. Les conditions de la réaction de méthanisation :

Dans ce qui précède, nous avons vu les différentes réactions et les différents micro-organismes qui interviennent lors de la méthanisation. Toutefois, pour que ces réactions se produisent, les conditions du milieu sont très importantes [21].

5.5.1. La température :

La réaction de méthanisation est globalement accélérée par la chaleur mais, dans le détail, ce mécanisme est plus complexe. Chaque groupe de bactéries a une température de confort différente et, en dehors de ces domaines de températures, il peut avoir une inhibition des réactions [21].

Il existe trois zones de températures pour la méthanisation (figure N°4):

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation

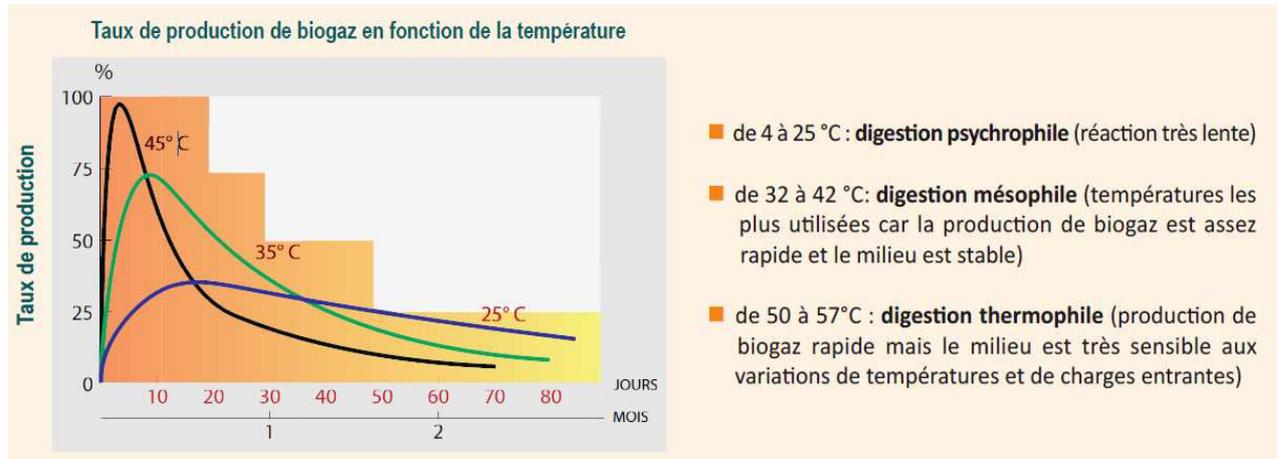


Figure N°5: Production de biogaz en fonction de la température [21]

Des variations journalières de 1°C peuvent perturber la digestion thermophile alors que la digestion mésophile résiste à des variations de 2 à 3°C. Dans tous les cas, les changements de température sont à éviter car les bactéries hydrolytiques et acidogènes résistent mieux aux variations que les autres groupes de bactéries, il ya donc un risque d'accumulation d'acides dans le digesteur, donc un arrêt de la réaction [21].

5.5.2. Le pH :

La vitesse de production du biogaz décroît très rapidement en dehors d'une zone de pH située entre 6 et 8. Comme pour la température, les groupes de bactéries ont des domaines de pH de croissance optimaux différents. Le pH dans le digesteur se situe entre 7 et 7,5 ce qui correspond aux plages favorables à l'acétogénèse et à la méthanogénèse [3, 6, 9,21].

5.5.3. Le rapport Carbone / Azote :

Le rapport C/N est important pour la stabilité du processus. Si ce rapport est trop important, le carbone a du mal à être complètement dégradé. À l'inverse, un rapport trop faible peut entraîner une production importante d'ammoniac qui inhibe les bactéries. Pour avoir une bonne stabilité, le rapport C/N doit être compris entre 10 et 30 environ [21].

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation

6. Digesteurs : Définition, Technologie et Géométries :

La méthanisation des déchets organiques a lieu dans une cuve appelée digesteur. Il s'agit généralement d'une enceinte étanche en béton armé, surmontée d'une membrane élastique pour le stockage temporaire du biogaz. Le mélange contenu dans cette cuve est maintenu homogène par brassage mécanique, pour éviter la formation d'une croûte et faciliter le dégazage : on parle de digesteur infiniment mélangé. Il doit être maintenu à la température optimale pour le développement des micro-organismes : soit à la température dite mésophile (32 - 42 °C), soit thermophile (50 - 57 °C).[39]

Les digesteurs sont fabriqués à base de technologie simple. Les réacteurs à boues libres consistent en la mise en œuvre d'une biomasse libre dans un réacteur infiniment mélangé s'apparentant à la technologie aérobie des boues activées [6].

Les réacteurs à boues libres peuvent se différencier par leurs géométries (Figure n°5). En France par exemple, 70 % des installations sont équipées de digesteur cylindrique et le reste avec des digesteurs de type continental [6]. Dans le reste de l'Europe on trouve fréquemment des digesteurs de type ovoïde.

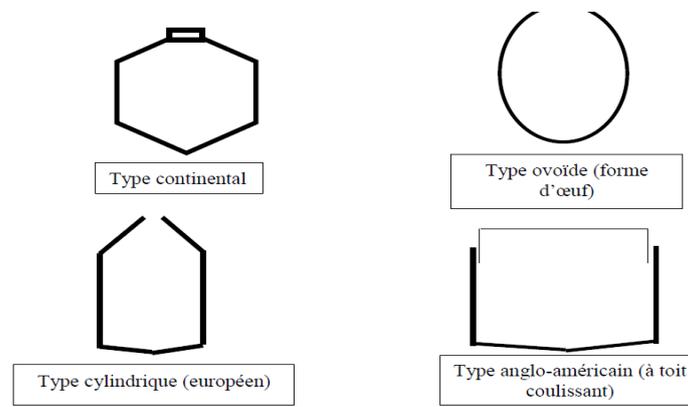


Figure N°6 : Différentes géométrie de digesteur de boues d'épuration [6].

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation

On utilise généralement des digesteurs cylindriques à membrane souple :

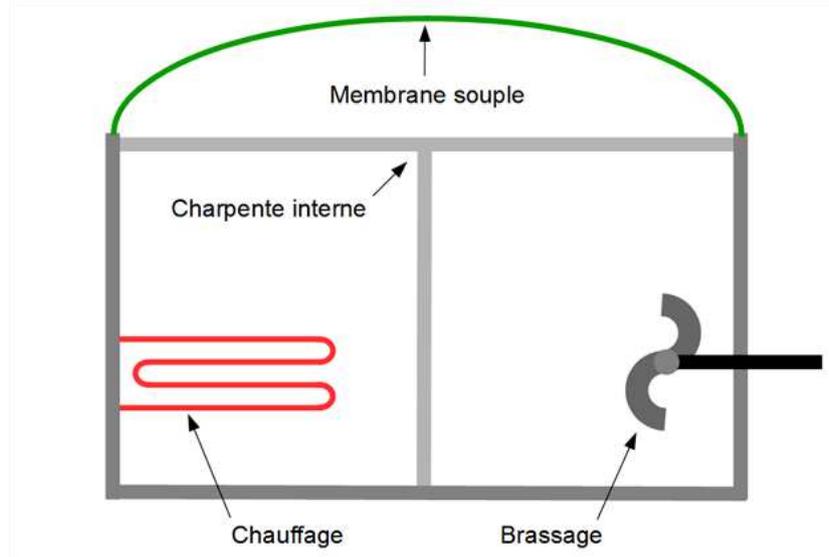


Figure N°7 : Schéma d'un digesteur cylindrique à membrane souple. [39]

Le produit résiduel de la méthanisation est appelé digestat. Il est composé de matière organique non dégradée lors de la méthanisation, de matières minérales (azote, phosphore), et d'eau. Il est généralement stocké dans des fosses en béton. Ce résidu peut également être val.



Figure N°8 : Une usine de méthanisation en Allemagne [40]

7. Définition du biogaz et sa composition :

Le biogaz est un gaz combustible, mélange de dioxyde de carbone (CO_2) et de méthane (CH_4), qui provient de la dégradation des matières organiques mortes, végétales ou animales, dans un milieu en raréfaction d'air (principe dit de la « fermentation anaérobie »).

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation

Le méthane est un gaz à effet de serre 21 fois plus puissant que le CO₂, c'est pourquoi la formation de ce gaz doit être bien connue et maîtrisée [22- 24].

Tableau n°1 : Composition du biogaz [10].

Nature du gaz	Proportion (en %)
Méthane (CH ₄)	50 - 80
Dioxyde de carbone (CO ₂)	20 - 50
Hydrogène sulfuré (H ₂ S)	0 - 0,5

7.1. Valorisation du biogaz :

Plusieurs modes de valorisation existent pour le biogaz :

7.2. Valorisation thermique :

La chaleur de combustion du biogaz peut servir pour la production d'eau chaude, de vapeur à moyenne ou haute pression, ou bien dans des fours de procédés. La pression nécessaire pour l'alimentation des appareils au gaz est généralement faible : 20 à 100 mbar [6,25].

D'une manière générale, les valorisations thermiques nécessitent des débouchés de proximité : il peut s'agir de consommateurs externes au site de production (industries, réseau de chaleur...) ou d'usages internes [6,25].

Dans les stations d'épurations, une partie du biogaz produit est en général utilisé pour maintenir le digesteur à la température de fermentation (37 ou 55 °C). Cette consommation interne du procédé représente environ 15 à 30% de la production [6,25].

7.3. Valorisation électrique :

Le biogaz peut alimenter un moteur à gaz (ou une turbine), qui produit de l'électricité. Lorsque l'électricité est produite seule, celle-ci est le plus souvent exportée via le réseau public. La cogénération produit de l'électricité et de la chaleur, et cette dernière peut être

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation

utilisée pour le chauffage des digesteurs et le reste peut servir à tout autre usages : séchage du digestat, production d'eau chaude, alimentation d'un chauffage domestique [6,25].

Dans le cas de la solution " moteur à biogaz ", il nécessitera en principe une désulfuration et une déshydratation, et ses performances dépendront des spécifications des motoristes. Dans le cas de la solution turbine à vapeur, on peut se contenter d'un traitement par simple filtre dévésiculeur à l'entrée du compresseur, de façon à enlever les particules en suspension dans le biogaz. La chaudière sera munie de tubes de fumée dont le matériau pourra résister aux fumées de biogaz, éventuellement à forte teneur en dioxyde de soufre, chlorures ou fluorures [6, 21,25].

7.4. Le biogaz carburant :

Assez répandue en Suède, la valorisation du biogaz sous forme de carburant automobile ne fait l'objet par exemple en France, pays pourtant développé, que de quelques installations pilotes en cours d'optimisation : Lille, Sonzay (près de Tours) et Chambéry. Elle est destinée pour l'instant à l'alimentation des flottes captives de véhicules des collectivités locales : collecte des ordures ménagères, transport en commun. Son intérêt est à la fois économique et environnemental, compte tenu de la qualité des rejets des moteurs à gaz [6, 21,25].

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation

7.5. L'injection dans le réseau de gaz naturel :

Lorsqu'une unité de méthanisation se trouve à proximité d'une canalisation de gaz naturel, l'injection du biogaz dans le réseau peut être envisageable. La composition finale du biogaz injectable (teneur en méthane, en gaz carbonique, en sulfure d'hydrogène et en oxygène) ainsi que sa pression dépendent des spécifications imposées par le réseau. Cette méthode est courante dans certains pays comme le Danemark et les Pays-Bas [6, 21,25].

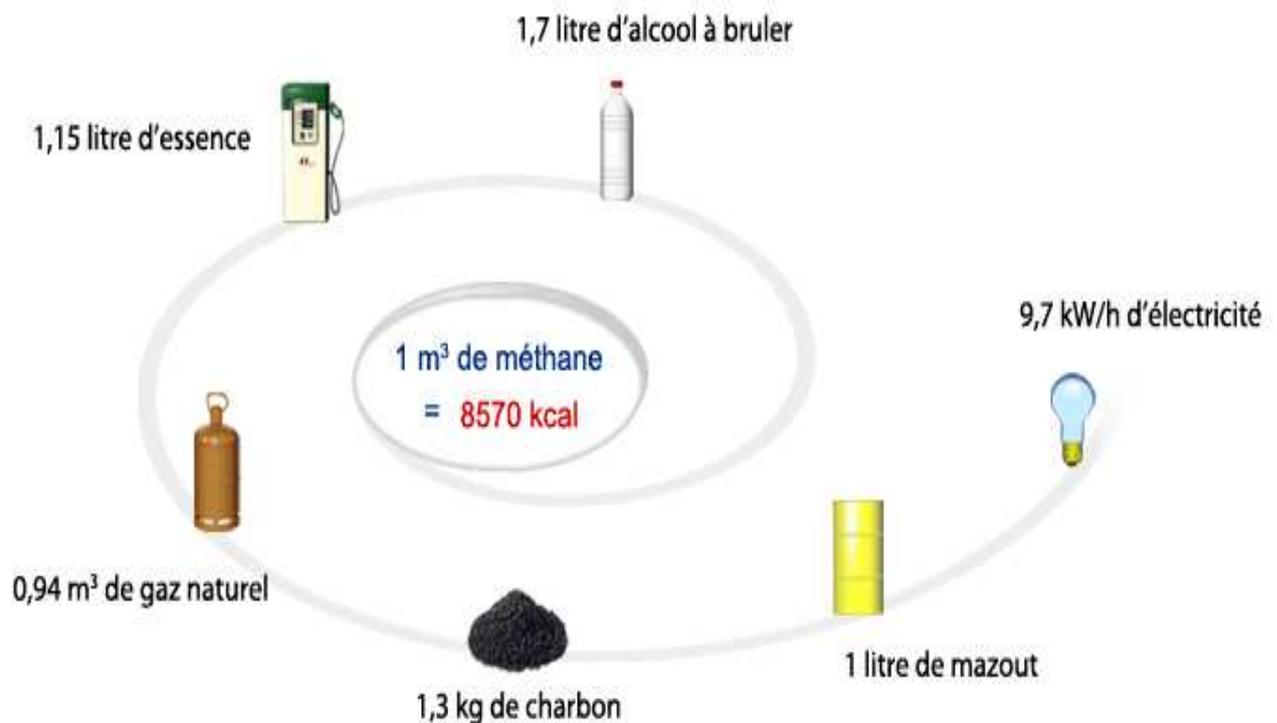


Figure N°9 : Equivalence énergétique d'un mètre cube de biogaz (avec une teneur en méthane de 50 %) [12].

8. Les avantages et les inconvénients de la Méthanisation :

La méthanisation des boues résiduelles présente de nombreux avantages, mais aussi des inconvénients à ne pas négliger, qui ont montré dans le tableau N°2.

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation

Tableau N°2 : les avantages et les inconvénients de la méthanisation.

Les avantages de la méthanisation	Les inconvénients de la méthanisation
<ul style="list-style-type: none">➤ Valorisation de la matière organique en énergie verte : le biogaz produit contribue notamment à l'autosuffisance énergétique des usines de traitement d'eaux usées➤ Stabilisation des boues [3]➤ La réduction des émissions de gaz à effet de serre (CH₄, CO₂) [9,26]➤ La production de fertilisants naturels [9,26]➤ La fermentation conduit à l'élimination d'une grande quantité de MO [9,26]➤ Une réduction du nombre de micro-organismes pathogènes [6,9]➤ Diminution de la consommation d'énergies fossiles [26]➤ Revente d'énergie renouvelable à un tarif préférentiel➤ Création d'emplois	<ul style="list-style-type: none">➤ Une forte sensibilité aux variations de charges et aux composés toxiques [27,28]➤ Une dégradation plus lente que pour les procédés aérobies [29]➤ Des coûts d'investissement importants➤ Les populations microbiennes sont sensibles aux perturbations, en particulier à l'oxygène et aux métaux lourds où encore aux surcharges organiques, et le procédé se révèle souvent instable [30]

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation

8.1 Suivi de l'unité de méthanisation :

La mise en place du suivi d'une unité de méthanisation est nécessaire pour :

- Contrôler son bon fonctionnement.
- Améliorer sa performance énergétique.
- Répondre aux exigences réglementaires.
- Éviter tout dysfonctionnement engendrant des surcoûts d'entretien et des
- Pertes de revenus par diminution de la production de biogaz.

Le dysfonctionnement d'une unité de méthanisation peut engendrer une baisse de la production de biogaz voire un arrêt total avec la mise en indisponibilité du digesteur. Ceci peut entraîner des coûts d'entretien et une perte de revenus sur plusieurs mois.

8.2. Quelques travaux récents sur la méthanisation :

De nombreuses études ont été entreprises pour évaluer les méthodes d'obtention de biogaz, et le potentiel des matières premières ou des boues d'où il découle. Aussi, la compréhension des conditions thermodynamiques, microbiologiques et la nature biochimique des boues ou des matières premières permettent d'optimiser le procédé d'obtention de biogaz en installation pilote et par extrapolation à l'échelle industriel. On va donner une synthèse bibliographique de certains travaux menés dans la production de biogaz, et des méthodes de caractérisation de la matière première utilisé et du gaz obtenu.

Siboukeuret *al* [31] ont réalisés une étude microbiologique de la digestion anaérobie des boues provenant des eaux usées de la station d'épuration de la ville de Touggourt, au sud-est de l'Algérie.

La digestion a été menée dans un réacteur de type discontinu, qui est muni de deux trous, l'un pour la collecte d'échantillons liquides à l'aide d'une seringue, le second pour assurer l'échappement du gaz et mesurer le volume de biogaz produit.

Dans leur travail, les auteurs ont entrepris une caractérisation physico-chimique et microbiologique des boues, et étudier l'influence de certains paramètres (pH, DCO, DBO₅), ainsi que la capacité des micro-organismes à dégrader les boues.

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation

D'après Siboukeur *et al* ;(2015) les résultats ont montré que :

1. Une chute de pH de 9,03 à la valeur de 6,99 dans le digesteur au cours des cinq premiers jours. Ceci est dû à la décomposition permanente de la matière organique et à la formation d'acides gras volatils dans le réacteur,
2. Une diminution de la valeur de la DCO et de la DBO₅ pendant la digestion. Cette diminution est due à la biodégradabilité des matières organique et inorganique qui se trouve dans les boues.
3. La concentration microbienne a diminué jusqu'à la fin de la digestion.

Benhamou et al [35] ont étudié les boues issues du traitement des eaux usées de la Wilaya de Boumerdes, afin d'évaluer la capacité de traitement des boues, d'estimer le risque de pollution et enfin de connaître leur réutilisation à des fins énergétiques en produisant du biogaz. Pour cela, ils ont mené une étude sur les boues physico-chimiques et bactériologiques.

Au préalable ils ont étudié 44 échantillons de boues déshydratées dans une station d'épuration des eaux usés, 42 pour une analyse physico-chimique et 2 autres pour une analyse microbiologique.

Les auteurs ont noté que le taux en matière organique, qui est un indice de stabilité, excède la norme, soit >40%, alors que le taux en métaux lourds est dans les normes.

Pour ce qui est de l'analyse microbiologique, ils ont mis en évidence la présence d'une grande diversité microbienne et ne sont que des exemples de nombreux micro-organismes pathogènes présents dans les boues et qui peuvent affecter la santé humaine d'une manière indirecte.

Concernant la production du Biogaz, la température de la boue et le pH ont été suivis dans le bio digesteur. Les auteurs ont noté que la température est moyenne et le pH passe par trois étapes :

1. Accumulation d'acides gras volatils qui a conduit à une chute rapide des valeurs de pH inférieures à 5,
2. Evolution la plus lente de 1 à 37 jour où le pH varie de 5,9 à 6,7,
3. Enfin stabilisation du pH aux alentours de 7 à partir de 47 jours.

Chapitre I : Généralités et Valorisation énergétique des boues par la méthanisation

L'augmentation du pH est considérée due au phénomène de l'acétogenèse et la formation du méthane.

Enfin, grâce à la CPG-SM (Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectroscopie de masse), les auteurs ont montré que le gaz méthane est majoritaire dans les gaz produit par le processus anaérobie.

9. Conclusion :

Les filières d'élimination des boues sont de plus en plus réglementées. La mise en décharge contrôlée où dans les CET est interdite par la réglementation, quant à l'incinération reste très coûteuse, alors que la troisième filière, en l'occurrence la valorisation agricole (épandage), elle très critiquée par l'opinion publique [10].

Il devient donc nécessaire de trouver des techniques plus performantes permettant de traiter, éliminer et valoriser les boues des STEP. Parmi les différents modes existants, il y'en a la bio méthanisation ou la digestion anaérobie [10].

CHAPITRE II

Matériels et méthodes

Chapitre II : Matériel et méthode

Notre étude expérimentale a été réalisée au laboratoire de Génie Mécanique de l'Université Mouloud Mammeri (Bastos), au laboratoire commun Science des matériaux de la Faculté de Génie de la Construction, au laboratoire d'analyse au niveau de la STEP EST de Tizi-Ouzou (ONA).

1. Présentation de la station d'épuration d'Est de TIZI OUZOU (STEP) :

Tizi-Ouzou est une ville du nord centre du pays, située à 120 Km à l'est d'Alger et à 30 Km des côtes méditerranéennes, et elle compte plus de 100 000 habitants.

La station d'épuration Est de la ville de Tizi-Ouzou (figure N°8) été conçue au début des années 90 et a été mise en marche en 2000.

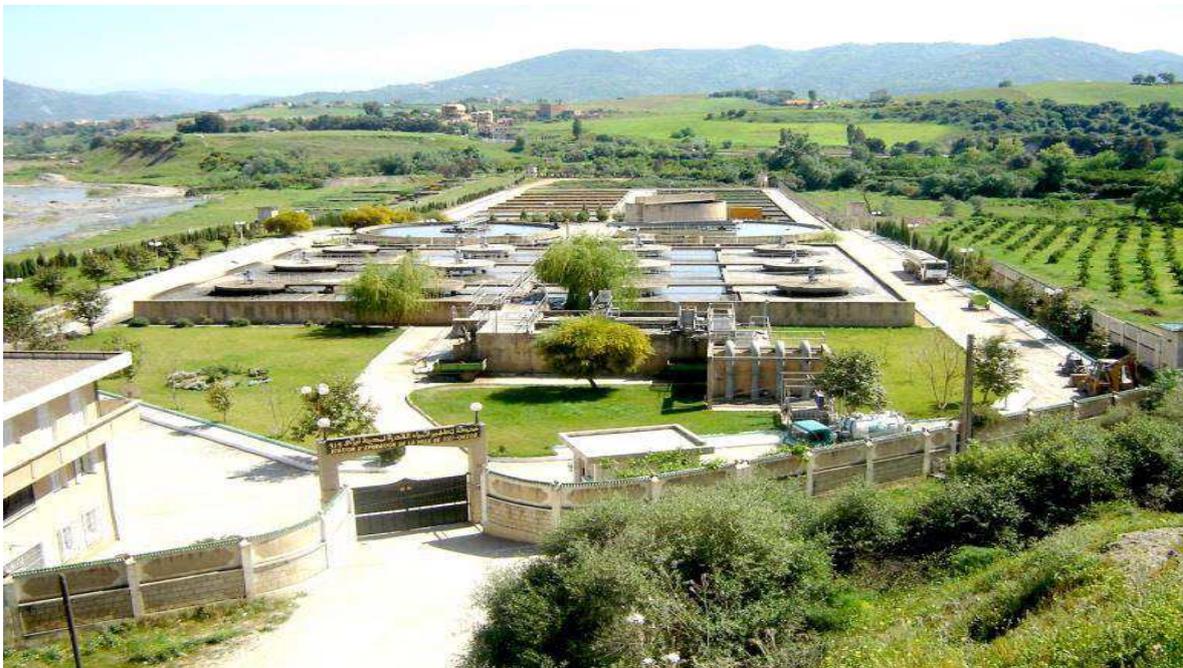


Figure N° 10: STEP Est de Tizi-Ouzou [33].

La STEP Est de Tizi-Ouzou d'une superficie de 35591 m² dont 14714 m² bâti, est un établissement d'une capacité de 120000 équivalents habitants, conçue pour épurer les eaux usées urbaines afin de protéger le milieu récepteur, en l'occurrence l'oued Sebaou.

Elle est située à la sortie Est de la ville de Tizi-Ouzou en dehors du tissu urbain, sur la rive gauche d'Oued Sebaou à 200 m en amont du Pont de Bougie sur le chemin de wilaya n° 124 reliant Tizi-Ouzou à Bejaia (figure N°9).

Chapitre II : Matériel et méthode

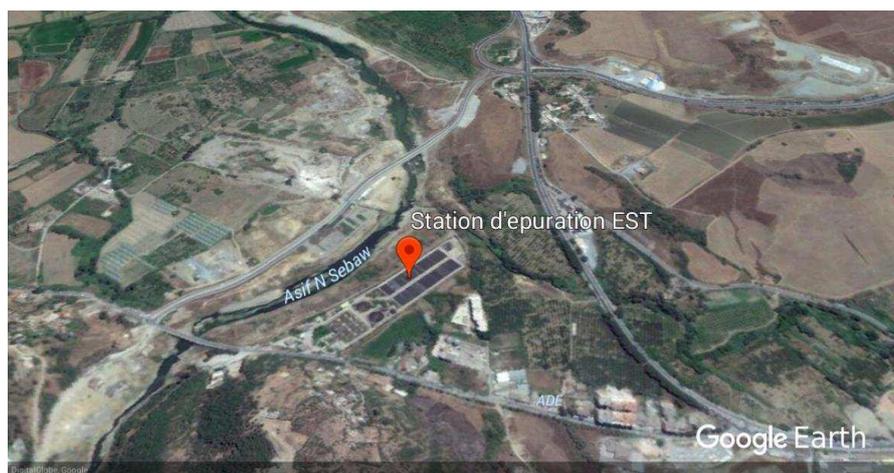


Figure N°11 : La situation géographique de la STEP [34].

1.1. Composition de la station :

La station d'épuration Est de la ville de Tizi-Ouzou est composée de plusieurs installations illustrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau N°(4) : Les différentes installations de traitement dans la STEP.

Les différents traitements	Nom de l'installation	Nombre
Prétraitement	Dégrilleur Dégrillage grossier (manuel) Dégrillage fin (mécanisé et manuel)	1
	Déssableur-déshuileur	2
Traitement secondaire	Bassin d'aération	2
Clarification	Décanteur	2
Stabilisation	Bassin de stabilisation	2
Epaississement	Epaississeur	1
Déshydratation	Lit de séchage	20

2. Techniques d'épuration des eaux usées :

2.1. Les prétraitements :

- **Le relevage** : On se sert de pompe de relevage pour le transport des eaux usées vers la station d'épuration, lorsque ces dernières arrivent à un niveau plus bas que les installations de dépollutions. Les prétraitements servent à éliminer les gros éléments, qui pourraient gêner les traitements ultérieurs et endommager les équipements [37].
- **Le dégrillage** : consiste à faire passer les eaux usées au travers d'une grille dont les barreaux retiennent les gros éléments. Après nettoyage des grilles par des moyens mécaniques, manuels ou automatiques, les déchets sont évacués avec les ordures ménagères.



Figure N°12 : Photo du dégrilleur mécanique. [41]

- **Dessablage et déshuilage** : élimine la présence de graisses qui pourraient gêner l'efficacité des traitements biologiques qui interviennent ensuite. Le dégraissage s'effectue par flottation. Les graisses sont raclées à la surface, puis stockées avant d'être éliminées (mise en décharge ou incinération). Elles peuvent aussi faire l'objet d'un traitement biologique spécifique au sein de la station d'épuration [37].

On enlève ainsi de l'eau les éléments grossiers et les sables de dimension supérieure à 200 microns ainsi que 80 à 90 % des graisses et matières flottantes. [38]



Figure N°13 : Photo du déssableur-déshuileur. [41]

2.2. Traitement primaire (physico-chimiques) :

Ils sont consacrés pour les traitements primaires et tertiaires, ils utilisent des moyens physiques (décantation, flottation, filtres et membranes) et/ou des produits chimiques, notamment des coagulants (Chlorure ferrique, Sulfate d'aluminium...) ; et une désinfection par le chlore, l'ozone ou la chaux (pour éliminer les germes pathogènes). Chaque étape produit à son tour des sous-produits (déchets grossiers, sable et surtout les boues constituées de bactéries mortes) qu'il faut éliminer [39].

2.3. Traitement secondaire (biologique) :

Bassin d'aération : L'eau passe dans un bassin d'aération où sont ajoutées des bactéries qui se nourrissent des impuretés dissoutes et permettent d'éliminer petit à petit la pollution. Cette pollution est microscopique. Il n'est pas possible de la distinguer à l'œil nu. Ces minuscules êtres vivants, les bactéries, vont se charger d'éliminer la pollution, exactement comme dans un cours d'eau. La seule différence, c'est que dans une station d'épuration ce phénomène est concentré et intensifié pour faire face à la quantité de matière polluante qui est rejetée chaque jour.

Ce traitement biologique repose donc sur l'action des bactéries. Tout comme nous, elles ont

Chapitre II : Matériel et méthode

besoin d'oxygène pour vivre. De l'air est régulièrement insufflé dans les eaux usées pour favoriser leur développement. Cette étape se déroule dans le bassin d'aération. [40]



Figure N°14 : Photo du bassin d'aération. [41]

2.4. Clarification :

➤ **Décanteur :**

Le bon fonctionnement d'une station d'épuration par boues activées exige de bien séparer l'eau traitée de la masse de boue activée de manière à produire un effluent clarifié conforme aux normes de rejet. [41]



Figure N°15 : Photo du décanteur. [41]

2.5. Stabilisation :

- **Bassin de stabilisation :** Après oxyder toute la matière organique polluante biodégradable, les micro-organismes, présentés dans les boues activées en excès et mixtes, nécessitent un apport supplémentaire d'oxygène. Pour ce fait, la boue mixte est introduite en tête du bassin de stabilisation. [41]



Figure N°16 : Photo du bassin de stabilisation. [41]

2.6. Epaissement :

- **Epaisseur :** Les boues ainsi stabilisées seront injectées en tête de l'épaisseur, afin d'améliorer la concentration de ces boues en termes de matières solides. En effet, la concentration de la boue stabilisée avant l'épaissement est de l'ordre 28 g/l, quant à l'après épaissement, elle peut atteindre 35 g/l. [41]



Figure N°17 : Photo de l'épaississeur. [41]

2.7. Déshydratation :

➤ Lits de séchage :

La station est équipée par vingt lits de séchage dont les dimensions de chaque lit sont : (Longueur : 35m, largeur: 13 m, hauteur:1 m). [41]



Figure N°18 : Photo des lits de séchage des boues. [41]

2.8. Estimation de la production et la destination finale des boues de la STEP

Le traitement des eaux usées urbaine de la STEP Est de Tizi-Ouzou produit environ 383 tonne par an de boues (exprimée en MS). La quantité des boues produites dans cette STEP durant ces dernières années est illustrée dans la figure N°19.

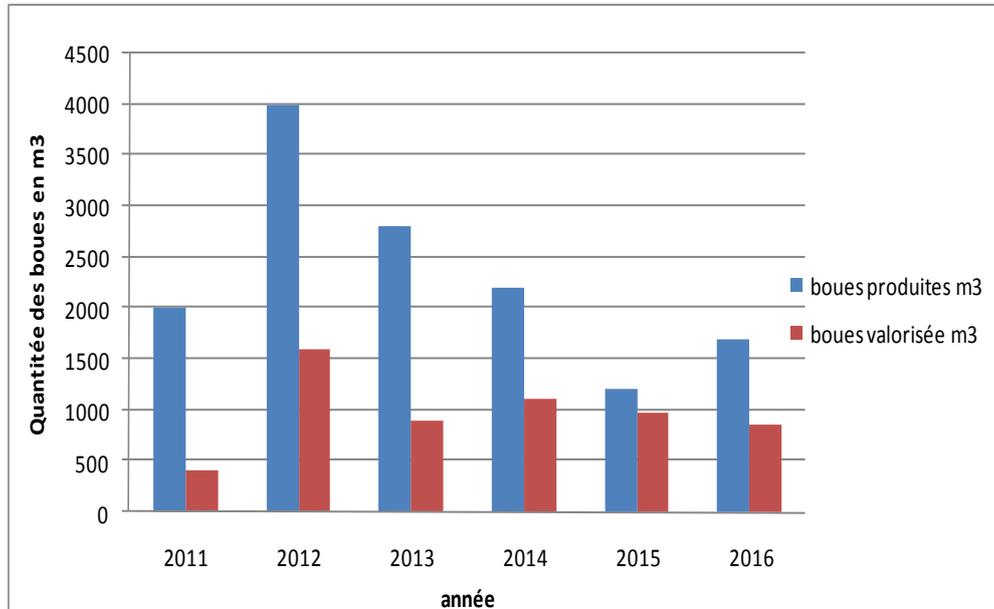


Figure N° 19: quantités des boues produites et valorisée dans la STEP Est de Tizi-Ouzou durant les dernières années [42].

Actuellement, dans la STEP Est de Tizi-Ouzou il existe trois filières d'élimination des boues. La figure N°11 montre le pourcentage des boues destinée pour chaque filière.

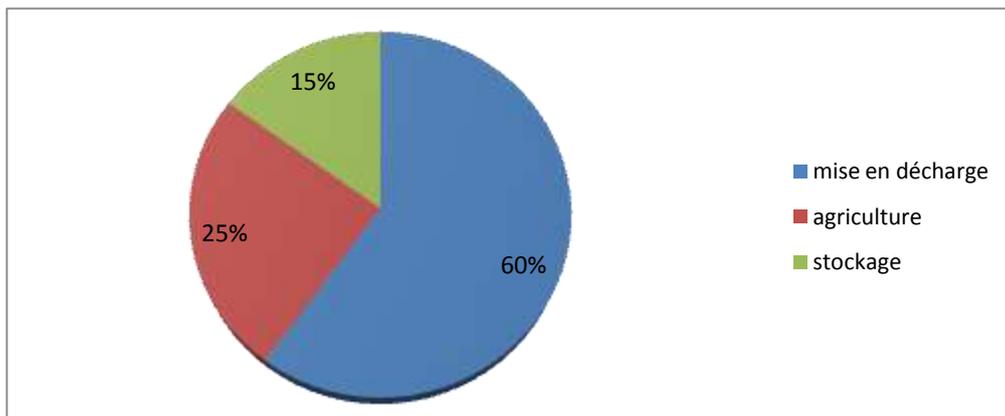


Figure N° 20 : destination final des boues [42].

Chapitre II : Matériel et méthode

3. Les paramètres caractéristiques des boues :

3.1 La charge massique C_m :

C_m est le rapport entre la masse de nourriture arrivant quotidiennement dans le bassin d'aération ramenée et la quantité de matière active présente. C_m s'exprime donc comme suit

Selon la valeur de C_m , on définit le type de charge. On distinguera la forte ($0,4 < C_m < 1,2$), moyenne ($0,15 < C_m < 0,4$), faible ($0,07 < C_m < 0,15$) et très faible ($C_m < 0,07$) charge ou aération prolongée.

$$C_m = QS_0/VX$$

Avec :

Q : le débit journalier entrant dans le bassin d'aération [$m^3 \cdot j^{-1}$]

S_0 : Substrat à l'entrée de l'aérateur [$kg \cdot m^{-3}$]

VBA : volume du bassin d'aération [m^3]

X : concentration en MS des boues dans le bassin d'aération [$kg \cdot m^{-3}$]

Le mode de calcul pris en compte par certains exploitants, est plus avant-gardiste. Il fait apparaître une estimation de la quantité de boue dans le clarificateur :

Remarque :

Si cette concentration massique est élevée le temps de séjour dans le bassin d'aération est long, ce qui nécessite un grand volume de bassin, et de ce fait décantent lentement dans le clarificateur donc il faut prévoir une surface plus importante de décanteur aussi le dispositif d'aération est plus puissant (la consommation d'énergie sera également plus importante).

Application : STEP (ONAS)

Substrat à l'entrée de l'aérateur $S_0=400\text{ppm}$

Débit de l'effluent à l'entrée de l'aérateur $Q=110000 \text{ m}^3 \cdot j^{-1}$

Volume utile du bassin d'aération $V=60000 \text{ m}^3$

Matières en suspension dans l'aérateur $X=3500 \text{ ppm}$

$$C_m = QS_0/VX$$

Chapitre II : Matériel et méthode

AN : $C_m = 0,29 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$

3.2 Le temps de séjour (t s)

C'est le temps de séjour hydraulique de l'eau dans un bassin, il correspond au rapport du volume du bassin [V] sur le débit de l'effluent entrant [Q].

$$T_s = V [\text{m}^3] / Q [\text{m}^3/\text{h}]$$

On distinguera le temps de séjour sur le débit moyen en 24 h.

Exemple : une station équipée d'un bassin d'aération de $5\,150 \text{ m}^3$, reçoit un débit moyen 24 h [Q24] de $160 \text{ m}^3/\text{h}$.

Le temps de séjour dans le bassin d'aération sera :

- sur le Q24 : $T_s \text{ moyen} = 5150/160 = 32,2$ heures

Un temps de séjour élevé dans le bassin d'aération permettra une élimination poussée de la pollution carbonée et azotée.

3.3 L'âge des boues :

L'Age des boues représente le temps de séjour des boues dans le bassin d'aération : celui-ci plus important que le temps de séjour de l'eau à traiter du fait de la recirculation des boues décantées.

Il correspond au rapport de la quantité de boues présentes, en kg MS., dans le bassin d'aération [S] sur la quantité de boues en excès [E] à évacuer par jour, en kg MS/j.

$$A = S/E = V_{BA} \times [MS]_{BA} / Q_E \times [MS]_E$$

VBA : Volume du bassin d'aération [m^3]

[MS] BA : Concentration des boues activées en [kg / m^3] en MS (Matières sèches)

QE : Débit journalier [m^3/j] d'extraction des boues

[MS] E : Concentration des boues en excès en [kg/m^3] MS

Exemple : une station est équipée d'un bassin d'aération de $5\,150 \text{ m}^3$ concentration des boues activées : 3 g/l concentration des boues en excès : 6 g/l

Débit d'extraction : $100 \text{ m}^3/\text{j}$

Chapitre II : Matériel et méthode

$$\text{Age des boues} = \text{VBA} \times [\text{MS}] \text{ BA} / \text{QE} \times [\text{MS}] \text{ E}$$

$$\text{AN} : 5\ 015 \times 3 / 100 \times 6 = 25,8 \text{ jours}$$

Un âge des boues élevé témoigne d'une boue bien développée, ce qui est favorable à une bonne élimination de la pollution.

Pour la production de boues dans le cas d'effluents domestiques et pour les stations à aération prolongée, on retiendra une production de boues égale à 80 % de la charge en DBO éliminée [Le].

$$P = 0,8 \times \text{Le}$$

P = Production journalière de boues [kg MS]

Le = Masse journalière de DBO éliminée [kg DBO/j].

Exemple : une station reçoit 1000 kg de DBO/j et a un rendement épuratoire de 95 % sur ce paramètre.

$$\text{Masse de DBO5 éliminée/j} : \text{Le} = 1000 \times 0,95 = 950 \text{ kg DBO/jour}$$

$$\text{Production de boues} : P = 0,8 \times \text{Le} = 0,8 \times 950 = 760 \text{ kg MS.}$$

En pratique, on calculera la production de boues sur la quantité de DBO reçue (1000 kg/j dans l'exemple). [23]

4. Matériel d'étude

4.1. Description du bio- digesteur

Le bio-digesteur utilisé est un dispositif de 5 litre en plastique d'une forme cylindrique est muni de deux trous, tel que montre le schéma sur la figure N°21 et l'image dans la figure°22. Nous avons fixé au premier un entonnoir pour l'entrée des boues, le deuxième est pour assurer l'échappement du gaz produit et l'acheminement dans un ballon pour la récupération du biogaz.

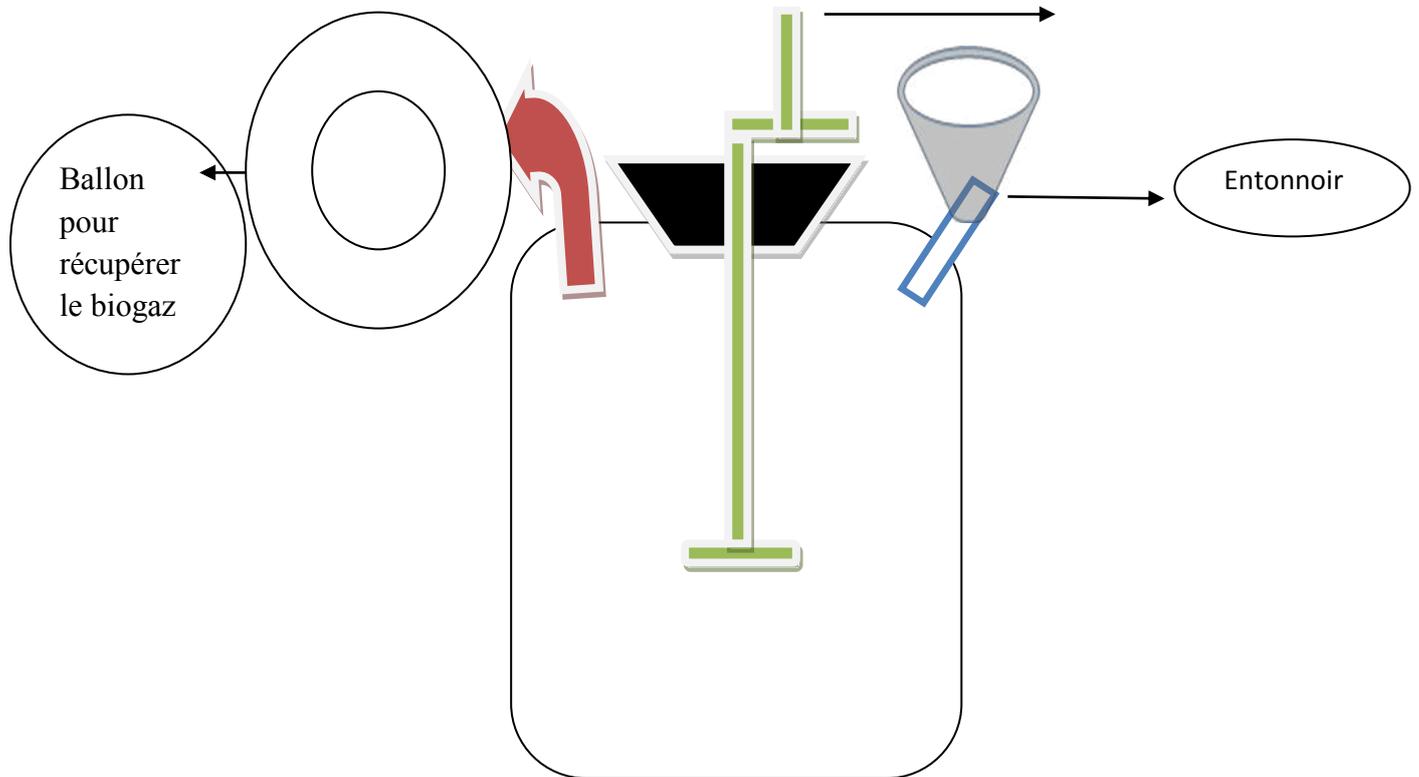


Figure N°21:Schéma du bio digesteur



Figure N°22 : Image du dispositif (photo originale, 2017).

4.2. Le substrat utilisé

L'échantillon de boues est obtenu de la station d'épuration d'Est de Tizi-Ouzou (ONA) a été prélevés le 18 Septembre 2017 du stade d'épaississement de la boue stabilisé. Cette boue de consistance liquide est recueillie le jour même du lancement de l'expérience pour éviter toute dégradation de la matière organique avant utilisation.

Pour la réalisation de notre étude, nous avons utilisé plusieurs matériels et réactifs qui se trouvent en annexe 1.



Figure N°23 : La boue utilisée (photo originale, 2017).



Figure N°24 : lancement de l'expérience (photo originale, 2017).

- Cet équipement électrique s'agit d'une alimentation qui réduit le courant jusqu'à 12V et un module thermocouple qui affiche les températures.

5. Les analyses physico-chimiques des boues :

5.1. Mesure du pH :

Le pH est la mesure de l'acidité ou de la basicité d'une solution. Il est un facteur important dans le processus de méthanisation. Il doit se situer dans un intervalle compris entre 5.5 et 7. Un pH ne se situant pas dans cette fourchette de mesure entraînerait un déséquilibre d'ordre chimique, mais également d'ordre biologique au sein de la population bactérienne, et par conséquent un dysfonctionnement total au niveau du processus [9, 13]

Pour mesurer et déterminer le pH on a suivi les étapes suivantes :

1. Nous avons employé un pH mètre à électrode combinée et étalonnée à l'aide d'une solution étalon de pH connu (7,4) ;
2. a 25 g de boue sont ajoutée 250 ml d'eau distillé, le mélange s'effectue par agitation légère à l'aide d'un agitateur magnétique ;
3. après centrifugation, filtration ou décantation de la solution ;

Chapitre II : Matériel et méthode

4. mesure du pH sur le surnageant ;
5. la valeur du pH est donnée par l'appareil illustré dans la figure N°25.



Figure N°25: pH Mètre de type HANNA HI2210 (photo originale, 2017).

5.2. Détermination de taux de matière sèche (MS) :

La boue est constituée d'eau et de matière sèche (MS). Le pourcentage en MS représente la Siccité.

$$\text{Boue} = \text{eau} + \text{matière sèches}$$

$$100\% = \text{Humidité (\%)} + \text{Siccité (\%)}$$

La matière sèche (MS), est ce que l'on obtient lorsqu'on retire l'eau d'un produit. Le pourcentage de MS est le ratio entre le poids de la matière séchée et la masse de la matière non-séchée (hydratée). La concentration en MS permet de connaître la quantité de boues à traiter [13].

Pour déterminer le taux de matière sèche, que la figure N°26 illustre, on a suivi les étapes ci-après :

1. nous avons pesé un papier filtre (sa masse est notée P_0) ;
2. nous avons filtré 100 ml de boue a l'aide du filtre préalablement pesé ;

Chapitre II : Matériel et méthode

3. après filtration, nous avons mis le papier filtre dans une coupelle, puis le tout à l'étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant ;
4. nous avons pesé une deuxième fois ce filtre (sa masse est notée P_1) ;
5. nous avons calculé la concentration des MS avec cette formule :

$$MS\% = P_1 - P_0 \times 1000/V$$

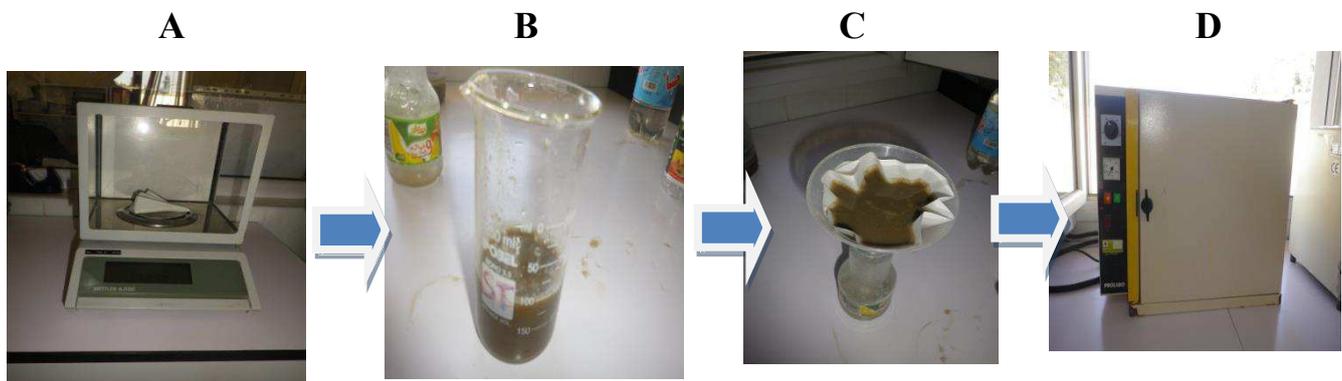


Figure N°26 : Les étapes de détermination de la MS (photos originale, 2017).

5.3. Détermination de la teneur en matière organique :

La matière sèche est constituée de matières minérales (MM) et de matières organiques (MO), ces derniers appelés matière volatiles sèches (MVS). La détermination de taux de matière volatil est une certes une évaluation grossière de la matière organique, toutefois, le suivi de ce taux permet de connaître la stabilité d'une boue d'épuration. Plus le taux de MVS est faible, plus la boue est facile à épaissir ou à déshydrater [4].

Pour la détermination de la teneur en matière organique ou le taux des MVS on a suivi les étapes suivantes :

1. nous avons introduit dans une coupelle de poids connu P_0 une quantité de boue ; placé la coupelle dans une étuve à 105° jusqu'à évaporation totale ;
2. Après refroidissement nous avons pesé la coupelle (P_2) ;
3. Puis nous avons procédé à une calcination à 550° pendant 2h ;
4. Une fois la coupelle est refroidie on a procédé à une dernière pesée pour avoir le poids (P_3), et on a calculé la concentration des MVS selon cette formule :

$$\boxed{MO = MVS}$$

$$MVS = \left(\frac{P_2 - P_3}{P_2 - P_0} \right) \times 100$$

Avec : (P2- P0) : détermine le poids des MS

5.4. Détermination de demande biologique en oxygène (DBO₅) :

La DBO est la consommation en oxygène des micro-organismes présents dans le milieu en essai pour assimiler les substances organiques présentes dans ce même milieu. La durée de l'essai est de cinq jours d'où le nom de DBO₅ [13].

Durant cette période, la consommation en oxygène provient de deux réactions. D'une part, il se produit une oxydation lente par voie chimique des composés organiques ou minéraux réducteurs en présence d'oxygène dissous. D'autre part, les micro-organismes présents dans le milieu consomment de l'oxygène pour métaboliser les matières organiques assimilables. La connaissance de cette valeur permet d'évaluer la charge polluante contenue dans la boue

La détermination de la DBO₅, se fait par les étapes suivantes :

1. remplir une bouteille ombrée avec 150ml de boue ;
2. mettre un Oxymétrie ;
3. Ensuite, placer dans le DBO mètre (enceinte réfrigéré) à température constante 20°C et à l'obscurité pendant 5 jours. Au bout de 5 jours on procède à la lecture.

✓ La procédure nous a été fournie par l'ONA

5.5. Détermination de demande chimique en oxygène (DCO) :

La DCO est la quantité d'oxygène consommée par les matières oxydables dans des conditions de l'essai. Contrairement à la DBO₅ où l'oxydation se fait lentement par l'activité

Chapitre II : Matériel et méthode

des microorganismes, l'oxydation pour la mesure de la DCO est provoquée à l'aide d'un oxydant (bichromate de potassium) et des conditions données (ébullition, catalyseur, ...).

Alors que la DBO_5 ne mesure que la matière organique naturellement et rapidement dégradable, la DCO permet de mesurer la majeure partie de la matière organique biodégradable et peu dégradable. C'est pourquoi les valeurs de la DCO sont nécessairement supérieures aux valeurs de la DBO_5 . Le rapport DCO/DBO_5 permet d'évaluer le caractère biodégradable de la matière organique [13].

Pour la détermination de la DCO :

1. Prendre 10 ml de boue ;
2. Ajouter 5ml de dichromate de potassium, 15 ml d'acide sulfurique ;
3. Mettre ce derniers dans le réacteur à DCO pendant 2h de temps à $150^{\circ}C$, et après refroidissement ajouter 45ml d'eau distillé ;
4. procéder à la titration avec le sulfate de fer et d'ammonium ;
5. faire une lecture sur la burette.

Le résultat nous a était fournis par l'ONA

5.6. Le rapport DCO/DBO_5

Comme on l'a déjà signalé, la DCO est une mesure des matières organiques biodégradables et non biodégradables, et la DBO_5 une mesure des matières organiques biodégradables.

Pour vérifier l'efficacité des bactéries dans la dégradation de la pollution, on calcule le rapport entre la DCO et la DBO_5 , appelé rapport de biodégradabilité [9]:

- Si DCO/DBO_5 est supérieur à 3, la pollution est peu ou pas biodégradable ;
- Si DCO/DBO_5 inférieur à 2.5 indique une bonne biodégradabilité [9].

6. Analyses du biogaz par chromatographie en phase gazeuse (CPG)

Le principe de la chromatographie repose sur un équilibre de concentrations des composés présents entre deux phases en contact : la phase stationnaire et la phase mobile (gaz ou liquide) qui se déplace. La séparation est basée sur la différence d'entraînement des

Chapitre II : Matériel et méthode

constituants du mélange à séparer. Cette différence est lié aux propriétés intrinsèques des constituants du mélange (taille, structure, ...) ou à leur affinité avec la phase stationnaire (polarité, ...).

La CPG est une technique de séparation des molécules. Elle est utilisée pour repérer les substances qui composent un mélange gazeux ou susceptibles de le devenir sans décomposition par chauffage

Dans ce présent mémoire, on a utilisé pour l'analyse de biogaz un appareil de chromatographie en phase gazeuse de type SHIMADZU GC-2014 (voir figure n°27,28) équipé de deux détecteur FID et TCD.

La séparation des différents gaz (CH_4 , CO_2 , H_2S) a été faite sur un détecteur TCD et FID.

Les échantillons ont été analysés dans les conditions suivantes: température de l'injecteur 100°C , température des détecteurs 100°C , volume du gaz injecté 1 ml, gaz vecteur Argon.



Figure N°27 : Appareil d'analyse de biogaz (CPG), (SHIMADZU GC-2014), (photo originale, 2017).



Figure N°28 : La mesure du biogaz par la CPG (photo originale,)

CHAPITRE III

Bilan énergétique et discussion des résultats

Table des matières

1. Introduction :	2
2. Procédés de production du biogaz :	2
2.1. Procédé mésophile [32 – 42°C] :	2
2.1.1. La quantité de chaleur fournie à l'eau dans le procédé mésophile :	2
2.1.2. La puissance fournie à l'eau dans le procédé mésophile :	Error! Bookmark not defined.
2.1.3. La variation de la puissance fournie à l'eau en cours de temps dans le procédé mésophile :	Error! Bookmark not defined.
2.2. Procédé thermophile [50 – 57°C] :	Error! Bookmark not defined.
2.2.1. La quantité de chaleur fournie à l'eau dans le procédé thermophile :	Error! Bookmark not defined.
2.2.2. La puissance fournie à l'eau dans le procédé thermophile :	Error! Bookmark not defined.
2.2.3. La variation de la puissance fournie à l'eau en cours de temps dans le procédé thermophile :	Error! Bookmark not defined.
2.3.1. La quantité de chaleur fournie à la cuve (digesteur) dans le procédé mésophile :	Error! Bookmark not defined.
2.3.2. La puissance fournie à la cuve (digesteur) dans le procédé mésophile :	Error! Bookmark not defined.
2.3.3. La variation de la puissance fournie à la cuve (digesteur) en cours de temps dans le procédé mésophile :	Error! Bookmark not defined.
2.4.1. La quantité de chaleur fournie à la cuve (digesteur) dans le procédé thermophile :	Error! Bookmark not defined.
2.4.2. La puissance fournie à la cuve (digesteur) dans le procédé thermophile :	Error! Bookmark not defined.
2.4.3. La variation de la puissance fournie à la cuve (digesteur) en cours de temps dans le procédé thermophile :	Error! Bookmark not defined.
3. Propriétés du biogaz produit :	Error! Bookmark not defined.
4. Bilan de matière et bilan énergétique :	Error! Bookmark not defined.
4.1. Production de méthane :	Error! Bookmark not defined.
4.2. Energie totale disponible annuellement « Et » :	Error! Bookmark not defined.
4.3. Energie valorisable annuellement « Ev » :	55
5. Détection de la composition de biogaz :	55
5.1. Le détecteur TCD :	55
5.2. Le détecteur FID :	56
5.3. Détection de CO ₂ pure :	60
6. Conclusion :	60

Chapitre III : Bilan Energétique et Discussion des Résultats.

1. Introduction :

Le digesteur est une cuve d'une forme bien déterminée contenant les matières organiques valorisables, où se produit le biogaz par un procédé de conversion méthanogène. Il est conçu de manière à garder la matière organique en décomposition dans les conditions d'humidité et d'absence d'oxygène favorisant ainsi la production de biogaz.

Dans ce chapitre on va comparer les deux procédés mésophile et thermophile, discuté sur les résultats obtenus (le biogaz) et comment déterminer sa composition avec un chromatographe en phase gazeuse (CPG).

Premièrement on va comparer les deux procédés mésophile et thermophile, selon notre théorie la digestion mésophile est la plus utilisée car la production de biogaz est assez rapide.

2. Procédés de production du biogaz :

2.1. Procédé mésophile [32 – 42°C] :

La plupart des bactéries que contient le corps de l'homme sont des bactéries mésophiles pour lesquelles la température idéale pour le bon développement doit être de 37 °C.

- **Première expérience** : on a fait chauffer l'eau avec une résistance de 1000 W et varié la température en cours de temps jusqu'à 42°C, après on a capté les différentes températures avec un module thermocouple.

2.1.1. La quantité de chaleur fournie à l'eau dans le procédé mésophile :

- On Calcule la chaleur fournie à l'eau Q_e avec l'équation suivante :

$$Q_e = M_e C_{p_e}(T_f - T_i)$$

Avec :

M_e : la masse de l'eau dans le récipient en [Kg]

C_{p_e} : chaleur spécifique de l'eau en [J/Kg. °C]

T_f : la température limite du procédé mésophile en [°C]

1. Introduction :

Le digesteur est une cuve d'une forme bien déterminée contenant les matières organiques valorisables, où se produit le biogaz par un procédé de conversion méthanogène. Il est conçu de manière à garder la matière organique en décomposition dans les conditions d'humidité et d'absence d'oxygène favorisant ainsi la production de biogaz.

Dans ce chapitre on va comparer les deux procédés mésophile et thermophile, discuté sur les résultats obtenus (le biogaz) et comment déterminer sa composition avec un chromatographe en phase gazeuse (CPG).

Premièrement on va comparer les deux procédé mésophile et thermophile, selon la théorie des conditions de la réaction de méthanisation (température) la digestion mésophile est la plus utilisée car la production de biogaz est assez rapide.

2. Procédés de production de biogaz :

2.1. Procédé mésophile [32 – 42°C] :

La plupart des bactéries que contient le corps de l'homme sont des bactéries mésophiles pour lesquelles la température idéale pour le bon développement doit être de 37 °C.

- **Première expérience** : on a fait chauffer l'eau avec une résistance de 1000 W et varié la température en cours de temps jusqu'à 42°C, après on a capté les différentes températures avec un module thermocouple.

2.1.1. La quantité de chaleur fournie à l'eau dans le procédé mésophile :

- On Calcule la chaleur fournie à l'eau Q_e avec l'équation suivante :

$$Q_e = M_e C_{pe} (T_f - T_i)$$

Avec :

M_e : la masse de l'eau dans le récipient en [Kg]

Chapitre III : Bilan Energétique et Discussion des Résultats.

C_{pe} : chaleur spécifique de l'eau en [J/ Kg. °C]

T_f : la température limite du procédé mésophile en [°C]

T_i : la température ambiante de l'eau en [°C]

A. N. : $Q_e = 8 * 4180 * (42 - 26,3) = 525008$ joule

2.1.2. La puissance fournie à l'eau dans le procédé mésophile :

- On Calcule la puissance fournie à l'eau noté P avec l'équation suivante :

$$P = Q_e / t$$

Avec :

Q_e : la chaleur fournie à l'eau en joule

t : le temps de chauffe jusqu'à 42°C en seconde

A.N. : $P = 525008 / 1940 = 270,62$ W

2.1.3. La variation de la puissance fournie à l'eau en cours de temps dans le procédé mésophile :

- On a pris les différentes quantités de chaleur fournie qui varie au cours de temps et on a divisé sur le temps de chauffe pour trouver la variation de puissance fournie à l'eau, et on a obtenu le graphe suivant :

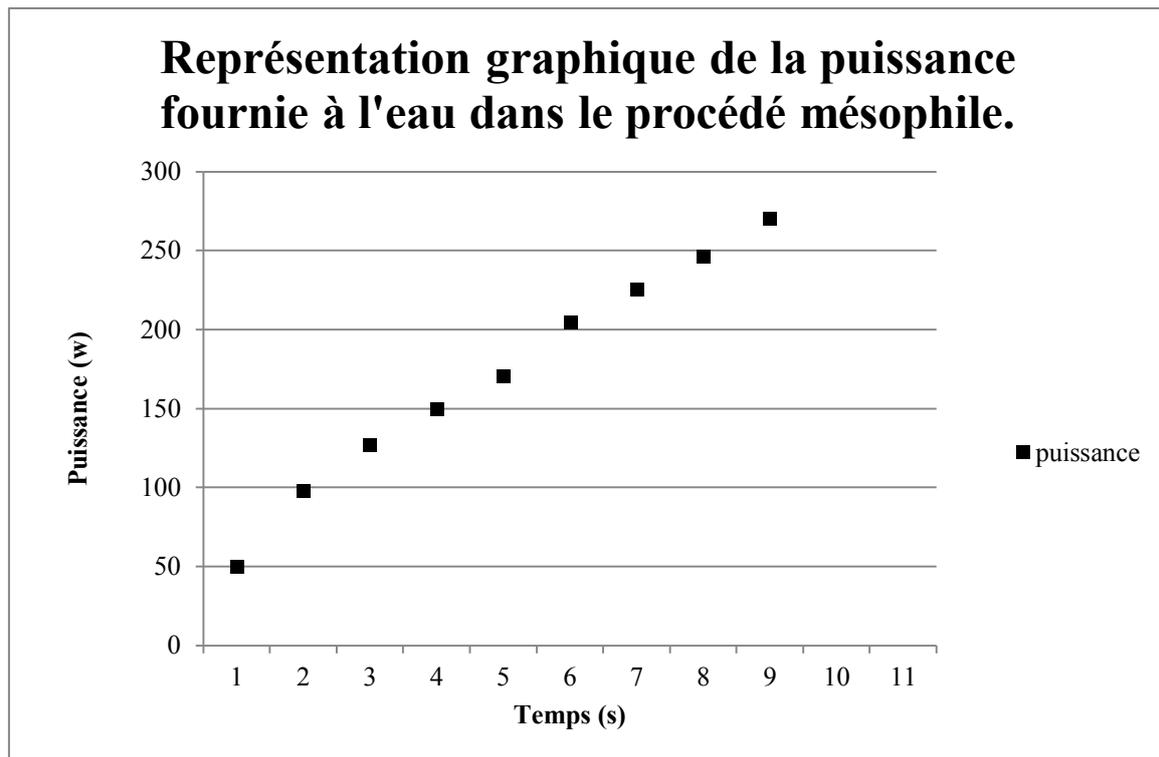


Figure N° 29 : Représentation graphique de la puissance fournie à l'eau dans le procédé mésophile.

2.2. Procédé thermophile [50 – 57°C] :

Les organismes thermophiles peuvent vivre et se multiplier entre 50 et 70 °C. Ils peuvent croître entre 25 et 40 °C mais faiblement, Il existe des organismes thermophiles qui ne peuvent pas vivre à des températures supérieures à 60 °C.

- **Deuxième expérience** : on a fait chauffer l'eau avec une résistance de 1000 W et varié la température en cours de temps jusqu'à 57°C, après on a capté les différentes températures avec un module thermocouple.

2.2.1. La quantité de chaleur fournie à l'eau dans le procédé thermophile :

- On Calcule la chaleur fournie à l'eau noté Q_e avec l'équation suivante :

Chapitre III : Bilan Energétique et Discussion des Résultats.

$$Q_e = M_e C_{pe} (T_f - T_i)$$

Avec :

M_e : la masse de l'eau dans le récipient en [Kg]

C_{pe} : chaleur spécifique de l'eau en [J/ Kg. °C]

T_f : la température limite du procédé thermophile en [°C]

T_i : la température ambiante de l'eau en [°C]

A.N. : $Q_e = 8 * 4180 * (57 - 26,3) = 1026608$ joule

2.2.2. La puissance fournie à l'eau dans le procédé thermophile :

➤ On Calcule la puissance fournie à l'eau noté P avec l'équation suivante :

$$P = Q_e / t$$

Avec :

Q_e : la chaleur fournie à l'eau en joule

t : le temps de chauffe jusqu'à 57 °C en seconde

A.N. : $P = 1026608 / 4080 = 251,61$ W

2.2.3. La variation de la puissance fournie à l'eau en cours de temps dans le procédé thermophile :

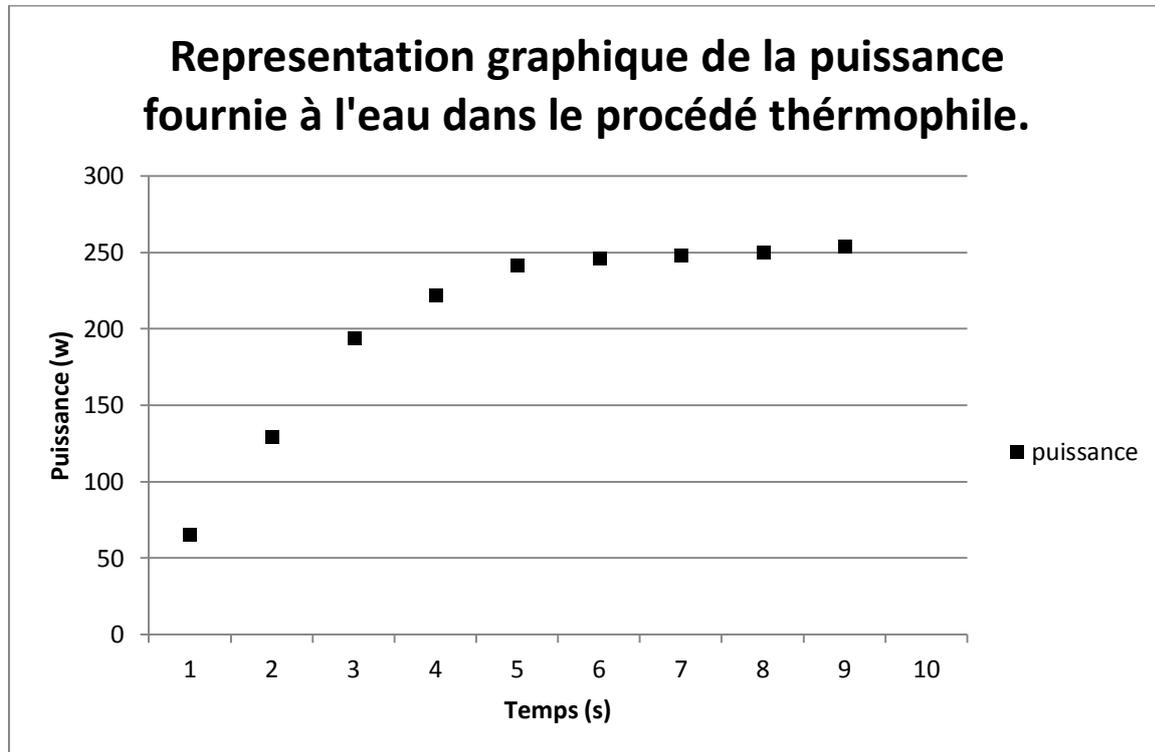


Figure N° 30 : Représentation graphique de la puissance fournie à l'eau dans le procédé thermophile.

- **Remarque :** la puissance fournie à l'eau dans le procédé mésophile est supérieure à celle de procédé thermophile.

- **Troisième expérience :** on a fait chauffer l'eau avec une résistance de 1000 W et on varie la température en cours de temps jusqu'à 42°C (procédé mésophile), après on a introduit le capteur thermocouple dans la cuve (digesteur) pour capter les différentes températures.

2.3.1. La quantité de chaleur fournie à la cuve (digesteur) dans le procédé mésophile :

Chapitre III : Bilan Energétique et Discussion des Résultats.

- On Calcule la chaleur fournie à la cuve (digesteur) noté Q_c avec l'équation suivante :

$$Q_c = M_e C_{p_e} (T_f - T_i)$$

Avec :

M_e : la masse de l'eau dans le récipient en [Kg]

C_{p_e} : chaleur spécifique de l'eau en [J/ Kg. °C]

T_f : la température limite du procédé mésophile en [°C]

T_i : la température ambiante dans la cuve (digesteur) en [°C]

A.N. : $Q_c = 8 * 4180 * (42 - 27,3) = 491568$ joule

2.3.2. La puissance fournie à la cuve (digesteur) dans le procédé mésophile :

- On Calcule la puissance fournie à la cuve (digesteur) noté P avec l'équation suivante :

$$P = Q_c / t$$

Avec :

Q_c : la chaleur fournie à la cuve (digesteur) en joule.

t : le temps de chauffe jusqu'à 42 °C en seconde.

A.N. : $P = 491568 / 1400 = 351,12$ W

2.3.3. La variation de la puissance fournie à la cuve (digesteur) en cours de temps dans le procédé mésophile :

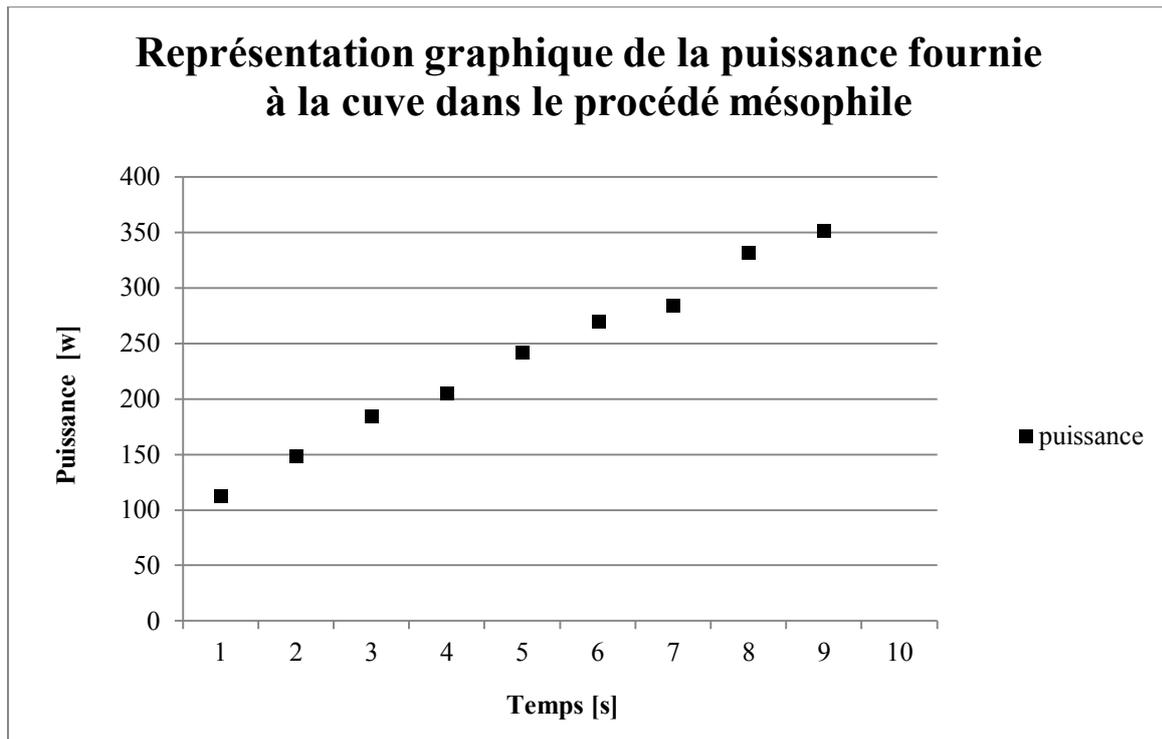


Figure N° 31 : Représentation graphique de la puissance fournie à la cuve dans le procédé mésophile

- **Quatrième expérience** : on a fait chauffer l'eau avec une résistance de 1000 W et on varie la température en cours de temps jusqu'à 57°C (procédé thermophile), après on a introduit le capteur thermocouple dans la cuve (digesteur) pour capter les différentes températures.

2.4.1. La quantité de chaleur fournie à la cuve (digesteur) dans le procédé thermophile :

- On Calcule la chaleur fournie à la cuve (digesteur) noté Q_c avec l'équation suivante :

$$Q_c = M_e C_{pe} (T_f - T_i)$$

Chapitre III : Bilan Energétique et Discussion des Résultats.

Avec :

M_e : la masse de l'eau dans le récipient en [Kg]

C_{p_e} : chaleur spécifique de l'eau en [J/ Kg. °C]

T_f : la température limite du procédé thermophile en [°C]

T_i : la température ambiante dans la cuve (digesteur) en [°C]

$$\text{A.N. : } Q_c = 8 * 4180 * (57 - 27,3) = 993168 \text{ joule}$$

2.4.2. La puissance fournie à la cuve (digesteur) dans le procédé thermophile :

- On Calcule la puissance fournie à la cuve (digesteur) noté P avec l'équation suivante :

$$P = Q_c / t$$

Avec :

Q_c : la chaleur fournie à la cuve (digesteur) en joule

t : le temps de chauffe jusqu'à 57 °C en seconde

$$\text{A.N. : } P = 993168 / 3300 = 300,96 \text{ w}$$

2.4.3. La variation de la puissance fournie à la cuve (digesteur) en cours de temps dans le procédé thermophile :

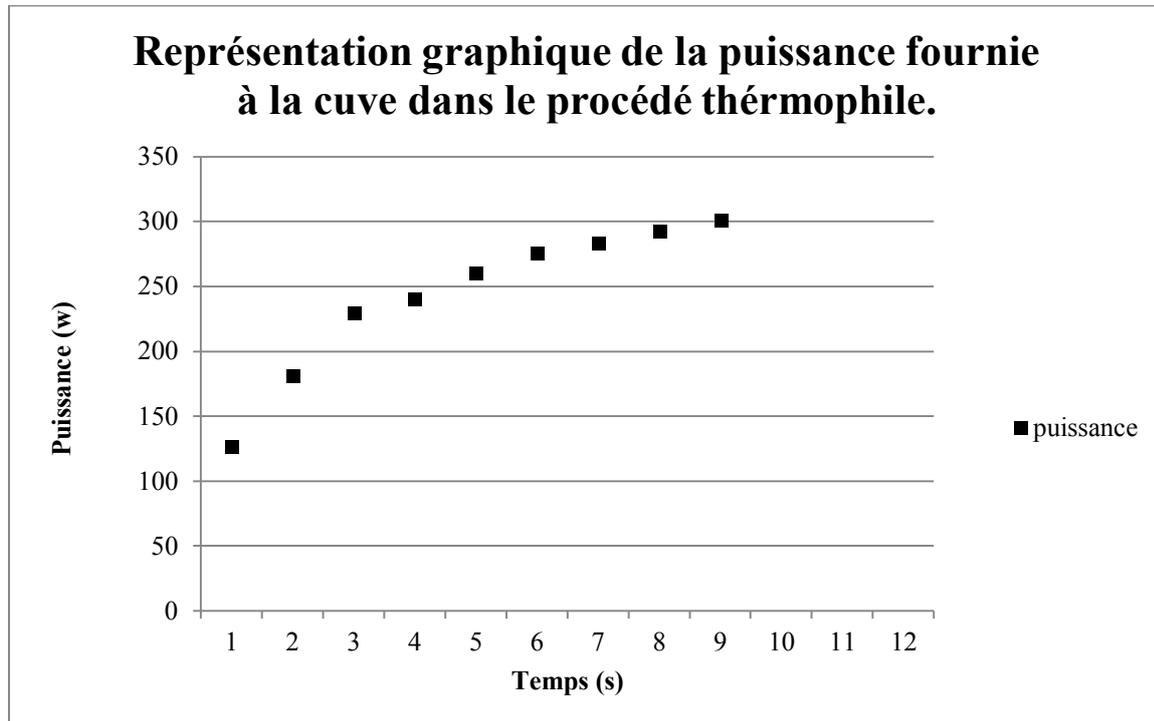


Figure N° 32 : Représentation graphique de la puissance fournie à la cuve dans le procédé thermophile.

- **Remarque :** On remarque que la puissance fournie au digesteur dans le procédé mésophile est supérieure à celle du procédé thermophile, c'est pour cela que le meilleur domaine de température pour la production de biogaz est entre 32 - 42 °C, par ce que des variations journalières de 1°C peuvent perturber la digestion thermophile.

3. Propriétés du biogaz produit :

Le biogaz qui a été produit est principalement constitué de méthane CH_4 et de gaz carbonique inerte. D'autres gaz peuvent venir s'ajouter de façon minoritaire dans la composition du biogaz : hydrogène (H_2) et, sulfure d'hydrogène (H_2S). La teneur de ces gaz dépend étroitement du déchet traité et du degré d'avancement de la méthanisation. Le pouvoir

Chapitre III : Bilan Energétique et Discussion des Résultats.

calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de quantité de combustible. [43]

4. Bilan de matière et bilan énergétique :

4.1. Production de méthane :

Le potentiel de production de gaz (B_o) d'un substrat est le volume total de gaz produit par unité de matière organique traitée pour un temps de rétention infinie, il est fonction de la biodégradabilité du substrat. La constante B_o est de l'ordre de $0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$ quel que soit la nature du substrat. [44]

- On Calcule la Production de méthane P_{CH_4} avec l'équation suivante :

$$P_{\text{CH}_4} = \text{quantité de MO} \times B_o$$

Avec :

MO : La quantité de la matière organique ou matière volatiles sèches (MVS).

$$\boxed{\text{MO} = \text{MVS}}$$

4.2. Energie totale disponible annuellement « Et » :

- On Calcule l'Energie totale disponible annuellement avec l'équation suivante :

$$E_t = P_{\text{CH}_4} \times \text{PCI}$$

Avec :

P_{CH_4} : La quantité de méthane produit.

Chapitre III : Bilan Energétique et Discussion des Résultats.

PCI : Pouvoir calorifique de méthane qui vaut $9,94 \text{ kWh/m}^3$ dans les conditions normales de température et de pression.

4.3. Energie valorisable annuellement « Ev » :

L'énergie valorisable correspond à 95 % de l'énergie potentiellement disponible à partir du biogaz. En général, 5 % de cette énergie ne va pas être valorisée. En effet, il est nécessaire de maintenir un excès de potentiel de production de méthane par rapport à la consommation des installations de combustion. [44]

5. Détection de la composition de biogaz :

Pour la détection des composantes de notre biogaz obtenu à partir des boues de station d'épuration de l'ONA (pont de bougie) en utilise un chromatographe en phase gazeuse (CPG) de laboratoire du génie procédé (Compus Hassnaoua).

La chromatographie en phase gazeuse (CPG) est une technique qui permet de séparer des molécules d'un mélange éventuellement très complexe de nature très diverses. Elle s'applique principalement aux composés gazeux ou susceptibles d'être vaporisés par chauffage sans décomposition. Elle est de plus en plus utilisée dans les principaux domaines de la chimie.

Le gaz porteur (ou gaz vecteur), est la phase mobile, C'est dans son flux que l'on injecte le mélange à analyser, et c'est lui qui le véhicule jusqu'au détecteur à travers toute la colonne.

On utilise un logiciel de chromatographie pour obtenir un chromatogramme qui prend généralement la forme d'un graphique qui traduit la variation de la concentration du soluté en sortie de colonne (ppm), en fonction du temps (min) . [45]

- Notre chromatographe utilisé est composé de deux détecteurs qui sont :

5.1. Le détecteur TCD :

C'est un détecteur électrique qui détecte tous les composés chimiques présent dans notre biogaz sous forme d'un signal.

5.2. Le détecteur FID :

C'est un détecteur à ionisation de flamme qui détecte tous les hydrocarbures présents dans notre biogaz.

- Pour analyser notre biogaz obtenu on a introduit le tuyau de chromatographe dans notre ballon qui contient ce dernier comme le montre la figure N° 28, pour faire des injections aux détecteurs de chromatographe.
- **Première injection** : on injecte notre biogaz pour détecter ces composants et les gaz qui ont été déjà analysé dans notre chromatographe et on a obtenu les résultats suivants :

- **Détecteur TCD :**

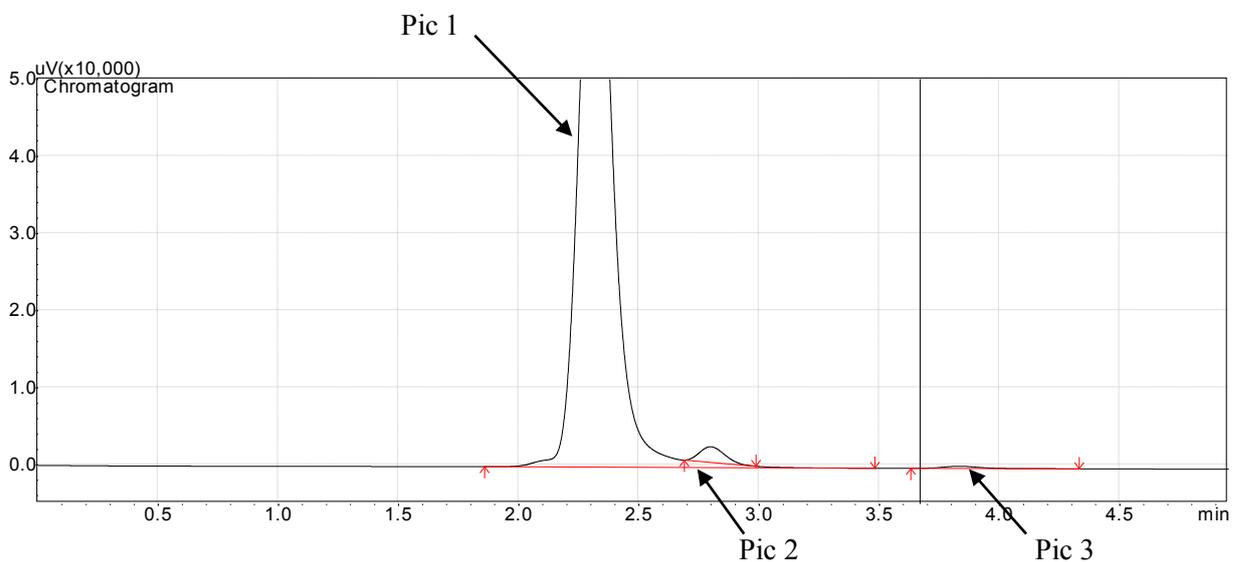


Figure N° 33 : Représentation de la détection TCD (première injection).

Chapitre III : Bilan Energétique et Discussion des Résultats.

- Sur la figure N° 33, Les petites flèches en rouge sont les détections des gaz déjà présent dans le chromatographe et les pics sont les composants de notre biogaz avec des temps de rétention, hauteur, surface comme le montre le tableau N°4.

Temps de rétention est le temps qui s'écoule entre l'injection de l'échantillon et l'apparition d'un pic de gaz sur le détecteur.

Pic	Temps de rétention	Surface	Hauteur	Surface %
1	2,3	841372,3	91445,8	97,9
2	2,8	14801,4	2024,9	1,7
3	3,8	3311,2	298,3	0,4

Tableau N°4 : Les résultats de la détection TCD (première injection).

Les surfaces des pics en pourcentages sont les compositions des gaz qui sont dans notre biogaz obtenu.

- **Détecteur FID :**

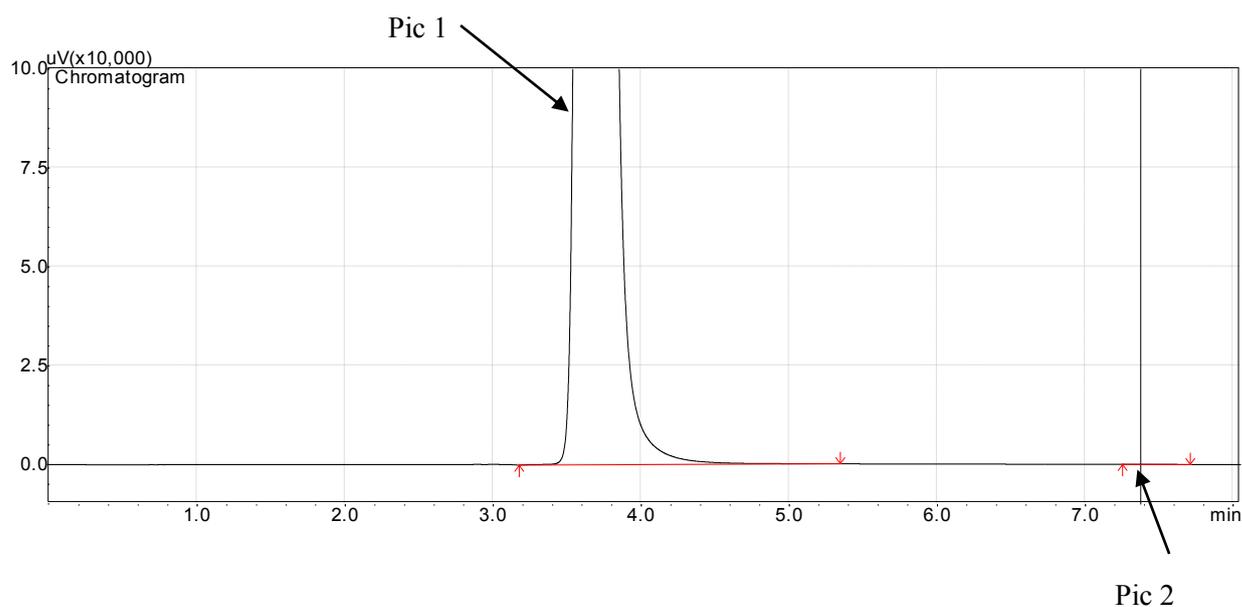


Figure N° 34 : Représentation de la détection FID (première injection).

Chapitre III : Bilan Energétique et Discussion des Résultats.

- Sur la figure N° 34, les petites flèches en rouge sont les détections des hydrocarbures gazeux déjà présents dans le chromatographe et les pics sont les composants d'hydrocarbures gazeux de notre biogaz avec des temps de rétention, hauteur, surface consignés dans le tableau N°5.

Pic	Temps de rétention	Surface	Hauteur	Surface %
1	3,7	19901744,1	2157693,2	99,995
2	7,4	1055	66,8	0,005

Tableau N°5 : Les résultats de la détection FID (première injection).

Les surfaces des pics en pourcentages sont les compositions des hydrocarbures gazeux qui sont dans notre biogaz obtenu.

- **Deuxième injection** : après détection des gaz on va injecter de biogaz une deuxième fois pour bien déterminer nos composants et on a obtenu les résultats suivants :

- **Détecteur TCD :**

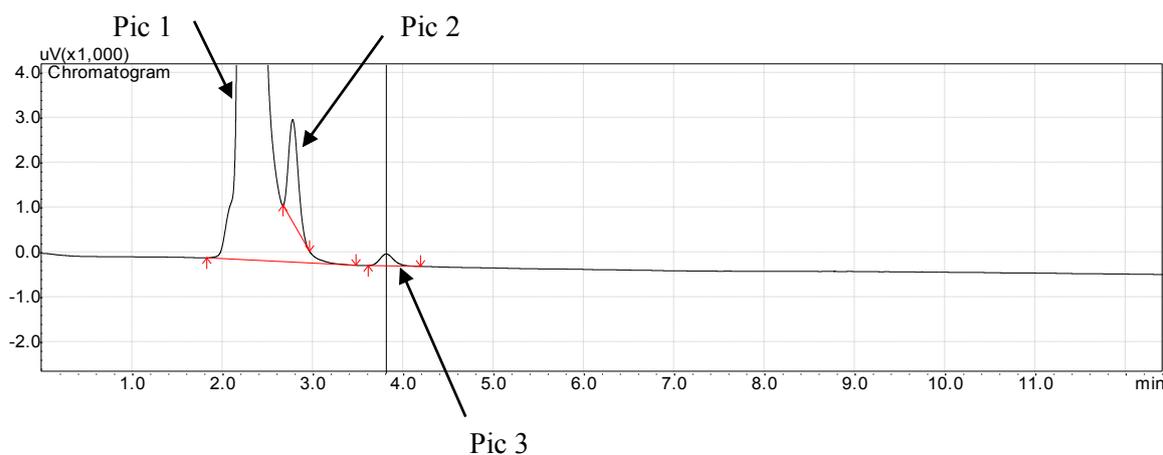


Figure N° 35 : Représentation de la détection TCD (deuxième injection).

Chapitre III : Bilan Energétique et Discussion des Résultats.

- Sur la figure N°35, dans notre deuxième injection le détecteur TCD nous a montré les trois composants (trois pic) de notre biogaz obtenu, il reste à savoir leur nom et quel est l'hydrocarbure (CH_4) de ces composants.

Pic	Temps de rétention	Surface	Hauteur	Surface %
1	2,3	1065543,4	115550,3	98,2
2	2,8	16513,2	2279,4	1,5
3	3,8	2848,4	262,5	0,3

Tableau N°6 : Les résultats de la détection TCD (deuxième injection).

- Sur la figure N°35, les pics sont les composants de notre biogaz avec des temps de rétention, hauteur, surface comme le montre le tableau N°6, les surfaces des pics en pourcentages sont les compositions définitives des gaz qui sont dans notre biogaz obtenu.

Le détecteur FID va nous indiquer l'unique hydrocarbure (CH_4) présent dans notre biogaz.

• **Détecteur FID :**

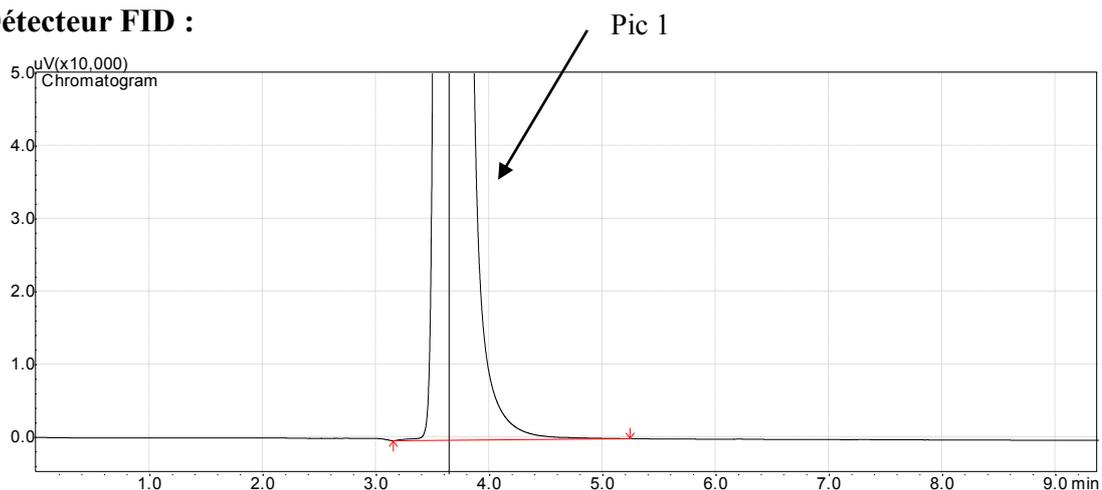


Figure N° 36 : Représentation de la détection FID (deuxième injection).

Chapitre III : Bilan Energétique et Discussion des Résultats.

Pic	Temps de rétention	Surface	Hauteur	Surface %
1	3,6	22548714,0	244 7159,9	100,0

Tableau N°7 : Les résultats de la détection FID (deuxième injection).

Le détecteur FID a détecté un seul pic qui est notre hydrocarbure (CH_4) existant dans le biogaz (pic1).

- Pour identifier les deux gaz restants on va injecter de CO_2 pur et voir son temps de rétention s'il correspond à une détection de notre tableau N°6.

5.3. Détection de CO_2 pure : On injecte de CO_2 pure au chromatographe et on va comparer le temps de rétention avec l'un des pics de la figure N° 35.

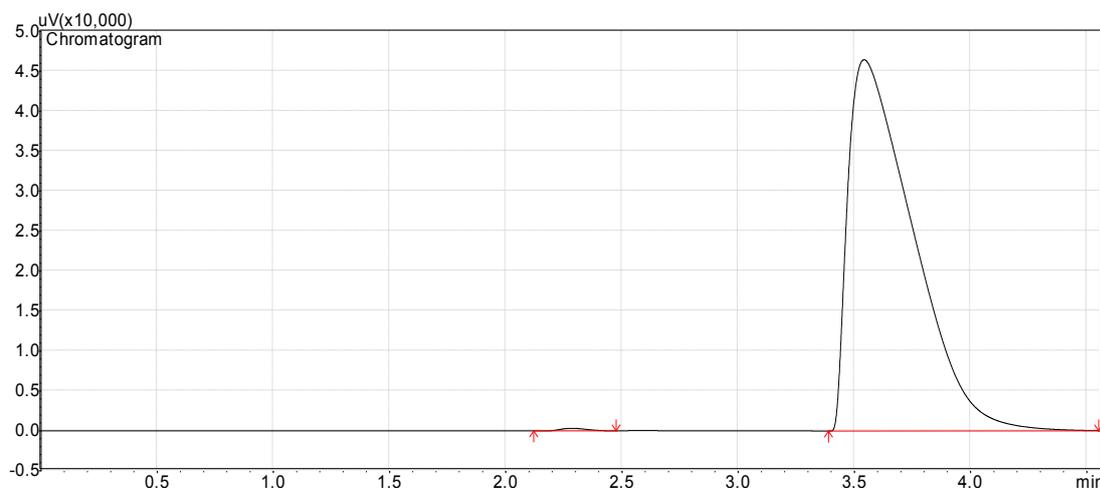


Figure N° 37 : Représentation de la détection TCD de CO_2 pure.

- Sur la figure N°37, on remarque que le temps de rétention de CO_2 pur est égal à notre troisième pic de tableau N° 6 qui est 3 ,8 minutes, le premier pic c'est de CH_4 qui a un très grand pourcentage en surface (tableau N° 6) et le deuxième pic peut être H_2S ou de l'hydrogène (H_2).

6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons comparé les deux procédés mésophile et thermophile, le procédé mésophile est le plus gourmand en énergie et le plus rapide et efficace pour la production de biogaz selon la théorie des conditions de la réaction de méthanisation (température), l'injection de 1 ml de biogaz contient 98,2 % de CH₄, 1,5% de H₂S ou d'hydrogène H₂ et 0,3% de CO₂, en réalité en a toujours une différence a la théorie, un digesteur fonctionnant a PH basique aura facilement des teneurs en CH₄ plus élevé (98 %). Il en est de même pour des digesteurs à très faible temps de séjour qui élimineront une grande quantité de CO₂. [46]

***Conclusion générale
et perspectives***

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

La présente étude a permis d'étudier un système servant à la conversion de la biomasse en méthane. On entend par biomasse ici des boues d'épuration primaires stabilisés après traitement des eaux résiduaires urbaines produites dans la Station d'épuration (STEP) de Tizi-Ouzou Zone est.

La méthanisation est une biodégradation, considérée par les énergéticiens comme une valorisation basée sur l'activité des microorganismes, telles que des bactéries, dans un milieu dépourvu d'oxygène et pour une température allant de 20C° à 70C° où l'activité bactérienne est active.

Afin d'étudier ce procédé de méthanisation, un prototype a été construit au sein du laboratoire d'énergétique de génie mécanique. Ce prototype appelé digesteur est composé d'une cuve en plastique d'un volume de 5L. Ensuite, une quantité de boue issue de la STEP de Tizi-Ouzou a été introduite dans le digesteur. Cette quantité a été soumise à deux plages de température permettant de reproduire des systèmes respectivement mésophile et thermophile. L'apport thermique a été réalisé par une source de chauffage par énergie électrique (Résistance électrique de 1000 W).

Il a été constaté que le volume du biogaz produit varie dans les deux intervalles de températures considéré mésophile et thermophile, la comparaison des deux systèmes montre que la puissance fournie à l'eau et au digesteur entre 32C° et 42C° (système mésophile) est supérieure à celle fournie entre 50C° et 57C° (système thermophile), la production dépend aussi de PH si ce dernier est basique la teneur en méthane (CH₄) peut augmenter jusqu'à 98% et si le temps de séjour est très faible en risque d'éliminer une grande quantité de CO₂, la quantité de la matière organique de substrat peut varier les pourcentage de méthane et de CO₂ produit, la quantité d'énergie dépend de la production annuelle de méthane.

Les composants chimiques de notre biogaz est obtenu grâce à un logiciel de chromatographie qui interprété les résultats des détections TCD et FID qui indique les différents pourcentages des gaz présents dans notre injection sous forme de pic.

Conclusion et perspectives

Pour augmenter le rendement en biogaz produit, un mélange de matières organiques est envisageable où la boue sera constituée de mélange de boues à des concentrations différentes ou des boues qui seront mixées avec d'autres types de déchets organiques comme les déchets agricoles, les ordures ménagères ou les déchets de l'industrie du bois et l'industrie papetière. L'apport de chaleur pourra être obtenu en utilisant des sources de chaleur des énergies renouvelables comme l'énergie solaire (capteurs thermiques) pour remplacer la source de chaleur électrique (Résistance électrique), La stabilité de la température au niveau de digesteur dans le cas où elle sera élevée par rapport à l'intervalle de température où l'activité bactérienne est intense ($\geq 70^{\circ}\text{C}$) pourra être obtenue en installant des échangeurs de chaleur à l'entrée du digesteur.

Pour augmenter l'isolation thermique, on pourra proposer un système de digesteur enfouis dans le sol à une distance de 4 à 5 m où la température d'après les données géothermiques est de 22°C en permanence dans le sol permettant de diminuer le gradient de température entre le milieu extérieur et la température de digesteur. L'apport thermique pourra être fourni par l'énergie géothermique comme les puits géothermiques.

Références bibliographiques

- [1] Rodier J ; Bazain C ; Broutin J-P ; Chambon P ; Champsaur H ; Rodi L,(1996).lanalyse de l'eau,DUNDOD,Paris 8^e édition .
- [2]Champiat, D, (1994.)Biologie des eaux: Méthodes& techniques, Masson, 374 p.
- [3]AmadouHaoua, (2007). Modélisation de séchage solaire sous serre des boues de station d'épuration urbain. Thèse de doctorat l'Université louis pasteur Strasbourg, 355p.
- [4]Amir Soumia, (2005). Contribution a la valorisation de boues de stations d'épurations par compostage : devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost thèse, univ. cadiayyad, fac. sci. semlalia, Marrakech, 341p.
- [5]-Degrémont, (1989). Mémento technique de l'eau, 9eme Edition, Tome 1 et 2, Editions Lavoisier, Paris.
- [6]Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, (2012). Méthanisation des boues de stations : règle de l'art et état des lieux sur les bassins Rhône-Méditerranée Corse.
- [7]Adem (Agence de l'environnement et de la maitrise de l'énergie),2003.pour bien comprendre la méthanisation. Dunod .Paris
- [8]Office International de l'Eau (OIE) ,2001.
- [9] KollerEmilian, (2004). Traitement des pollutions industrielles Dunod, PT424 mise en dechargeconditions. 175p.
- [10] Kalloum S ; Iddou A ; Khelafi M ; Touzi A ,(2013). Utilisation du procédé de la digestion anaérobie pour le traitement des boues des stations d'épuration des eaux usées. Les Energies Renouvelables 16 : 611 – 618.
- [11] Serie Technique DT51'' Boues des stations dépurations :Technique de traitement , valorisation et élimination ''2012 ;P :13-16.
- [12] <http://www.methanisation.info/methanisation.html>

[13] Moletta R, (2008). La méthanisation, Technique et documentation - Editions Lavoisier, Paris.

[14] Aran C,(2000). Modélisation des écoulements de fluides et des transferts de chaleur au sein des déchets ménagers. Application à la réinjection de lixiviat dans un centre de stockage. Thèse - Toulouse Institut national Polytechnique de Toulouse,242p.

[15] Delineau T et Boudka A ,(2000).Le concept du bioréacteur. Convention Ademe /SITA n° 99 06 013. Paris : Ademe. 297 p.

[16] Lanini S; Aguillar O; Lefebvre X; Ballansat G, (1997). Temperature increase in landfills during the aerobic period. In: Proceeding Sardinia of the Sixth International landfill symposium, Cagliari, Italy, vol. I, pp. 121-126.

[17] <http://www.biogaz-energie-renouvelable.info>

[18] Mcinerney M. J, (1988). Anaerobic hydrolysis and fermentation of fats and proteins. Vol. 2, pp. 373- 416.

[19] Thiele J.H, (1991). Mixed-culture interactions in methanogenesis. New York, NY: McGraw-Hill, vol.4: pp. 261–292.

[20] Wu W.M; Hickey R.F; Zeikus J.G, (1991). Characterization of metabolic performance of methanogenic granules treating brewery wastewater: role of sulfate-reducing bacteria. Applied Environmental Microbiology, vol. 57, n° 12, pp. 3438-3449.

[21] Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Adem) ,2003.

[22] Kaloum Slimane, (2006). La digestion anaérobie des boues de la station d'épuration de la ville Adrar : une opportunité environnementale et énergétique. Thèse de magistère. École Normale supérieure de l'Enseignement technique D'Oran.295p

[23] [www.bioecoplus.com/PDF/.../Notions technique pratiques sur épuration des eaux](http://www.bioecoplus.com/PDF/.../Notions_technique_pratiques_sur_epuration_des_eaux) .

[24] Komiyama M; Misonou T; Takeuchi S; Umetsu K; Taka J, (2006). Biogas as a reproducible energy source: Its steam reforming for electricity generation and for farm machine fuel. International Congress Series, 1293: 234- 237.

- [25] Aurélie Ohannessian, (2008) .Composés Organiques Volatils du Silicium : Un frein à la valorisation énergétique des biogaz. Thèse, École doctorale de Chimie de Lyon (Chimie, Procédés, Environnement), 305p
- [26] Kherbouche A et Benyoucef B, (2013). Anaerobic Digestion: an Energy and Environmental.American Journal of Environmental Protection.2: 47-52.
- [27] Schnurer, A., Zellner, G. and Svensson, B. H. (1999) “Mesophilic syntrophic acetate oxidation during methane formation in biogas reactors” FEMS Microbial Ecology, 29, (3), 249-261.
- [28] Oles, J., Dichtl, N. and Niehoff, H.(1997) “Full scale experience of two stage thermophilic/mesophilic sludge digestion” Water Science and Technology, 36, (6-7), 449-456.
- [29] Bitton, G.(1994), Wastewater microbiology, Wiley-Liss Editor, New York.
- [30] OTV. (1997)“Traiter et valoriser les boues”Ouvrage collectif n°2, Editions Lavoisier, Cachan.
- [31] Siboukeur Hicham; Touzi Abdelkader; Youcefi Amina; OuldElhadj; Mohamed Didi, (2015). Microbiological study of the anaerobic digestion of sludge from the purifying plant Wastewater from the city of Touggourt, southeast of Algeria .Energy Procedia, 74: 172 – 176.
- [32] Afilal M.E ; Elasri O ; Merzak Z, (2014).Caractérisations des déchets organiques et évaluation du potentiel Biogaz (Organicwastecharacterization and evaluation of itspotentialbiogas).J. Mater. Environ. Sci. 5 :1160-1169
- [33] ONA (Office National d'Assainissement). 2015.Perspectives de valorisation agricole et énergétique des boues issu des STEP en Algérie
- [35] T.P.E. sur La méthanisation Ou comment transformer nos déchets en énergie.
- [36] Martina Nolte - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2012-05-13_Nordsee-Luftbilder_DSCF8495.jpg.

- [37] *caractérisation des eaux (Coin, 1981)*
- [38] *Les prétraitements.doc/05/04/2005 (Desjardins, 2007)*
- [39] *Les prétraitements (www.veoliaeaust.com, 2008)*
- [40] [www.fmarchand67.com/documents/5eme/.../5emeP1SP0Ch3T5-station épuraton.](http://www.fmarchand67.com/documents/5eme/.../5emeP1SP0Ch3T5-station%20%C3%A9puration)
- [41] ONA, Fiche technique de la station d'épuration STEP de la ville de Tizi-Ouzou, 2000.
- [42] documentation obtenu a ONA de la ville de Tizi-Ouzou
- [43] www.biogaz-energie-renouvelable.info/biogaz_composition.html
- [44] Valorisation des boues de la station d'épuration en biogaz.html
- [45] https://fr.wikipedia.org/wiki/Chromatographie_en_phase_gazeuse
- [46] P Camacho, C Prévot - La méthanisation (2e ed.), 2011 - books.google.com