



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE  
ET POPULAIRE  
UNIVERSITE de MOSTAGANEM**

Laboratoire des sciences et techniques de l'environnement et  
valorisation S.T.E.V.A

**MEMOIRE  
Pour obtenir le diplôme de  
MAGISTER**

**EN**

**CHIMIE APPLIQUEE ET DEVELOPPEMENT DURABLE**

**Par**

**Karima LARBI**

---

**METHANISATION DES BOUES DE LA STATION  
D'EPURATION URBAINE DE HASSI R'MEL**

---

*Soutenu le 10/12/2009 devant le jury :*

<i>Président du jury</i>	<i>A. ADDOU</i>	<i>Professeur à l'Université de Mostaganem</i>
<i>Examineurs</i>	<i>M. BELHAKEM</i>	<i>Professeur à l'Université de Mostaganem</i>
	<i>B. LOTMANI</i>	<i>Maître de Conférences à l'Université de Mostaganem</i>
	<i>M.R. GHEZZAR</i>	<i>Maître de Conférences à l'Université de Mostaganem</i>
<i>Rapporteur :</i>	<i>F. ABDELMALEK</i>	<i>Maître de Conférences à l'Université de Mostaganem</i>

# Remerciements

*Durant la préparation de ce mémoire, j'ai rencontré des personnes qui m'ont aidé et soutenu, je tiens à leurs exprimer mes remerciements.*

*Je tiens tout particulièrement à remercier monsieur le Professeur A. Addou directeur du laboratoire des sciences et techniques de l'environnement et de la valorisation (S.T.E.VA) de l'université de Mostaganem d'avoir accepté de présider le jury.*

*Je remercie avec beaucoup de reconnaissance et de considération m<sup>elle</sup> F. Abdelmalek Maître de Conférences à l'université de Mostaganem pour avoir assuré le suivi de ce travail de recherche. La confiance qu'elle m'a témoignée et les conseils prodigués ont permis l'aboutissement de ce mémoire.*

*Mes remerciements s'adressent également à Monsieur M. BELHAKEM Professeur à l'université de Mostaganem qui me fait l'honneur de faire partie de ce jury.*

*Je suis honorée de la présence au jury de Monsieur B. LOTMANI Maître de conférences à l'université de Mostaganem.*

*Que Monsieur M. R. GHEZZAR Maître de conférences soit assurer de ma gratitude pour l'intérêt qu'il a porté à ce mémoire.*

*Je suis très reconnaissante à l'honneur que m'a fait monsieur M. RAHMOUNE Directeur Régional à SONATRACH pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.*

*A Hassi R'Mel mes remerciements vont aussi, bien évidemment, à monsieur A. Djeghab chef de département à sonatrach, pour son aide, sa collaboration ainsi que les membres du laboratoire de la STEP Monsieur B. Benhagouga et A. Zaritta.*

*Que soient vivement remerciés tous les exploitants de la station d'épuration, pour leur accueil et la mise à disposition des données nécessaires à la réalisation de ce travail.*

*L'analyse chromatographique de ce travail a été réalisé au Laboratoire du module 4 et au module 0 à Hassi R'Mel. J'exprime ma reconnaissance à mr Benabedallah chef services des laboratoires de Hassi R'Mel pour la confiance qu'il m'a témoignée en m'accueillant au sein de ces laboratoire.*

*L'analyse bactériologique de ce travail a été réalisée au Laboratoire O.C qualité-eau-environnement grand merci à son directeur mr A.Oueld cheikh ainsi qu'au biologiste m<sup>elle</sup> A.Gacem.*

*J'exprime toute ma reconnaissance aux intendants responsables au centre de formation de Hassi R'Mel qui m'on apporté tout leur accueil, soutien et leur appui afin d'arriver au terme de mon stage particulièrement mr benaissa et mr hassini.*

*Je ne pourrai terminer ces remerciements sans y associer mes professeurs qui m'ont enseigné, encouragé au cours de ma formation durant les huit années d'étude au département de génie des procédés à l'université de Mostaganem en particulier mr N. Benderdouche, mr B. B. bestani ,mr M.A. Ouali et mr A. Feddag.*

## DEDICACES

*À tous ceux qui me sont chers, je dédie ce travail :*

*A la mémoire de mon défunt père que Dieu lui accorde sa miséricorde*

*Aux deux êtres qui me sont les plus chers au monde, ma mère et ma très chère fille  
Amira Jasmine qui m'ont toujours, aidé, soutenu, supporté et encouragé durant  
toute ma  
vie d'étudiante et que je ne remercierais jamais assez.*

*Aux prunelles de mes yeux*

*Mes chères sœurs Salîha et Fadela pour leur tendresse, encouragement et respect  
du savoir*

*À mes frères : Larbi, El hadj, Bouamrane, Abdelkrim et Hamid*

*Mes neveux et nièces et à toute ma famille*

*A ma chère amie Amina*

*A tous ceux qui me connaissent et ceux qui lisent ce message, je dédie ce modeste  
travail.*

Remerciement

Dédicace

## Sommaire

Liste des abréviations

Résumé

Introduction

Première partie : étude bibliographique

### **Chapitre I : présentation de la station d'épuration de Hassi R'Mel**

I-1- présentation de la région de Hassi R'Mel.....	1
I-1-1- Historique.....	1
I-1-2- Situation géographique de Hassi R'Mel .....	1
I-1-3- Situation énergétique .....	2
I-1-4- Présentation de zone industrielle de Hassi R'Mel.....	2
I-1-5- Impact de l'industrie pétrochimique de Hassi R'Mel.....	2
I-1-6- Présentation de l'entreprise SONATRACH .....	3
I-1-6-a- activités générales de la société .....	3
I-1-6-b- les Subdivisions de la direction régionale de Hassi RM'el .....	4
I-1-6-c- politique HSE de Groupe SONATRACH.....	5
I-2- Présentation de la station d'épuration de Hassi R'Mel.....	5
I-2-1- Conception de la station d'épuration de Hassi R'Mel.....	5
I-2-2- Les objectifs de la station d'épuration de Hassi R'Mel.....	5
I-2-3- La description du fonctionnement de la station d'épuration de Hassi R'Mel.....	6
I-2-3-a- Données de base de la station d'épuration de Hassi R'Mel.....	6
I-2-3-b- Compartiment de la station d'épuration de Hassi R'Mel.....	6
I-2-4- Etapes de traitement.....	7
I-2-4-a- Le prétraitement .....	7
1) Dégrillage et tamisage .....	7
2) Dessablage.....	8
3) Dégraissage et déshuilage.....	8
I-2-4-b- Traitement biologique.....	9
• Bassin d'aération.....	10
• Bassin de clarification .....	11

• Le poste de recirculation.....	12
• Description du procédé «traitement aux boues activées».....	12
I-2-4-c- Le traitement tertiaire (chloration).....	13
I-2-4-d- Le traitement des boues dans la STEP de Hassi R'Mel.....	14
• Epaissement .....	14
• Séchage naturel.....	15
I-2-5- Généralité sur les boues résiduares.....	16
- Différents types des boues.....	17
a) Les boues primaires.....	17
b) Les boues secondaires .....	17
c) Les boues physicochimiques .....	17
d) Les boues mixtes .....	17
I-2-6- Traitement des boues .....	18
- La stabilisation .....	18
- La déshydratation naturelle (lits de séchage) .....	19
I-2-7- Composition des boues résiduaire.....	19
I-2-8- Propriétés des boues.....	20
a) Propriétés physiques.....	20
b) La teneur en matières sèches .....	21
c) La teneur en matières volatiles.....	21
d) La teneur en eau interstitielle.....	21
I-2-9- Les risques liés aux boues résiduares.....	22
a) Risques biologiques.....	22
b) Risques chimiques.....	22
I-2-10- Le devenir des boues traités.....	23

## **Chapitre II : La Méthanisation**

II-1- Historique de la méthanisation.....	24
II-2- définition de la méthanisation.....	24
II-3- Etapes de la méthanisation.....	25
1) Hydrolyse et acidogenese.....	25
2) L'acétogenese.....	25
3) Methanogenese.....	26
II-3-1- Micro-organisme responsable de la méthanisation.....	27

II-3-2- La paramètres physicochimique de la méthanisation .....	28
II-3-3- La cinétique de la méthanisation.....	30
II-3-4- Contrôle du procédé de la méthanisation.....	31
II-4- Méthanisation des boues de station d'épuration STEP.....	31
• Les résidus de l'assainissement méthanisables .....	32
• Comparaison de performance de la méthanisation .....	32
II-5- Déchets méthanisables .....	33
II-6- Les matières non-méthanisables.....	34
II-7- Définition du biogaz.....	34
II-7-1- La composition du biogaz.....	35
II-7-2- Le potentiel méthanogène.....	35
II-7-3- L'épuration du biogaz.....	36
• Les traitements simples .....	36
• Les traitements poussés.....	37
II-7-4- Stockage .....	37
II-7-5- Valeur énergétique du biogaz .....	37
II-8- La définition du digesteur.....	38
II-8-1- Les différents types de digesteurs.....	39
II-8-2- Les matériaux utilisés .....	39
II-8-3- La constitution d'un digesteur.....	39
II-8-4- Mode d'alimentation.....	40
• Le digesteur batch.....	40
• Le digesteur continu.....	41
• Le digesteur semi-continu.....	41
II-8-5- Chauffage du digesteur .....	41
II-8-6- Les différents procédés de la méthanisation.....	41
• Le procédé monoétape.....	41
• Le procédé bi-étapes.....	41
• Procédés mixtes.....	42
II-8-7- Description et classification des installations de biométhanisation .....	42
II-9- La codigestion (ou méthanisation combinée) .....	42
II-10- Température mésophile/thermophile .....	43
II-11- Les filières de valorisation de biogaz.....	44

II-12- L'avantage de la méthanisation.....	45
II-13- l'intérêt de la méthanisation avant autre valorisation .....	46
II-14- Les inconvénients de la digestion anaérobie .....	47
II-15- La méthanisation et l'environnement .....	49

### **Chapitre III : Partie expérimentale**

Introduction à l'expérimentation.....	50
Microbiologie de la digestion anaérobie.....	50
III-1- Matériel et méthode.....	51
III-1-1- Dispositif expérimentale .....	51
III-1-2- Méthode de production.....	53
III-2- Méthodes de caractérisation de la boue.....	54
III-2-1- pH.....	54
III-2-2- Matières en suspension .....	55
III-2-3- Humidité et matière sèche.....	55
III-2-4- Mesure de la teneur en matière organique.....	55
• Caractéristique de la boue .....	57
• Le substrat.....	57
III-2-5- Chromatographie en phase gazeuse .....	57
III-3- Résultats et discussions.....	58
III-3-1- Etude de la méthanisation en mode thermophile et en mésophile.....	59
III-3-1-a- Production cumulée.....	62
III-3-1-b- Production journalière .....	65
III-3-1-c- Evolution de pH au cours de la production.....	67
III-3-1-d- Evolution des matières sèches dans les digesteurs 1, 2 et 3.....	69
III-3-1-e- Analyse quantitative et qualitative du biogaz produit .....	71
III-3-2- Etude de la méthanisation de la boue en mode thermophile et mésophile avec cosubstrat .....	73
III-3-2-a- évolution des matières sèches dans les digesteurs 4,5,6 et 7.....	78
III-3-2-b- Production cumulé et analyse quantitative et qualitative du biogaz produit de la méthanisation des cosubstrats en 2 modes.....	80
III-4- Bilan sur la production énergétique de la méthanisation .....	86
1) La production initiale de matière sèche de la STEP de HR .....	87
2) Caractérisation de la station .....	87

3) Caractéristique de la digestion anaérobie .....	87
4) Le volume de boues produites $V_i$ et le débit journalier $Q$ .....	88
5) Dimensionnement du digesteur .....	89
6) Bilan énergétique de la méthanisation de la boue.....	90
- Première approche.....	90
7) Discussion des résultats obtenus.....	91
- Deuxième approche.....	91
Perspectives	
Conclusion	
Références bibliographique	

## *Résumé*

Cette étude porte sur la méthanisation ou digestion anaérobie des boues de STEP qui repose sur un procédé naturel de transformation de la matière organique en énergie par des bactéries en l'absence d'oxygène. Les réactions de fermentation optimisées et contrôlées, conduisent à la production du biogaz composé majoritairement de méthane, tout en réduisant de moitié le taux de matières organiques de nombreux déchets.

La production de biogaz est un moyen de valoriser les déchets organiques et donc d'éviter des pollutions et les nuisances sur notre environnement.

Le biogaz est une énergie renouvelable dont l'utilisation contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il est convertible en toutes les formes d'énergie utiles (chaleur, électricité, carburant).

Le mémoire comporte trois parties essentielles, une première décrivant, la Station d'Épuration de Hassi R'Mel à travers les différentes étapes qui concernent le traitement des eaux domestiques acheminées. Une deuxième partie est consacrée à une théorie sur la méthanisation en précisant les paramètres qui régissent ce procédé. Elle comporte également la définition du biogaz, les notions de pouvoir méthanogène, de codigestion, de mode mésophile et thermophile.

La dernière partie représente la partie expérimentale avec la détermination des conditions optimales de la méthanisation des boues résiduelles de la station d'épuration. Le travail effectué vise à mieux comprendre les phénomènes d'évolution de la matière organique au cours de la digestion anaérobie. Les paramètres étudiés sont essentiellement la température, le pH et le volume de biogaz cumulé pendant tout le processus. La composition du biogaz en méthane, gaz carbonique et azote gazeux a été déterminée par chromatographie en phase gazeuse. La méthanisation a été étudiée en monosubstrat, ce qui consiste à employer la boue seule. La digestion anaérobie de la boue a été menée en mode thermophile sous des conditions opératoires bien déterminées comme, l'effet du pH et de la dilution.

La co-digestion en mode mésophile et thermophile a fait l'objet de notre intérêt par le mélange de la boue à d'autres déchets qui sont les graisses usagées à des proportions différentes.

**Mots clés :** Méthanisation, biogaz, STEP, Boues, Valorisation, codigestion, énergie renouvelable.

# Introduction

Les accroissements démographiques, économiques et urbains sont à l'origine de différentes sources de pollution environnementales (pollution atmosphérique, pollution des eaux, pollution du sol...). Les pays en développement semblent moins préoccupés et moins sensibilisés par les risques sanitaires concomitants.

L'activité humaine génère une production de déchets divers et variés de plus en plus importante : déchets industriels, déchets ménagés, eaux usées urbaines... Afin de limiter l'impact sur l'environnement, il est indispensable de traiter ces déchets.

Les stations d'épuration urbaines ont pour rôle d'éliminer la pollution contenue dans les effluents domestiques, avant leur rejet dans le milieu naturel. Afin de répondre à des contraintes environnementales, les procédés de traitement biologiques des effluents se sont généralisés. Ceci conduit à la production d'un déchet, qui peut devenir une réelle problématique : les boues d'épuration

La « digestion anaérobie » ou « méthanisation » des boues représente une solution technique pouvant répondre à cette problématique. En effet, ce procédé permet de réduire le volume des boues résultant, de produire du biogaz, gaz principalement composé de méthane, source d'énergie propre et valorisable. Autre avantage, ce procédé stabilise les boues et les rend non odorantes.

Le chapitre I décrit la Station d'Épuration de Hassi R'Mel dont le principe de fonctionnement repose sur l'épuration biologique par boues activées à faible charge. L'épuration des eaux usées au niveau de cette STEP génère des quantités importantes de boues dont nous avons collectés des échantillons pour cette étude.

Le chapitre II est consacré à la définition des notions essentielles de la méthanisation, on retrouve les étapes qui constituent ce procédé, ainsi que les paramètres qui conditionnent la digestion anaérobie (température, pH, agitation, charge organique...). Dans ce chapitre, on donne, la définition du biogaz et on présente les notions de pouvoir méthanogène, de co-digestion, de mode mésophile et thermophile. Nous avons également évoqué l'intérêt de la méthanisation et ses avantages.

Le chapitre III est consacré aux résultats expérimentaux qui se répartissent en deux parties : Une première partie concerne la méthanisation en monosubstrat, ce qui consiste à employer la boue seule. La digestion anaérobie de la boue a été menée en mode thermophile sous des conditions opératoires bien déterminées comme, l'effet du pH et de la dilution. La deuxième partie a été consacrée à la co-digestion, la boue a été mélangée à un d'autres déchets qui sont les graisses usagées à des proportions différentes. Cette étude a été conduite en mode mésophile et thermophile.

Le mémoire se termine par une conclusion rassemblant l'ensemble des résultats et par l'énoncé de perspectives qui pourraient constituer une suite intéressante à cette étude.

## I-1-présentation de la région de Hassi R'Mel

### I-1-1-Historique

Le champ de gaz de Hassi R'Mel a été découvert dans les années 1960, le premier gisement a été mis en évidence en 1956, d'une profondeur de 2132 m, un champ totalement exploité par la société nationale de transport et de commercialisation des hydrocarbures.

### I-1-2-Situation géographique de Hassi R'Mel

Hassi R'Mel (HR), la porte du Sahara, recouvre une zone de 3500 km<sup>2</sup>, se situe à 550 km au sud d'Alger au sein de la région administrative de la wilaya de Laghouat à 120 km au nord-ouest de Ghardaïa, à 70 km de Berriane, à une altitude d'environ 750 m. Cette région est caractérisée par un climat sec, une faible pluviométrie (140 mm par an) et une humidité moyenne de 19 % en été et 34 % en hiver. Les températures à Hassi R'Mel varient entre 5°C et 45°C. Les vents violents de direction nord-ouest soulèvent les sables jusqu'à 110 m d'altitude et réduisent la visibilité à 15 m.

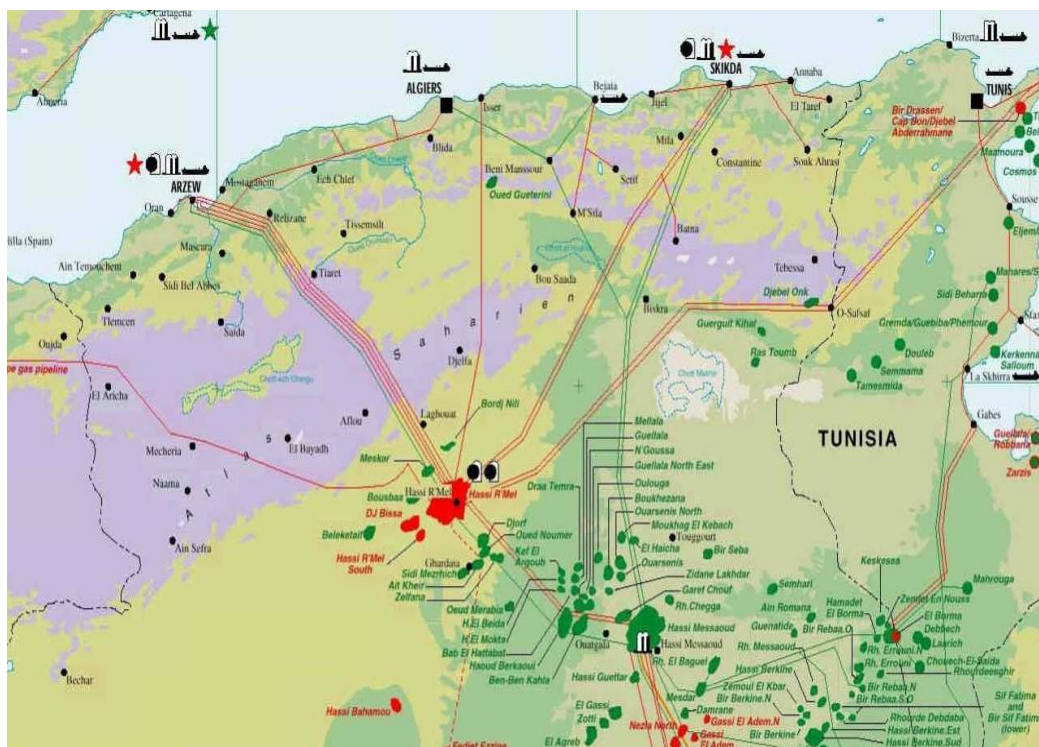


Figure I-1. Position géographique du champ de Hassi R'Mel

### **I-1-3-Situation énergétique**

L'Algérie se place au cinquième rang des pays producteurs de gaz dans le monde. Le champ de Hassi R'Mel couvre 10 % des ressources mondiales en gaz naturel. Le GPL et le condensat subissent des traitements aux niveaux des raffineries avant d'être envoyé vers l'industrie pétrochimique ou expédié à l'étranger, ainsi l'Algérie satisfait ses besoins en énergie et en exportation.

Les études du réservoir ont mis en évidence la présence de pétrole brut tout autour du gisement, mais plus particulièrement dans les parties Est et Sud du champ [1].

### **I-1-4- Présentation de zones industrielles de Hassi R'Mel**

SONATRACH est spécialisée dans la recherche, la production et de la distribution de pétrole et de gaz. La société a développé et a augmenté sa capacité de production et a mis en place de nouvelles unités de traitement de gaz, ces unités sont trois zones centre (PPO, MPPI, MPP4) nord (MMP2, MPP3), sud (Sud, Djebel bissa), et cinq centres de traitement d'huile (CTH1, CTH2, CTH3, CHT sud), et deux stations de compression de gaz, et un centre de stockage et d'exploitation des produits finis (KSTF) [1].

### **I-1-5-Impact de l'industrie pétrochimique sur Hassi R'Mel**

HASSI R'MEL est une région industrielle ce qui explique la présence de différences de ressources de pollution qui sont :

Les rejets industriels provenant :

- des unités de traitement de gaz.
- des unités de traitement de pétrole
- des stations de réinjection de gaz
- des sondes de forage
- du complexe industriel.

Les rejets domestiques :

- des bases de vie

- des complexes et unités industrielles.

Les rejets atmosphériques :

- des unités de traitement de gaz.
- des unités de traitement de pétrole.
- des stations de réinjection de gaz.

### **I-1-6-Présentation de l'entreprise SONATRACH**

Sonatrach est une entreprise internationale par son domaine d'activité industrielle, pétrolière et gazière ; c'est la première entreprise du continent Africain. Elle est classée en 12ème position parmi les compagnies pétrolières mondiales, et 2ème exportateur de GNL et de GPL, ainsi que 3ème exportateur du gaz naturel. L'internationalisation des activités de Sonatrach dans une logique de compagnie pétrolière et gazière contribue également, en tant que première force économique du pays à l'insertion de l'économie algérienne dans l'économie mondiale.

Ses activités constituent environ 30% du PNB de l'Algérie. Cette entreprise est citoyenne, œuvre à resserrer les liens sociaux, à aider les populations dans le besoin, à promouvoir la recherche et les activités scientifiques et à aider la création artistique et l'activité sportive. Elle contribue aussi à la préservation de la nature ainsi qu'à la sauvegarde du patrimoine culturel et historique. Au jour d'aujourd'hui, SONATRACH ne conçoit pas de développement économique, sans un développement durable [1].

#### **I-1-6-a-Activités générales de la société.**

Sonatrach est la compagnie algérienne de recherche, d'exploitation, de transport par Canalisation, de transformation et de commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés. Elle intervient également dans d'autres secteurs tels que la génération électrique, les énergies renouvelables et le dessalement de l'eau de mer.

- Forme juridique : Société par actions (SPA).
- Date de création : 31/12/1963.
- Effectif de SONATRACH : 49467 (120 000 personnes avec les filiales).
- Gisements en exploitation : 82
- Permis d'exploitation et/ ou développement et/ou d'exploitation en association avec les compagnies pétrolières étrangères : 35 [1]

## **I-1-6-b- Les subdivision de la direction régionale de Hassi R'Mel**

### **Direction régionale**

Le développement et l'exploitation des hydrocarbures sont l'objectif principal visé par la direction régionale qui se compose de divisions et directions.

#### **❖ Division exploitation**

Elle s'occupe de la réalisation des traitements d'injection des hydrocarbures et des programmes de production.

#### **❖ Division technique**

Elle assure la planification, l'organisation et la mise en œuvre d'une capacité de construction pétrolière répondant aux besoins de la région.

#### **❖ Division Engineering et Production**

Chargée de la planification, développement et la mise en œuvre des services techniques opérationnels, ainsi que l'intervention sur toutes les installations des puits.

#### **❖ Division maintenance**

Elle couvre différentes activités telles que la mise en œuvre de la maintenance pétrolière liée aux besoins actuels dans le domaine de la mécanique, électricité et de l'instrumentation.

#### **❖ Division logistique**

Elle assure la réalisation de tout ce qui concerne les travaux non pétroliers de génie civil tel que l'entretien des locaux et des logements, électricité, la plomberie et la peinture.

##### **➤ Sous division informatique**

Son principal objectif est le développement et la gestion de l'outil informatique.

##### **➤ Sous division approvisionnement et transport**

Assure l'approvisionnement et le stockage des fournitures, matériels et équipements nécessaires à la maintenance continue des installations industrielles et l'entretien des bases de vie.

##### **➤ Sous division intendance**

Assure les prestations en matière de restauration, hébergement et de la gestion du patrimoine de l'entreprise.

### **I-1-6-c-Politique HSE du Groupe SONATRACH**

La préservation de la santé, de la sécurité et de l'environnement est l'une des nouvelles préoccupations majeures de la SONATRACH.

Le 27 avril 2004, le Directeur Général de Sonatrach, a signé la déclaration de politique HSE du groupe Sonatrach, s'engageant à garantir la santé, la sécurité et la protection de l'environnement et à minimiser les risques HSE associés aux activités du groupe.

Sonatrach consacre chaque année d'importants moyens humains et financiers pour consolider ses performances dans la protection de l'environnement tout en agissant dans une perspective de développement durable, en privilégiant le principe de prévention de la pollution tout en favorisant chaque fois que possible la réduction de la pollution à la source.

Les objectifs de réduction de l'impact sur l'environnement de toutes les activités de Sonatrach, se traduisent par :

- La préservation des ressources naturelles.
- La prévention intégrée de la pollution.
- L'adoption de technologies moins polluantes.
- La gestion rationnelle des déchets.
- La réduction des rejets liquides (traitement des eaux, traitement des bourbiers, STEP....).
- La réduction des émissions atmosphériques [1].

### **I-2-présentation de la station d'épuration de Hassi R'Mel**

#### **I-2-1-Conception de la station d'épuration de Hassi R'Mel**

La station d'épuration des eaux usées urbaines de Hassi R'Mel a été implanté dans le cadre de la protection de l'environnement par la société nationale (SONATRACH)

Mise en service en 2001 pour traiter un volume de 3750 m<sup>3</sup>/jr pour 15000 habitants

#### **I-2-2-les objectifs de la station d'épuration de Hassi R'Mel**

- La protection de l'environnement tout en se conformant à la législation et la réglementation en vigueur.
- La préservation des milieux récepteurs
- L'épuration des eaux usées urbaines
- La valorisation des eaux épurées en irrigation des espaces verts
- La protéger la santé publique contre les maladies à transmission hydrique

### **I-2-3-La description du fonctionnement de la station d'épuration de Hassi R'Mel**

Le principe du traitement adopté est l'épuration biologique par boues activées à faible charge et à aération prolongée qui consiste à imiter l'autoépuration naturelle à l'échelle industrielle.

Ce procédé biologique se base sur la mise en contact de la pollution organique présente dans les eaux usées avec le floc bactérien en présence d'oxygène généré par l'aération prolongée. La finalité de ce traitement est d'obtenir un effluent épuré tel que son rejet ne crée aucune nuisance au milieu récepteur.

#### **I-2-3-a- Données de base de la station d'épuration de Hassi R'Mel**

La conception de cette station répond aux caractéristiques suivantes [2]:

- Type de station : station à faible charge à aération prolongée
- Population : 15000 EH
- Nature des eaux usées : urbaine
- Débit moyen journalier : 3000 m<sup>3</sup>/j
- Débit moyen horaire : 125 m<sup>3</sup>/h
- Débit de pointe horaire : 240 m<sup>3</sup>/h
- Concentration en DBO<sub>5</sub> : 270 mg/l
- Concentration en MES : 350 mg/l

#### **I-2-3-b- Compartiments de la station d'épuration de Hassi R'Mel**

Les eaux usées subissent dans la STEP un certain nombre d'opérations mécaniques ou physiques dans les ouvrages suivants :

- ❖ Un poste de relevage avec dégrilleur (grossier et fin)
- ❖ Ouvrage combiné déssableur /déshuileur
- ❖ Un bassin d'aération (aération prolongée)
- ❖ Un bassin de clarification (décanteur secondaire)
- ❖ Bassin de chloration
- ❖ Lits de séchage

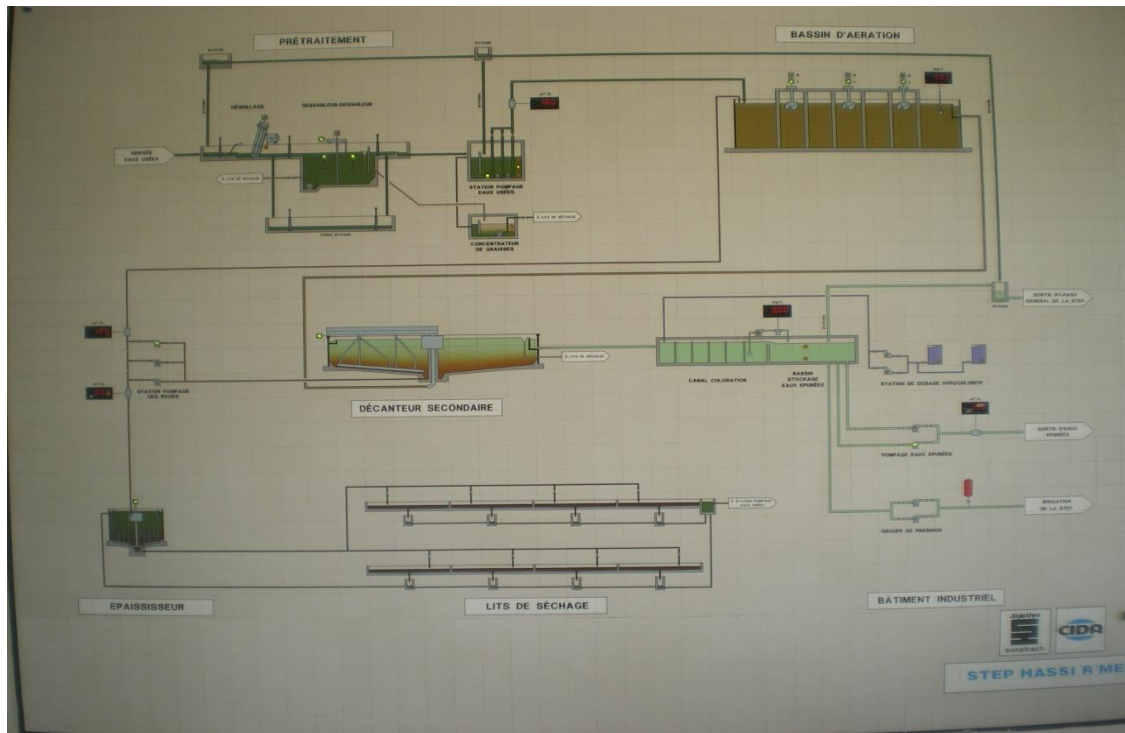


Figure I-2. Schéma synoptique de la STEP de HR

### I-2-4- Étapes du traitement

La station se compose d'une série d'ouvrage, les eaux usées sont acheminées vers la station par deux collecteurs principaux à partir de quatre stations de relevages.

#### I-2-4-a- Le prétraitement

Tout traitement de dépollution doit comporter ce qu'il est convenu d'appeler un prétraitement qui consiste en un certain nombre d'opérations mécaniques ou physiques destinées à extraire le maximum d'éléments dont la nature et la dimension constitueraient une gêne ultérieurement

A l'entrée de la station d'épuration, le prétraitement a pour rôle l'élimination des éléments gênants au bon fonctionnement de l'installation. Trois étapes sont mises en œuvre :

##### 1) Dégrillage et tamisage

L'eau brute passe à travers des grilles composées de barreaux placés inclinés de  $60^\circ$  sur l'horizontale pour élimination des corps solides et volumineux



photographie I-1. Le dégrilleur de la STEP de HR

## **2) Dessablage**

Les sables sont éliminés par décantation pour éviter l'abrasion des équipements mécaniques.

## **3) Dégraissage et déshuilage**

Enlèvement par raclage des matières grasses et des huiles ces dernières, lorsqu'elles ne sont pas émulsionnées, sont séparées sous forme de boues flottantes dans des ouvrages comportant une zone d'aération où les bulles d'air augmentent la vitesse de montée des particules grasses et une zone de tranquillisation.

Toutes les matières éliminées au cours du prétraitement sont évacuées en décharge, et ne rejoignent pas la filière de traitement des boues. Il arrive aussi que les graisses, exclusivement envoyées dans le digesteur lorsque la station d'épuration possède un atelier de digestion anaérobie.

Le dessablage et le déshuilage se réalise dans un même ouvrage combinés



Photographie I- 2. Le déssableur /déshuileur de la STEP de HR

### **I-2-4-b-Traitements biologiques**

L'épuration biologique a pour but d'éliminer la matière polluante biodégradable contenue dans l'eau domestique en la transformant en matières en suspension : micro-organismes et leurs déchets, plus facilement récupérable.

Le traitement biologique classique des eaux domestiques s'effectue par voie aérobie. Le traitement consiste à dégrader les impuretés grâce à l'action d'une biomasse épuratrice, à laquelle doit être fourni l'oxygène nécessaire à son développement. L'apport d'oxygène est assuré par les aérateurs comme le montre la figure I-3. En simplifiant, on peut décrire ce processus par l'équation

Eau résiduaire + biomasse épuratrice +  $O_2$  = eau purifiée + accroissement de biomasse + gaz résiduaire ( $CO_2...$ ).

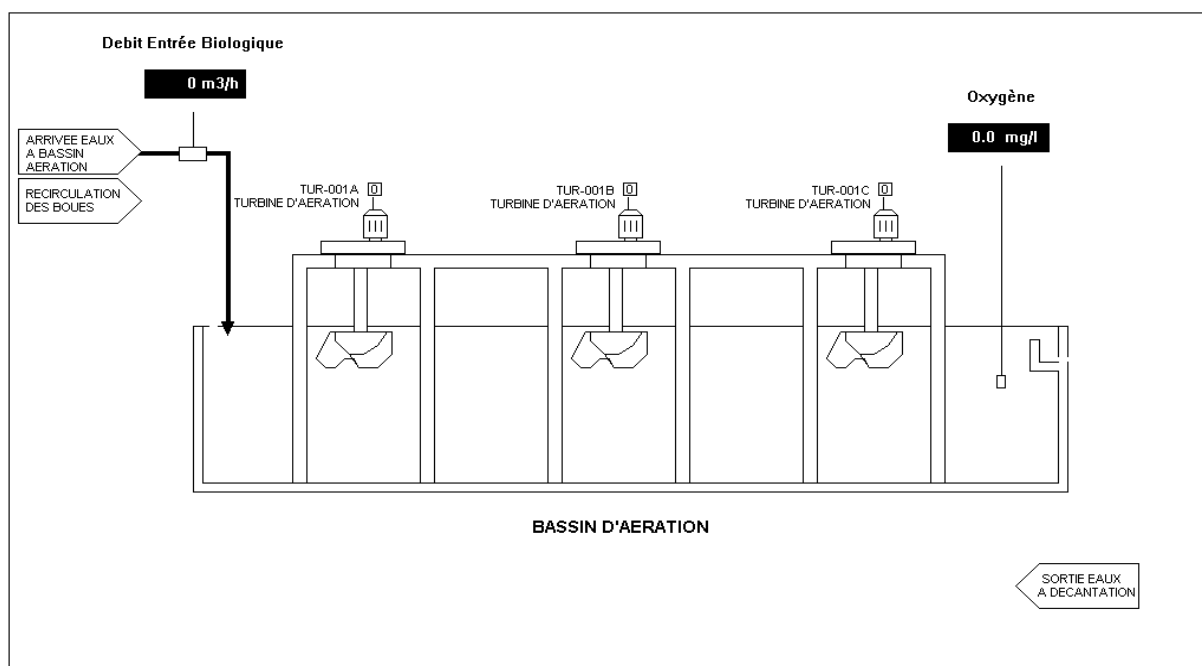


Figure I-3.Traitement biologique (aération).

Ce traitement est réalisé dans un ensemble complet d'ouvrages qui comprend :

- **Le bassin d'aération** : il est de forme circulaire de 28 m de diamètre avec une surface de 637,6 m<sup>2</sup>, la hauteur d'eau prévue est de 3,6 m .cet ouvrage est alimenté en eaux provenant du déssableur et déshuileur, équipé de trois aérateurs de surface à axe vertical et de vitesse de rotation à sens inverse pour [2] :
  - apporter l'oxygène nécessaire aux bactéries épuratrices
  - réaliser une intense turbulence qui permet d'une part le maintien en suspensions des boues activées et d'autre part de renforcer le contact eau usée-bactérie



Photographie I-3. Le bassin d'aération de la STEP de HR

- **Le bassin de clarification** : ouvrage secondaire circulaire de 20,5 m de diamètre et de surface de 330 m<sup>2</sup> pour une hauteur d'eau prévue de 2,96 m .l'alimentation en eau épurée provenant du bassin d'aération est assurée par des conduite. Ce décanteur est équipé d'un pont racleur de fond servant à ramener les boues décantées sur le radier de l'ouvrage ensuite seront envoyées par tuyauterie vers la station de pompage [2].



Photographie I- 4. Le bassin de clarification de la STEP de HR

➤ **le poste de recirculation**

Une partie des boues est renvoyée par des pompes dans les bassins d'aération pour maintenir la population des microorganismes intervenant dans l'épuration, le reste des boues, appelé boues en excès, est soutiré pour subir un traitement. On peut prolonger le temps d'aération de façon à obtenir une minéralisation plus forte des boues, c'est le procédé couramment employé dans l'aération prolongée. La quantité des boues produites est d'autant plus importante que la charge organique (DBO en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) est plus grande.



Photographie I-5. Boue recirculée au bassin d'aération de la STEP de HR

**Description du procédé «Traitements aux boues activées »**

Le réacteur aux boues activées est un vase de culture bactérienne fonctionnant en continu. Les eaux usées décantées fournissent toutes les matières nutritives nécessaires y compris l'azote et le phosphore et toutes les boues recirculées assurent l'abondance des microorganismes. Le milieu étant suffisamment oxygéné, il s'y établit une flore bactérienne psychrophile ou mésophile, hétérotrophe et aérobie [3].

Grâce à leurs enzymes, ces bactéries solubilisent la matière colloïdale et utilisent les matières organiques dissoutes soit pour se procurer par oxydation l'énergie nécessaire, soit pour

synthétiser du protoplasme et se multiplier. On estime que 35% de la matière organique est oxydée pour former  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $NH_3$ ...et libérer de l'énergie alors que les 65% restés sont assimilés pour former de nouvelles cellules.

Pour obtenir le haut rendement recherché il faut une recirculation importante de la biomasse et ceci n'est possible qu'avec une bonne décantation dans le décanteur secondaire.

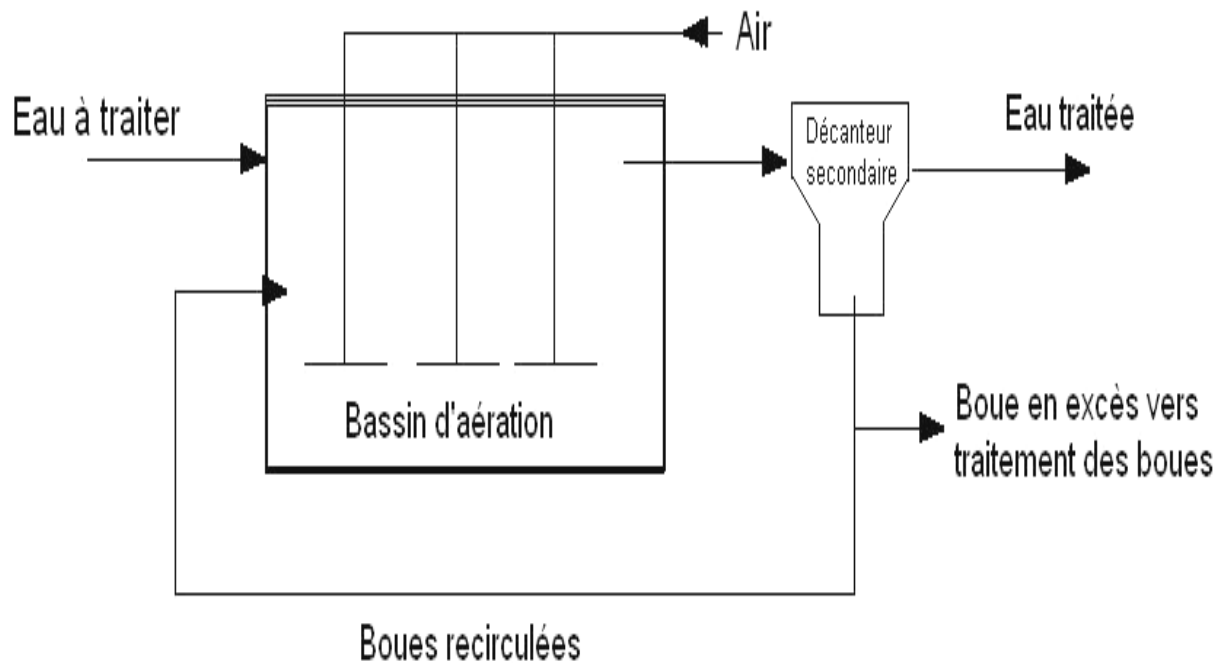


Figure I-4. Schéma synoptique du procédé de traitement à boue activée

#### I-2-4-c- Le traitement tertiaire (chloration)

C'est un traitement d'épuration supplémentaire et complémentaire aux traitements physiques et biologiques qui sont incapable d'une détruire totalement la pollution.

Le traitement tertiaire dans la STEP de Hassi R'Mel se fait dans un bassin de stérilisation à l'hypochlorite de sodium à 47°. Sa distribution est assurée par deux pompes doseuses liés aux cuves de stockage. Ces dernières sont placées séparément dans un local près du bassin l'eau s traitée, clarifiée avec une concentration finale en désinfectant égale à 1,2 mg/l. L'eau éliminée de toute sorte de pollution microbienne avant son rejet au milieu naturel.



Photographie I-6. La chloration de l'eau traitée

#### **I-2-4-d-Le traitement des boues dans la station d'épuration de Hassi R'Mel**

Cette opération de traitement consiste à enlever une partie d'eau présente dans la boue et de transformer cette dernière en un produit séché apte à être transporté sans nuisance.

Les étapes de la filière de traitement des boues au niveau de la station d'épuration de Hassi R'Mel sont les suivantes :

##### **➤ Epaissement**

A la sortie du décanteur secondaire, les boues récupérées, sont sous forme liquide, la déshydratation permet une nette réduction en volume d'eau. La suspension boueuse introduite dans l'épaississeur muni de racleur avec un temps de séjour de 23 heures, de manière à provoquer le tassement des boues, évacuées par le fond de l'ouvrage gravitairement vers les lits de séchage. Les eaux interstitielles sont récupérées par le haut, retournées vers la station de pompage à la tête de station.



Photographie I- 7. L'épaisseur de la STEP de HR

### ➤ **Le séchage naturel**

La concentration des boues en matières sèches est de 30 g/l à la sortie de l'épaisseur arrivées aux lits de séchage, elles sont épandues afin d'être déshydratées [2].

Quelques données relatives à l'étape de séchages au niveau de la STEP de Hassi R'Mel

Nombre de lits de séchage : 8

Surface du lit de séchage : 160 m<sup>2</sup>

Production annuelle de boues : 9361 m<sup>3</sup>/an

Hauteur du lit de séchage : 0,4 m

Durée de séchage : 20 jours



Photographie I- 8. Lit de séchage de boues dans la STEP de HR

### **I-2-5-Généralités sur les boues résiduaires**

Les procédés de dépollution visent à séparer les diverses fractions polluantes de l'eau. C'est de traitements, qui ont pour finalité le rejet d'une eau suffisamment dépolluée pour être acceptable par le milieu récepteur. Les boues ainsi produites sont plus ou moins concentrées et solides et sont la conséquence logique de l'activité d'épuration des stations sur les eaux usées [3].

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.

Les principaux inconvénients sont au niveau du transport et du stockage qui conduisent souvent à des problèmes de manipulation et des nuisances olfactives. Ceci impose le choix d'une filière de traitement dès l'installation de la STEP.

## **-Différents types des boues**

Les boues de station d'épuration sont classées en quatre groupes.

### **a) Les boues primaires**

Récupérées par simple décantation des eaux usées n'ayant pas subi de traitement, elles sont très hétérogènes, riches en matières minérales (micro- sables, terres) et contiennent de 65 % à 70 % de matières organiques putrescibles et susceptibles d'évolution [4]. Elles sont riches en eau, environ 90 à 95 %, et présentent une odeur fétide [5,6].

### **b) Les boues secondaires**

Ce sont les boues issues des clarificateurs ou décanteurs après traitement biologique que se soit en culture libre (boues activées) ou en culture fixées (lits bactériens disque biologiques).

Elles sont donc constituées essentiellement de corps bactériens et de leurs sécrétions, elles sont de couleur sombre, très organiques (75 %) plus homogènes que les boues primaires et ont moins d'odeur que les précédentes [4,6].

### **c) Les boues physico-chimiques**

Variante des boues primaires sont obtenues par adjonction de réactifs (sels de fer, d'aluminium) visant à coaguler la fraction colloïdale des matières contenues dans les eaux usées. Présentent des concentrations assez élevées, elles nécessitent une stabilisation et posent des problèmes spécifiques de destination finale du fait des ajouts de réactifs, et plus particulièrement de sels métalliques.

### **d) Les boues mixtes**

Telle est l'appellation du mélange des boues secondaires avec les boues primaires. Les boues mixtes sont celles qui sont issues de la quasi-totalité des filières de traitement. Ces boues font l'objet de diverses phases de traitement visant à réduire leur volume, à les stabiliser et à les rendre facilement manutentionnaires pour les évacuer de la station d'épuration. Avant ces traitements, elles portent le nom de boues fraîches, terme qui recouvre généralement l'association boues primaires – boues secondaires

En fonction de la qualité de l'eau à épurer, et du mode de traitement adopté, on distingue deux grandes familles :

- Les boues à caractère minéral.
- Les boues à caractère organique.

La stabilisation conduit aux boues digérées soit aérobies soit anaérobies [7].

### **I-2-6-Traitement des boues**

Le traitement des boues permet la réduction :

- De la masse et du volume des boues.
- Du pouvoir pathogène et les risques sanitaire
- Du pouvoir fermentescible et toutes nuisances olfactives

Une station d'épuration d'eau résiduaire urbaine a une production journalière de deux litres et demie de boue liquide par habitant et par jour. Le choix d'une filière de traitement des boues dépend de plusieurs facteurs [8] :

- La nature de l'effluent
- Le type de traitement appliqué en épuration
- La capacité de l'installation
- Des possibilités financières
- La destination finale des boues

#### **-La stabilisation**

Pour empêcher ou réduire les problèmes de fermentation et d'éviter ainsi les nuisances olfactives. La stabilisation peut être biologique par voie aérobie (compostage) ou anaérobie (méthanisation) ou chimique (chaulage ou autres traitements). La stabilisation biologique présente l'avantage de limiter l'évolution ultérieure de la composition des boues.

#### **-La déshydratation**

La concentration des boues a pour objectif de réduire leur volume (plus de 97 % d'eau) par épaissement et/ou par déshydratation pour 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, épaissement, déshydratation ou séchage thermique, on obtient des boues à différents pourcentages de siccité :

Boues liquides (4 à 10 %), Boues pâteuses (10 à 25), Boues solides (25 à 50 %),

Boues granulées ou en poudre pour une siccité supérieure à 85 % [9].

### -La déshydratation naturelle (lits de séchage)

La déshydratation sur lits est régie dans un premier temps par un phénomène de filtration gravitaire et de drainage jusqu'à une teneur en eau de 80% durant un temps de 1 à 5 jours selon la nature de la boue. Dans un deuxième temps un séchage atmosphérique par évaporation se produit et termine la déshydratation des boues.

### I -2-7- Composition des boues résiduaires

Comme il a été signalé auparavant, la composition des boues résiduaires est fonction de nombreux paramètres notamment, de la composition des eaux usées, du caractère du réseau d'assainissement, du type de traitement des eaux et des boues [8].

Après épaissement, une boue liquide d'aération prolongée a la composition pondérale moyenne suivante (tableau 1).

Tableau I-1 : Composition des boues d'aération prolongée [8]

<b>BOUES RESIDUAIRES</b>	
Phase liquide : 95 % à 98 % Eau : 950 g / l Sels dissous : 1 à 2 g / l	Phase solide : 2 à 5 % -Matières minérales : 30 à 40 % poids sec - Matières organiques : 60 à 70 % poids sec
Matières grasses Azote (N) Phosphore (P) Potassium (K) Métaux lourds	: 4 à 8 % de la matière sèche : 4 à 7 % de la matière sèche : 2 % de la matière sèche : 0,25 % de la matière sèche : 0,15 % de la matière sèche

## I -2-8- Propriétés des boues

### a) propriétés physique

A la sortie de la station d'épuration, les boues renferment beaucoup d'eau. Par des procédés mécaniques ou thermiques, elles peuvent perdre une partie de l'eau et prendre l'un des états physiques suivants :

- liquide    : avec un pourcentage de matière sèche de 2 à 10 %
- Pâteuse    : d'une teneur en matière sèche de 15 à 25 %
- Solide      : avec un pourcentage de matière sèche de 25 à 50 %
- poudre     : avec un pourcentage de matière sèche de plus de 85 %

La couleur de boues varie entre le brun et le gris et leur odeur est souvent très désagréable car ce sont des produits facilement fermentescibles [9].



Photographie I-9. Aspect de boue liquide sur un lit de séchage en STEP de HR



Photographie I-10. Aspect de boue solide sur un lit de séchage en STEP a HR

#### **b) La teneur en matière sèche**

Il s'agit de mesurer le poids du résidu sec après chauffage à 105°C jusqu'au poids constant, on l'exprime généralement en pourcentage, sinon en g/l [9].

#### **c) La teneur en matières volatiles**

On mesure cette teneur par la différence entre le poids de boues sèches 105°C et celui de cette même boue après chauffage jusqu'au poids constant à 550°C [10].

#### **d) La teneur en eau interstitielle**

L'eau contenue dans la boue se présente sous deux formes :

- Eau libre qui s'élimine facilement par filtration ou décantation.
- Eau liée contenue dans les molécules chimiques, les substances colloïdales et les cellules de matières organiques qui ne peut s'éliminer que par la chaleur.

On mesure la proportion entre l'eau liée et l'eau libre par la perte de poids à température constante en fonction du temps [11].

### **I-2-9-Les risques liés aux boues résiduaires**

Les boues d'épuration peuvent contenir des micro-organismes pathogènes et des contaminants chimiques. Ces éléments constituent des dangers, tant sanitaires qu'environnementaux.

#### **a) Risques biologiques**

Les micro-organismes jouent un rôle important dans les processus d'épuration. Ils sont présents en abondance dans l'environnement et seule une faible fraction est pathogène

Les pathogènes présents dans les boues d'épurations proviennent des eaux résiduaires acheminées vers la STEP [12].

La teneur des boues en micro-organismes pathogènes dépend :

- de la nature des rejets recueillis par le réseau (domestiques ou industriels)
- du type de réseau (unitaire ou séparatif)
- de l'état sanitaire de la population raccordée
- des populations animales vivant dans le réseau (rongeurs)
- de la taille de l'agglomération

#### **b) Risques chimiques**

Il est possible de trouver dans les boues d'épuration deux grands types de composés chimiques potentiellement toxiques : les éléments traces métalliques (EMT) et les composés traces organiques (CTO).

Ces contaminants chimiques sont concentrés dans les boues d'épuration lors du traitement des eaux usées : le taux de capture des contaminants par les boues est de l'ordre de 70 à 90 %. Leurs concentrations varient selon la qualité des eaux entrantes dans la station d'épuration et les traitements de stabilisation et/ou de déshydratation employés des traitements effectués sur les filières eau et boues [13].

## **I-10-Le devenir des boues traitées**

Les principales destinations des boues de station d'épuration des eaux urbaines sont [14] :

- Le recyclage : essentiellement en agriculture en épandage avec ou sans complémentation, aussi en réhabilitation de sol dégradé, en paysagisme urbain. Le recyclage a pour but de réintégrer les éléments constitutifs de la boue dans le sol en utilisant leur pouvoir fertilisant.
- La mise en décharge dans des CET.
- La valorisation énergétique par des procédés thermiques (incinération) ou méthanisation.

Cette dernière méthode de valorisation est clairement détaillée dans le chapitre suivant et qui fait l'objet de notre expérimentation.

## II-1-Historique de la méthanisation

Tout est parti des gaz de marais. la méthanisation a été découverte en 1776 par volta. Pendant une de ses promenades. Il remarqua que du gaz se dégageait d'un marais. Il mit en évidence l'inflammabilité de ce gaz. Lavoisier, en 1787 lui donne le nom de « gaz hydrogenium carbonatum ». Le terme méthane est proposé en 1865 et confirmé en 1892 par un congrès international de nomenclature chimique. Sa formation est attribuée à l'activité microbienne se développant dans des milieux naturels anaérobies [15].

Le premier digesteur produisant du biogaz a été mis en place à Bombay en 1852. Depuis, les pays asiatiques ont vulgarisé cette bioconversion pour leur production énergétique avant qu'elle ne se répartisse dans le monde surtout durant les deux guerres mondiales et le choc pétrolier de 1970.

Actuellement, un regain d'intérêt particulier est attribué à la bio méthanisation surtout dans la communauté européenne puisqu'elle assure outre la production énergétique renouvelable, le traitement des déchets urbains, agricoles et industriels [16].

Les premiers systèmes de digestion discontinue ont été développés en Algérie à partir de 1939 par Isman et Ducellier [8]. Très peu d'intérêt a été apporté à cette énergie malgré les applications réussies qui ont été réalisées :

- En 1940 à l'Institut National Agronomique d'El Harrach,
- En 1985 au Centre de Développement des Energies Renouvelables à travers la mise en place de deux installations expérimentales à IGLI (Béchar) et à Ben Aknoun.

Depuis la fin de l'année 2001, cette activité est reprise au niveau du C.D.E.R avec la conception et la réalisation d'un premier digesteur de 800 litres puis d'un second de 70 litres. Ils sont utilisés, en premier lieu, pour des caractérisations quantitatives et qualitatives du biogaz ainsi que pour l'optimisation de sa production à partir des bouses de vaches [16].

## II-2-Définition de la méthanisation

La méthanisation ou digestion est un procédé anaérobie de dégradation biologique qui transforme la matière organique en biogaz (méthane et dioxyde de carbone) par une flore microbienne complexe et spécifiques [15].

Le digestat est le résidu liquide contenant les matières non dégradées, produit organique stable, approprié pour l'enrichissement des sols.

### II-3-Etapes de la méthanisation

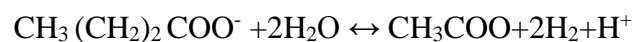
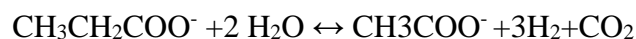
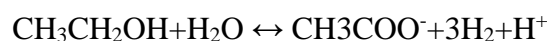
Bien que nombreuses et complexes, les réactions se déroulant dans un digesteur anaérobie peuvent se diviser en trois étapes principales réparties entre différents groupes de bactéries : hydrolyse-fermentation, acétogénèse et méthanogénèse [17].

#### 1) Hydrolyse et acidogénèse

La première étape est l'hydrolyse ou, la décomposition par l'eau de la matière organique présente sous forme de grosses molécules, solubles ou non, comme les protéines, les graisses, les celluloses et amidon... Les bactéries participant à cette étape ont un métabolisme de type anaérobie strict ou facultatif [18] et forment un ensemble phylogénétique hétérogène regroupant de nombreux groupes bactériens [19,20]. Ces polymères sont cassés en monomères, briques élémentaires de la matière organique comme les acides aminés, les acides gras et les sucres simples. Un premier groupe de bactéries, les bactéries acidogènes, transforment le substrat en un mélange d'acides (lactique, butyrique, etc...) et de composés neutres (ex : éthanol).

Au cours de l'acidogénèse, ces monomères sont métabolisés par des microorganismes fermentaires pour produire principalement des acides gras volatils (AGV) (acétate, propionate, butyrate, isobutyrate, valérate et isovalérate), mais aussi des alcools, du sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S), du CO<sub>2</sub> et de l'hydrogène. Cette étape mène ainsi à des produits de fermentation simplifiés.

Equation des réactions de dégradation anaérobie de l'éthanol, du propionate et du butyrate



#### 2) L'acétogénèse

Un deuxième groupe de bactéries transforme ensuite les divers acides et les autres produits issus de l'étape précédente en éléments précurseurs du méthane : acide acétique, dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et hydrogène (H<sub>2</sub>). Un transfert efficace de l'hydrogène des bactéries acétogènes aux bactéries méthanogènes est indispensable pour assurer le bon déroulement de l'ensemble du processus de méthanisation.

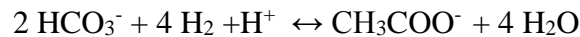
On distingue deux groupes de bactéries acétogènes :

- les bactéries productrices obligées d'hydrogène

- les bactéries acétogènes non syntrophes

On divise classiquement les bactéries acétogènes non syntrophes en deux groupes. Un premier groupe est formé des bactéries qui produisent de l'acétate, du butyrate et d'autres composés à partir de sucres simples : les bactéries de ce groupe sont classées en plusieurs genres tels que *Acetobacterium*, *Acetogenium*, *Clostridium*, *Sporomusa*, etc ... [21].

Les bactéries « homo-acétogènes » constituent le second groupe, elles utilisent l'hydrogène et le dioxyde de carbone pour produire de l'acétate selon la réaction suivante :



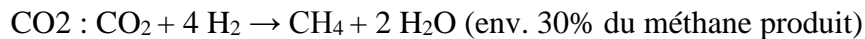
### 3) Méthanogénèse

Enfin les bactéries méthanogènes utilisent ensuite les précurseurs formés lors des étapes précédentes pour produire du méthane. Ces étapes biochimiques et microbiologiques se déroulent simultanément ou séparément suivant le procédé anaérobie utilisé mais à des vitesses différentes.

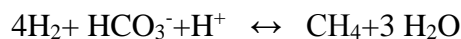
Dernière phase au cours de laquelle l'acétate ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ), l'hydrogène et le bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) sont convertis en méthane par des micro-organismes méthanigènes.

*a) Par les méthanogènes hydrogénophiles (ou hydrogénotrophes)*

Elles tirent leur énergie de la production de méthane par réduction du dioxyde de carbone selon la réaction suivante



Ou la réduction de l'acide formique par l'hydrogène selon les réactions présentées ci-dessous



*b) Par les méthanogènes acétoclastes (ou acétotrophes)*

Ces organismes produisent du méthane à partir d'acide acétique, de méthanol et de méthylamine. Les deux genres les plus fréquemment rencontrés dans un digesteur sont *Methanosarcina* et *Methanosæta* (ou *Methanothrix*) [22].

Décarboxylation de l'acide acétique :  $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{CO}_3$  (70 %)

Les *Archaea* du genre *Methanosaeta* utilisent l'acétate comme unique source de carbone pour produire le méthane selon la réaction suivante :



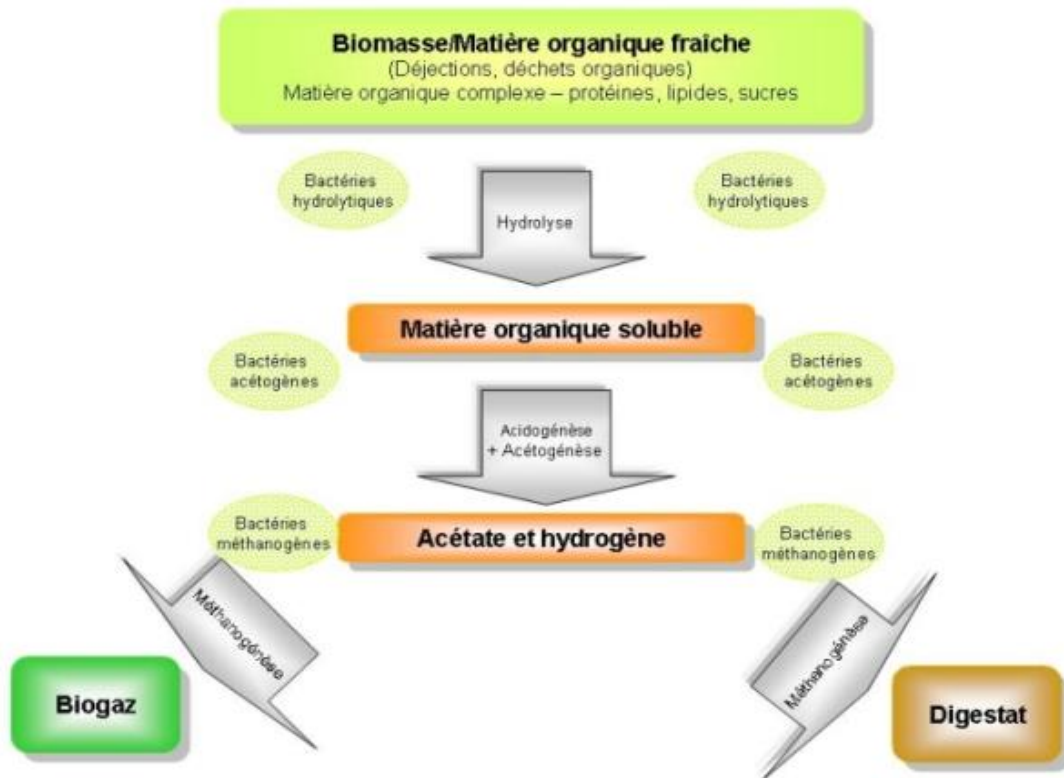


Figure II-1. Schéma synoptique de la méthanisation

### II-3-1-Micro-organismes responsables de la méthanisation

Appelés méthanogènes appartiennent à trois groupes différents suivant leur action dans le processus [15].

#### Bactéries hydrolytiques et fermentatives

Elles sont responsables des réactions d'hydrolyse et d'acidogènes. Elles dépendent principalement de la qualité et de la nature de la matière nutritive.

#### Bactéries acétogènes

Ce type de bactéries est répartie en trois catégorie : homoacetogene, syntrophes et sulfato-réductrice. Elles sont responsables de l'oxydation des acides butyrique, propionique, de l'éthanol et de la fabrication de l'hydrogène, du dioxyde de carbone, de l'acide éthanoïque et ses sels.

#### Bactéries méthanogènes

Ce sont des bactéries à caractère spécifique. Elles appartiennent au groupe des bactéries anaérobies strictes

## II- 3-2- Les paramètres physico-chimiques de la méthanisation

Le temps de séjour, la température, le pH, la composition du substrat à digérer, l'agitation, l'humidité, présence d'inhibiteur sont des paramètres à contrôler durant la méthanisation afin d'assurer un bon déroulement du procédé biologique :

### ➤ Temps de séjour hydraulique (TSH)

Le temps de séjour hydraulique ou temps de passage est le temps de contact entre la biomasse et l'effluent. Il représente le rapport entre le volume du bioréacteur et le débit d'alimentation. Ainsi, la nature des composés à dégrader, la quantité de biomasse et leurs vitesses de réaction sont les paramètres pour déterminer la valeur minimale du TSH [15].

### ➤ Température

La digestion anaérobie de la matière organique ne produisant pas significativement de chaleur, il est nécessaire de chauffer les digesteurs pour maintenir une température compatible avec une bonne activité microbienne. Ce chauffage est assuré généralement en consommant une partie du méthane produit. Pour limiter cette autoconsommation, les opérateurs isolent thermiquement les digesteurs et préfèrent travailler en zone mésophile, c'est-à-dire dans un domaine de températures comprises entre 25 et 40°C.

Il est possible de travailler en zone thermophile, entre 45 et 55°C, pour accroître les vitesses de biodégradation, donc la productivité en méthane et réduire la taille des digesteurs. Cependant, cette approche exige une isolation thermique optimale, pour ne pas accroître l'autoconsommation, et est plus difficile à maîtriser. Dans tous les cas, les variations brutales de température (plus de 1°C en moins d'une journée) sont à éviter.

### ➤ pH

La zone optimale de pH pour la méthanisation est située aux alentours de la neutralité. Les bactéries méthanogènes sont fortement inhibées en dessous de 6. Les bactéries acidogènes supportent mieux les pH inférieurs à 6. Une chute de pH est donc le signe d'un dysfonctionnement. Dans la plupart des cas, le pH est autorégulé dans le digesteur avec des valeurs optimales comprises entre 6,8 et 7,4 mais un ajout de bicarbonate de soude peut être nécessaire pour le maintenir.

➤ **Charge organique**

Les substrats à méthaniser peuvent être caractérisés par leur DCO. On peut déterminer la charge organique introduite dans le digesteur en kg d DCO par jour. Ce paramètre permet de calculer la concentration du substrat pour les réacteurs à biomasse fixée et de connaître les conditions d'alimentation des bioréacteurs [15].

Si le déchet est bien fermentescible, il faut éviter les surcharges brutales qui risquent de déséquilibrer le processus et d'acidifier le milieu par suite d'une trop rapide production d'acides gras volatils.

➤ **Oxygénation et teneur en eau**

L'oxygène est extrêmement toxique pour les bactéries anaérobies strictes (acétogènes et méthanogènes). Il est donc indispensable de protéger le milieu de toute entrée d'air. Une façon simple de procéder est de travailler en système noyé (saturé en eau). Les procédés de méthanisation sont donc spécialement adaptés pour les déchets très humides (teneur en eau supérieure à 80 %) parce que la présence d'eau est indispensable à toute activité biologique.

➤ **L'agitation**

Le brassage doit avoir la performance bien suffisante pour un meilleur contact entre la bactérie méthanogène et le substrat à digéré afin d'assurer l'homogénéité de la température dans le digesteur, d'éviter la formation d'une croûte superficielle et de faciliter le dégagement du biogaz.

➤ **Potentiel rédox**

Vogels *et al.* [23] définissent un milieu anaérobie lorsqu'il possède un potentiel rédox de -300 à -500 mV. La Figure I.2 présente les potentiels rédox des demicouples impliqués lors de la dégradation de la matière organique. L'échelle des potentiels rédox Eh (mV) est donnée pour un pH de 7 et une  $PCO_2$  de  $10^{-2}$  atm. Les  $\Delta G^\circ$  sont données en kJ par mole d'électrons. Les *Archaea* méthanogènes sont des microorganismes anaérobies stricts, et des traces d'oxygène suffisent à les tuer, en grande partie par auto-oxydation de certains cofacteurs essentiels à leur métabolisme énergétique. Elles ne se développent qu'à de très faibles potentiels d'oxydoréduction (Eh) (-330 mV d'après Demeyer [24], autour de -400mV selon Oremland [25] et entre -430 et 520 mV d'après Jee *et al.* [26].

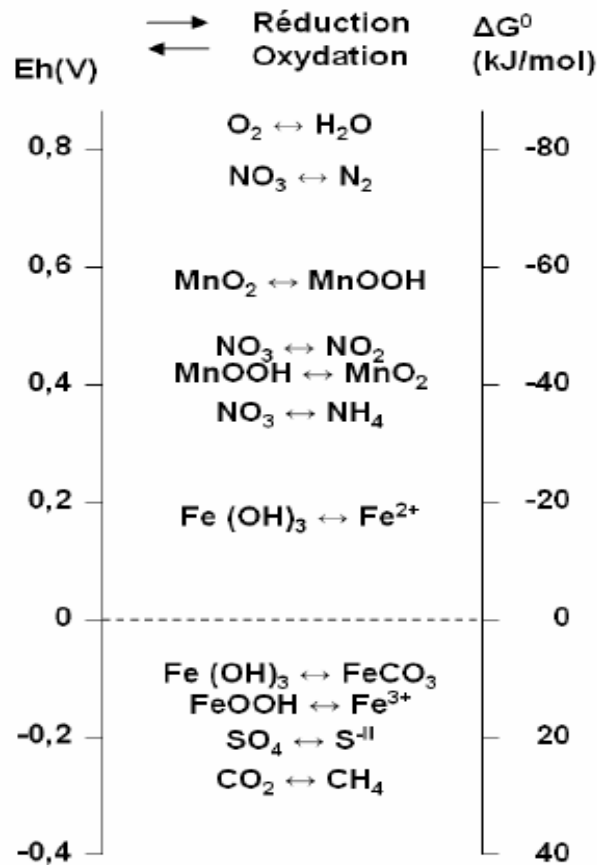


Figure I.2 : Potentiel rédox des demi-couples impliqués dans les réactions biochimiques

### II-3-3-La cinétique de la méthanisation

Globalement, la digestion anaérobie apparaît comme la succession de deux réactions en chaîne qui conduit la matière organique à passer sous forme d'acide volatil dans un premier temps puis sous forme de méthane et de gaz carbonique principalement dans un deuxième temps.

La cinétique de la réaction globale dépend uniquement de la vitesse de l'étape la plus lente, donc de la phase de méthanisation en raison du faible pouvoir de régénération des bactéries méthaniques et de leur sensibilité aux conditions extérieures (pH, température...). Lorsqu'on s'écarte des conditions optimales de développement des bactéries méthaniques, la cinétique de gazéification est ralentie et on assiste à une accumulation d'acides volatils dans le digesteur, donc à une chute de pH qui pourrait atteindre des valeurs égales à 5 et même moins allant jusqu'à contrecarrer tout processus de digestion [27].

La température joue un rôle prépondérant sur les vitesses de réactions biochimiques mises en jeu.

### II-3-4-Contrôle du procédé de la méthanisation

L'exploitation d'un digesteur anaérobie s'avère souvent délicate et exige un contrôle régulier des paramètres qui caractérisent globalement le fonctionnement de l'installation ou qui décrivent les équilibres et déséquilibres pouvant survenir au sein du digesteur

La gestion sera d'autant plus facilitée qu'un certain nombre d'automatisme et de mesure pourront être réalisés en continu

- ❖ Mesure de la température dans le digesteur, en plusieurs points si possible commandant automatiquement le réchauffage.
- ❖ Le pH dont la valeur doit se maintenir dans une plage comprise entre 6,5 et 7,6, une diminution de celui-ci est l'indice d'une accumulation d'acides volatils et donc d'un déséquilibre entre la flore de liquéfaction et la flore méthanique.

Toute variation importante de l'un des paramètres doit laisser craindre :

- ✓ Une charge trop élevée
- ✓ Une chute brutale de température
- ✓ Un apport de boues trop acides ou toxique
- ✓ Un brassage insuffisant

Là où les causes de mauvais fonctionnement décelées, il convient de les corriger pour assurer un retour à la normale. A cet égard, on signalera qu'un apport de bicarbonate de soude aux boues en digestion, destiné à corriger un pH trop acide tout en intervenant sur la véritable cause de cette acidité.

### II-4-Méthanisation des boues de station d'épuration (STEP)

La méthanisation est très utilisée actuellement dans le traitement des boues de S.T.E.P urbaines ou industrielles. La seule condition restrictive reste leur charge en matière organique fermentescible.

- **Les plus fermentescibles sont :**

Les boues mixtes

- **Les moyennement méthanisables :**

Les boues primaires

- **Les faiblement méthanisables :**

Les boues biologiques

**a) Les résidus de l'assainissement méthanisables**

- *Les graisses*

Les stations génèrent des graisses ou en reçoivent. Les graisses sont généralement fermentescibles et se prêtent bien à la digestion anaérobie, en mélange avec les boues jusqu'à une certaine proportion. Sous réserve d'une séparation graisses/effluents adéquate au moment du dégraissage en tête de station, les graisses peuvent être traitées par digestion.

- *Les matières de vidanges*

Les STEP reçoivent généralement des matières de vidange (fosses septiques, curage de réseaux) ceci constitue un apport de matière organique ponctuel non négligeable pour la station

**b) Comparaison de performances de la méthanisation de différentes boues**

L'aptitude des boues biologiques à la méthanisation dépend de leur âge et de la charge organique. Les boues issues d'une aération « forte charge » sont plus aptes à la digestion anaérobie que des boues « faible charge »

La méthanisation des boues biologiques seules est moins justifiée que celle des boues primaires, car elles sont davantage minéralisées du fait des réactions de dégradation aérobie qui se sont déroulées dans les bassins d'aération.

Les taux d'abattement des matières organiques sont moindres, la productivité en gaz également. Cependant, il peut être judicieux de les digérer malgré tout pour obtenir une meilleure stabilisation. Le tableau II-1 compare la performance de la digestion anaérobie (en mode mésophile) suivant le type de boues entre boue biologique de faible charge et boue mixte [28].

la digestion anaérobie est beaucoup plus performante pour des boues mixtes que pour des boues biologiques de faible charge.

En effet :

- Pour une tonne (MS) de boue mixte introduite en digestion, il ressort 0,6 tonnes (MS) de boues digérées et 220 m<sup>3</sup> de méthane valorisables.
- Pour une tonne (MS) de boue biologique de faible charge introduite en digestion, il ressort 0,8 tonnes (MS) de boues digérées et 110 m<sup>3</sup> de méthane valorisables

Tableau II-1 : Comparaison des performances de la digestion anaérobie pour deux types de boue (biologique et mixte) [28].

	1 t de MS boue biologique de faible charge	1 t de MS boue mixte
Teneur en MV (% de la MS)	67	74
Quantité de MV (t)	0,67	0,74
Taux d'abattement des MV (%)	30	55
MV dégradées (t)	0,2	0,4
Productivité CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /t de MV dégradée)	550	550
Production CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> )	110	220
Taux d'abattement des MS	0,2	0,4
MS en sortie de digesteur (t)	0,8	0,6
Taux de MV en sortie de digesteur (% de la MS)	58	56

### II-5-Déchets méthanisables

Comme la méthanisation est une fermentation biologique anaérobie de matières organiques animales ou végétales produisant le biogaz, il en existe par conséquent plusieurs sources d'émission avec des caractéristiques propres à chacune d'elles.

Les déchets qui peuvent être méthanisables soit naturellement, soit de manière provoquée sont nombreux. On peut citer :

- Les déchets verts
- Les déchets des industries agroalimentaires
- Les déchets agricoles
- Les déchets du marché
- Les déchets putrescibles
- Les ordures ménagères

- Les boues de station d'épuration des eaux usées urbaines ou industrielles
- Les déchets d'élevage.

Pour les procédés volontaires (provoqués), on utilise des digesteurs dans lesquels on introduit les déchets méthanisables liquides ou solides ainsi que les cultures bactériennes.

La teneur en matière méthanisable dépend de la nature du déchet et de son origine. Un bon tri avant tri traitement favorisera une meilleure fermentation par la diversité des matières souvent à la bonne digestion du substrat [15].

### **II-6- Les matières non-méthanisable**

Parmi les différentes matières organiques, seuls les déchets ligneux (bois, branchage,...) ne sont pas aptes à être digérés par les bactéries, il est donc inutile de les mettre dans le digesteur. Il faut également faire attention à ne pas introduire :

- De produits inorganiques (sable, verre, plastique,...), car ils ne sont pas dégradés lors de la digestion, risquent de provoquer des perturbations dans le processus (séparation de phase, sédimentation, flottation, apparition de mousse) et viendront polluer les terres agricoles par l'épandage du digestat.
- Des matières contenant des substances dangereuses telles que les métaux lourds, les polluants organiques ainsi que les substances présentant un risque sanitaire (antibiotiques) ne doivent pas entrer dans le digesteur. Ces substances risquent à la fois de perturber le processus bactérien et d'altérer la qualité du digestat [12].

### **II-7- Définition du biogaz**

Le biogaz est le produit d'un processus naturel de fermentation anaérobie la matière organique (méthanisation). Le biogaz peut être produit sur un site de méthanisation ou récupéré sur un centre de stockage. Composé majoritairement de méthane (CH<sub>4</sub>) et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), c'est un excellent combustible mais aussi un gaz à effet de serre, qui contribue au réchauffement de la planète. En outre, le biogaz est également malodorant en raison de sa richesse en H<sub>2</sub>S [18].

#### **II-7-1- La composition du biogaz**

Le biogaz est un mélange composé essentiellement de 60-65 % de méthane, 40-35 % de dioxyde de carbone. En fonction de sa source, il peut renfermer de l'eau, et à l'état de

traces : de l'ammoniac, hydrogène, amines, hydrogène sulfuré, polysulfures mercaptans, composés organiques volatils (C.O.V) halogènes et métaux lourds. Ces derniers proviennent de la méthanisation des boues des stations d'épuration. C'est un gaz relativement toxique qui contribue à l'effet de serre par sa composition en méthane et dioxyde de carbone. Il doit être par conséquent l'objet d'une élimination /valorisation [15]. La proportion du méthane dans le biogaz dépend de la nature du substrat à méthaniser ceci est indiqué dans le tableau II-2 [17].

Tableau II-2. La composition moyenne du biogaz issu de différents substrats.

Composants	Ordures ménagères	Boues de STEP	Déchets agricoles	Déchets de l'industrie agro-alimentaire
CH <sub>4</sub> % vol	50-60	60-75	60-75	68
CO <sub>2</sub> % vol	38-34	33-19	33-19	26
N <sub>2</sub> % vol	5-0	1-0	1-0	-
O <sub>2</sub> % vol	1-0	< 0,5	< 0,5	-
H <sub>2</sub> O % vol	6 (à 40 ° C)	6 (à 40 ° C)	6 (à 40 ° C)	6 (à 40 ° C)
Total % vol	100	100	100	100
H <sub>2</sub> S mg/m <sup>3</sup>	100 - 900	1000 - 4000	3000 - 10 000	400
NH <sub>3</sub> mg/m <sup>3</sup>	-	-	50 - 100	-
Aromatiques mg/m <sup>3</sup>	0 - 200	-	-	-

### II-7-2-Le potentiel méthanogène

Le test de potentiel méthanogène permet de déterminer la production maximale de biogaz d'un échantillon de biomasse. On mesure la vitesse de production de biogaz (cinétique de fermentation) et la composition en méthane (CH<sub>4</sub>) et dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).

tests sont réalisés dans des réacteurs anaérobies d'une capacité minimale de 1 litre avec un inoculum anaérobie adapté. Fermés hermétiquement, les fermenteurs sont maintenus à 39°C dans un bain thermostaté et agités régulièrement (ou 55°C si flore thermophile). Chaque réacteur est muni d'un système d'enregistrement permettant la mesure du volume de biogaz produit au cours du temps ainsi que l'analyse de sa composition en CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> le potentiel méthanogène de quelques substrats est donné au tableau 3.

Tableau II-3 : le potentiel méthanogène de différents substrats [17].

Substrat à méthaniser	M <sup>3</sup> de méthane par tonne de matière brute
Lisier de bovin	15
Boue de station d'épuration	23
Ensilage de maïs	100
pelouse	123
Graisse d'abattoir	186
Graisse usagée	254

Le pouvoir méthanogène des boues de station d'épuration est nettement faible comparé aux autres substrats testés, contrairement aux graisses qui ont un pouvoir très fort. Notre choix pour l'optimisation de la méthanisation des boues de station d'épuration est basé sur ces données théoriques.

### II-7-3- L'épuration du biogaz

L'épuration consiste à éliminer non seulement les éléments traces comme la vapeur d'eau, l'hydrogène sulfuré, les composés halogénés, mais aussi le gaz carbonique, afin d'enrichir la concentration en méthane.

L'épuration est nécessaire uniquement pour produire un gaz similaire au gaz naturel distribué en réseau, répondant aux normes doit posséder un PCS supérieur à 10,7 kWh/m<sup>3</sup>, ce qui implique d'épurer le biogaz pour obtenir au moins 96,5 % de méthane.

Divers modes de traitement sont possibles. Les plus courants associent en général absorption (lavage à l'eau ou aux amines) et /ou adsorption (tamis moléculaire), et/ou une technique membranaire [18].

### ✓ Les traitements simples

Les traitements les plus simples et les plus fréquents consistent à éliminer les gouttelettes d'eau, ce qui a pour effet de dissoudre en outre une partie des autres contaminants comme H<sub>2</sub>S :

- la filtration : cartouche filtrante, ou filtre à effet cyclone
- traitement thermique : refroidissement du gaz, qui se condense, purge des condensats, puis réchauffage.

### ✓ Les traitements poussés

Un traitement plus poussé peut être nécessaire :

- pour éliminer l'hydrogène sulfuré lorsque la concentration dépasse les spécifications des constructeurs de moteur, ou les normes de rejets d'oxyde de soufre dans l'air.

-pour réduire la teneur en siloxanes (composés gazeux, et non particulaires, à base de silicium), redoutables ennemis des moteurs à gaz, ou des composés chlorés et fluorés.

Le traitement de H<sub>2</sub>S peut s'effectuer in-situ, dans le digesteur : l'ajout de chlorure ferrique, pratiqué par exemple pour fixer le phosphore des eaux usées (boues "tertiaires"), a pour effet de piéger l'hydrogène sulfuré.

L'hydrogène sulfuré peut être éliminé par différentes techniques, notamment :

- par voie biologique : H<sub>2</sub>S est transformé en Soufre élémentaire par des bactéries en présence d'oxygène.
- Par voie physique ou chimique : adsorption sur charbon actif ou tamis moléculaire, lavage.

## II-7-4-Stockage

Le stockage du biogaz permet de lisser les variations de production pour alimenter de manière plus régulière les équipements de valorisation. Il s'agit en général d'une capacité tampon, correspondant à quelques heures, ou quelques minutes, de production.

Le stockage s'effectue généralement à basse pression, souvent à la même pression que dans le digesteur (quelques dizaines de millibar), sans compression. [18].

### II-7-5-Valeur énergétique du biogaz

Le pouvoir calorifique représente le contenu énergétique d'un combustible. Tout combustible contient une part d'eau. Afin de ne pas biaiser l'évaluation du contenu énergétique du combustible, l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau est retirée. On obtient ainsi le PCI (pouvoir calorifique inférieur) du combustible. Il s'agit de l'énergie directement utilisable.

Le PCI du biogaz est proportionnel à sa teneur en méthane :  $9,7 \times 0,7 = 6,99 \text{ KWh/m}^3$  pour un biogaz à 70% de méthane, à 15°C et à pression atmosphérique normale.

A titre indicatif :

- ◆ 1 m<sup>3</sup> de Méthane est équivalent à 1 litre d'essence.
- ◆ 1 m<sup>3</sup> de biogaz à environ 60% de méthane possède un pouvoir calorifique d'environ 6 kWh soit 0.6 litre de fioul.

Les équivalences énergétiques d'un mètre cube de méthane sont données en figure 14 [15].



Figure II-2 .Les valeurs énergétiques du méthane

## II-8- La définition du digesteur

Le digesteur, encore appelé fermenteur ou bioréacteur-anaérobie, L'élément primordial nécessaire à la méthanisation, après les microorganismes est généralement constitué d'une cuve fermée, étanche à l'air et de préférence isolée thermiquement de l'extérieur dans laquelle les microorganismes se côtoient pour dégrader chimiquement et biologiquement les effluents organiques et produire du biogaz.

### II-8-1-Les différents types de digesteurs

Le choix du digesteur varie en fonction du type de déchets à traiter et de l'application visée.

On peut également classer les digesteurs selon :

- le mode d'alimentation : batch ou continu ou semi-continu.
- le type de substrats : solide, semi-solide ou liquide ;
- le nombre d'étapes : mono- ou bi-étape selon que la méthanogénèse et l'acidogénèse se déroulent dans le même réacteur ou dans deux cuves séparées.

On distingue plusieurs familles de procédés, avec des sous-familles et de très nombreuses variantes. Cependant la quasi-totalité des digesteurs d'effluents et boues industrielles sont des réacteurs à alimentation continue [21].

### II-8-2-Les matériaux utilisés.

Les digesteurs sont généralement construits en béton avec une protection interne en résine époxy. Pour les digesteurs de grande taille, l'acier vitrifié s'avère souvent plus compétitif. Seule la « zone de marnage » (zone de variation du niveau des boues) est sujette à corrosion, les parois en contact permanent avec les boues sont peu attaquées. Les canalisations sont construites de préférence en acier inox, notamment celles soumises à des risques de corrosion (canalisations biogaz). Les digesteurs sont isolés thermiquement, par 10 à 20 cm de laine de verre, avec une protection par un bardage en acier [29].

### II-8-3-La constitution d'un digesteur

Le digesteur doit être muni des dispositifs suivants :

1. Un système de chauffage car les bactéries impliquées travaillent de manière plus efficace entre 30 et 60 °C.
2. Un système d'agitation pour
  - maintenir les matières solides en suspension

- éviter la formation de mousse et de croûte
  - assurer le transfert de chaleur
  - faciliter le dégagement des bulles de biogaz
3. Des systèmes d'alimentation en matières organiques, de récupération du biogaz et des digestats (Figure II-3).



Figure II-3 .Un méthaniseur à l'échelle industrielle

#### II-8-4-Mode d'alimentation d'un digesteur

##### ❖ Le digesteur batch

Il a l'avantage d'être d'une construction simple. Le mode opératoire consiste à remplir le digesteur avec les substances organiques et laisser digérer, le temps de rétention étant fonction de la température et d'autres facteurs. A la fin de la digestion, le digestat est évacué et le processus peut recommencer. Ce système, rustique et d'une grande simplicité

technique, est avantageux pour traiter les déchets solides tels les fumiers, les résidus agricoles ou les ordures ménagères. La production de biogaz n'est pas régulière : au début du cycle, la fermentation du substrat commençant, la production de biogaz est lente. Elle s'accélère, et atteint un taux maximal au milieu du processus de dégradation et chute en fin de cycle lorsque seuls les éléments difficilement digestibles restent dans le digesteur [29].

#### ❖ **Le digesteur continu**

Le substrat est introduit de manière continue est digéré et évacué sous forme de digestat soit mécaniquement, soit sous la pression des nouveaux intrants. Ce type de fonctionnement est bien adapté aux installations de grande taille. Il en existe trois principaux types : système à cuve verticale, système à cuve horizontale et système à « cuves multiples ».

#### ❖ **Le digesteur semi-continu**

Il fonctionne avec une combinaison des propriétés des deux précédents afin de tirer profit des avantages des deux extrêmes [29].

### **II-8-5-Chauffage du digesteur.**

Le chauffage des digesteurs se fait le plus souvent par un circuit externe de re-circulation, comme suit :

- Les boues sont pompées depuis le fond du digesteur,
  - Elles passent dans un échangeur « eau chaude / boues »
  - Puis retournent vers la bêche d'alimentation du digesteur où elles sont mélangées avec les boues fraîches, ce qui permet de réchauffer celles-ci et de les ensemercer en bactéries méthanogènes
- Pour améliorer le bilan thermique de la méthanisation, il est possible de préchauffer les boues fraîches avec les boues digérées extraites du digesteur par un échangeur boues / boues, en veillant aux risques de colmatage. Cette pratique, peu développée, peut permettre d'économiser plus de la moitié de la chaleur nécessaire au chauffage

### **II-8-6-Les différents procédés de la méthanisation**

Cette classification met en évidence le fait que l'hydrolyse et l'acidogénèse sont, ou non, séparés de la phase suivante de méthanogénèse [29].

#### ❖ **Le procédé monoétapes**

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

#### ❖ **Le procédé bi-étapes**

Il est caractérisé par le fait que l'hydrolyse et l'acidification sont nettement séparées de la phase suivante de méthanisation. La recirculation de la phase liquide présente l'avantage de ne pas nécessiter constamment l'ajout d'eau réchauffée. L'avantage des procédés bi-étape réside dans les courts temps de décomposition de la matière solide l'ordre de quelques jours. Cette séparation des phases réduit le risque d'intoxication des microorganismes méthanogènes liées à la présence d'un excès d'acides gras volatils, lorsque l'acidogénèse trop rapide par rapport à la capacité d'assimilation des micro-organismes méthanigènes.

#### ❖ Procédés mixtes ou intégrés

Plus exactement, c'est l'installation et non le digesteur qui est mixte. Le principe consiste à faire subir au substrat organique une digestion anaérobie et récupérer le sous-produit qui est ensuite stabilisé par l'étape de compostage. Ces procédés mixtes permettent la réduction des systèmes de traitement du liquide issu du digesteur anaérobie, ce dernier servant en grande partie à l'humidification du compost. Le second avantage est la stabilisation quasi totale du substrat organique en raison de la complémentarité des deux systèmes.

#### **II-8-7- Description et classification des installations de biométhanisation**

La digestion proprement dite n'est qu'une étape du processus global de cette filière technologique qui comprend, en amont, une étape de préparation du substrat et, en aval, une étape de post-traitement. Les quatre étapes principales de cette filière :

- le pré-traitement du substrat,
- la digestion proprement dite,
- l'utilisation du biogaz,
- le post-traitement des effluents.

#### **II-9-La co-digestion (ou méthanisation combinée)**

Un digesteur peut traiter des substrats homogènes (mono-substrat) ou des mélanges (on parle alors de co-digestion), ce qui offre des opportunités pour traiter à l'échelle du bassin de vie divers types de déchets organiques (municipaux, agricoles, industriels).

Consiste à digérer dans un même ouvrage des boues d'épuration et d'autres déchets ou sous-produits fermentescibles par exemple des bios déchets municipaux (déchets fermentescibles des ménages triés). La méthanisation combinée est intéressante du point de vue technique, la diversification de l'alimentation des digesteurs étant garante d'une meilleure stabilité des procédés de digestion [19].

Ce type de méthanisation est expérimenté dans notre travail.

- Substrats agricoles : Déjections animales, plantes énergétiques, résidus de culture.
- Substrats issus d'industrie agro-alimentaire : Déchets de légumes ou de fruits, petit lait, huiles, graisses, boues issues de stations d'épuration, eaux usées de process.
- Substrats issus de collectivité : Tontes, boues de station d'épuration, bio déchet des ménages

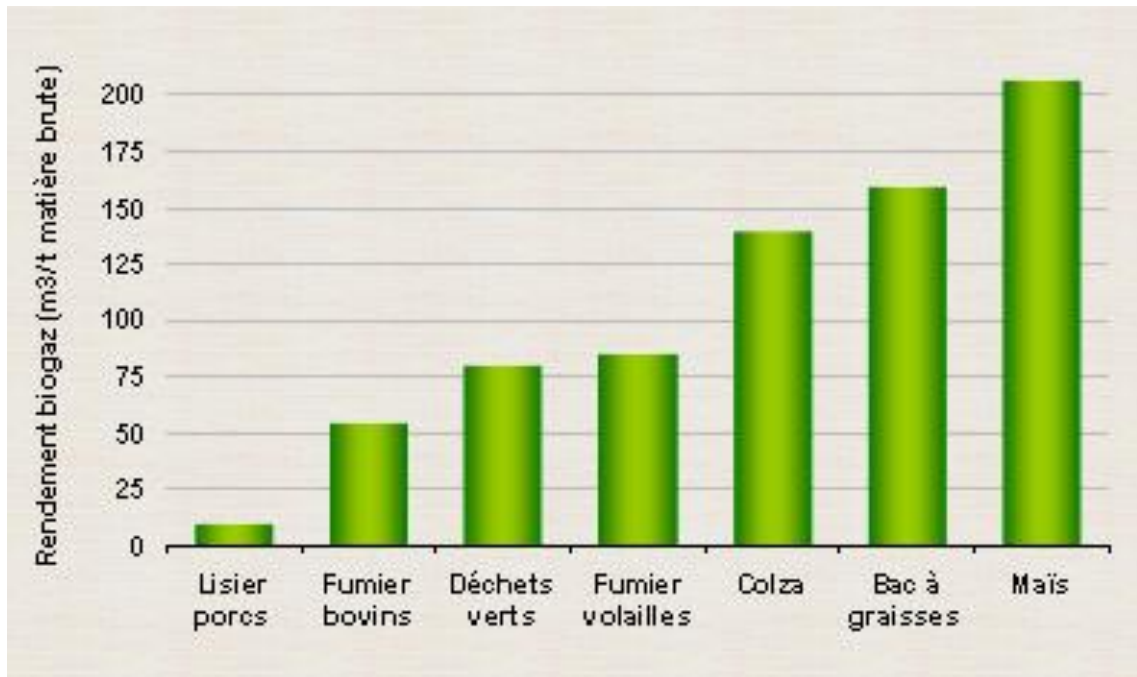


Figure II-4. Pouvoir méthanogène de quelques substrats

## II-10-Température mésophile / thermophile

La méthanisation se déroule classiquement à une température voisine de 35-37°C, obtenue en réchauffant le substrat avec le biogaz. Il s'agit des procédés mésophiles.

Les procédés thermophiles s'opèrent à 55°C. La flore microbologique en jeu possède une vitesse de croissance supérieure, ce qui permet de réduire les temps de séjour en digesteur. La digestion thermophile améliore la fluidité des lipides (graisses). Cependant, elle est également réputée plus fragile [19].

D'autres températures de digestion sont possibles, certaines installations fonctionnent à 45°C. Le choix du mode de température dépend du degré d'hygiénisation requis. Celui-ci est lié au couple temps de séjour - température. La digestion thermophile est considérée comme un traitement hygiénisant du point de vue des germes pathogènes, tandis que la digestion

mésophile doit être précédée par une étape de pasteurisation, ou suivie par une étape de compostage [19].

## II-11- Les filières de valorisation du biogaz

### Toutes les formes d'énergie utile

Le biogaz est convertible en pratiquement toutes les formes utiles d'énergie cette conversion est indiquée dans le tableau II-4.

Certaines applications sont largement développées et l'offre industrielle et commerciale est solidement établie pour [19] :

- L'utilisation directe en four
- La production de chaleur sous forme d'eau chaude ou de vapeur
- La production d'air chaud pour le séchage
- La production d'électricité par moteur à gaz, turbine à vapeur, turbine à gaz
- La production combinée d'électricité et de chaleur par cogénération

D'autres filières sont au stade de l'émergence :

- gaz naturel après épuration
- Carburant automobile après épuration et compression
- électricité produite par pile à combustible
- froid par machine à absorption à gaz

Tableau II-4 : Conversion énergétique d'un mètre cube de biogaz à 60% de méthane [30].

	1m <sup>3</sup> de biogaz à 60% de CH <sub>4</sub> -6000 Kcal
Essence	0,8 L
Mazout	0,7 L
Charbon de bois	1,4 kg
bois	2,7 kg
Energie élecltique	7 kwh
Gaz naturel	0,7 m <sup>3</sup>
Propane	0,3 m <sup>3</sup>
Butane	0,2 m <sup>3</sup>

## II-12-Avantages de la méthanisation

L'utilisation de la méthanisation est en progrès croissant à cause des multiples avantages qu'elle offre principalement en

### 1. Consommation minimum d'énergie

Le procédé nécessite peu d'énergie pour son fonctionnement.

### 2. Elimination de la pollution

La méthanisation étant un procédé de dégradation biologique de la matière organique contenue dans les déchets, elle contribue de ce fait à la réduction de la pollution et à la préservation de l'environnement.

### 3. Réduction de la charge organique et des boues

L'abattement de la charge organique des boues, déchets, effluent industrielles, déjections animales...est évalué par deux paramètres : la Demande Chimique en Oxygène (DCO) et la matière sèche volatile (M.S.V). La matière fermentescible caractérisée par sa teneur en MSV est transformée en biogaz.

Les quantités de boues générées par la méthanisation sont faibles de l'ordre de 5 à 10 fois moins qu'en system aérobie.

Pour les déchets des industries agroalimentaires, la réduction évalué par la demande chimique en oxygène est très importante (de l'ordre de 80 à 99 %).pour les déchets d'élevage, elle représente entre 50 et 60 % d'abattement de la DCO.

Pour les boues de STEP, la réduction de la matière sèche volatile avoisine les 70%.

### 4. Réduction de l'effet de serre

Le méthane est un gaz à effet de serre 25 fois plus dangereux que le dioxyde de carbone. d'ou la nécessite de le valoriser ou de le bruler en torchères pour le transformer en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O dont l'effet de serre est beaucoup plus réduit que CH<sub>4</sub>.

### 5. Production de compost

La méthanisation peut produire aussi du compost pour amendement agricole.

### **6. Effet de la valorisation du biogaz**

La valorisation possède un triple bénéfice sur l'environnement :

- Traitement des déchets et effluents organiques en amont
- Réduction du risque climatique en aval.
- Facilité des traitements futurs devant être apportés aux déchets, aux boues et aux effluents.

### **7. Production du biogaz**

Le méthane issu du biogaz étant identique au gaz naturel, possède par conséquent les mêmes propriétés thermiques et commerciales. Sa teneur s'exprime en m<sup>3</sup> par tonne de matières volatiles dégradées.

### **8. Réduction des odeurs**

La digestion permet de détruire la matière sèche biodégradable responsable de l'émission des mauvaises odeurs.

### **9. Réduction des risques pathogènes**

La méthanisation permet l'élimination de la plupart des germes pathogènes, la diminution des risques de toxicité et de la majorité des contaminants organiques [15].

## **II-13-L'intérêt de la méthanisation avant autre valorisation**

### **❖ Les valorisations agronomiques**

La digestion avant épandage a de nombreux avantages :

- réduction des quantités à déshydrater, stocké.
- réduction des nuisances olfactives
- élimination des agents pathogènes
- production de boues plus homogènes (dans le cas des stations d'épuration)
- augmentation de la proportion sous forme ammoniacale de l'azote (assimilation plus rapide par les végétaux)
- propriétés agronomiques : richesse en phosphore et calcium, teneur moyenne en azote.

### ❖ L'incinération

La digestion avant incinération permet :

- La réduction des quantités à déshydrater, incinérer.
- La réduction des quantités d'eau à évaporer (économie d'énergie)
- La réduction du volume des fumées.

Cependant, il est à noter que la digestion diminue le pouvoir calorifique des boues ou des déchets qui peuvent ne plus être auto-combustibles. Mais ce pouvoir énergétique se retrouve dans le biogaz si bien que le bilan énergétique global peut être positif (utilisation du biogaz comme combustible d'appoint si nécessaire)

### ❖ Le stockage en Installation de Stockage des Déchets (ISD)

par rapport à l'enfouissement de boues fraîches ou de déchets directement, la digestion préalable permet :

- La réduction des quantités a déshydraté, transporté, stocké en ISD.
- La diminution de la production de biogaz et lixiviats en ISD
- De plus la valorisation du biogaz est plus facile dans des structures de traitement qu'en ISD [21].

## II-14-Les inconvénients de la digestion anaérobie.

### a) La problématique du filtrat de digestion.

Lors de la déshydratation des boues digérées, le filtrat obtenu représente une charge polluante non négligeable (notamment en azote  $\text{NH}_4^+$ ). Il est alors renvoyé en tête de station afin d'être traité. Pour les stations ayant des contraintes sur les rejets en azote (rejet en zone sensible), il faudra prendre en compte cette surcharge azotée qui peut représenter 20 à 30 % de la charge initiale en azote [22].

### b) L'hydrogène sulfuré.

L'hydrogène sulfuré ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (composé présent dans le biogaz) s'avère souvent être un paramètre problématique de la digestion anaérobie. Ce gaz est un produit de la digestion anaérobie, et entraîne des phénomènes de corrosion dans le digesteur, les canalisations et les ouvrages de valorisation du biogaz. Cependant des solutions techniques existent pour éliminer ce gaz.

### c) La circulation des boues.

La circulation de boues peut s'avérer contraignante (bouchage des canalisations, encrassement des pompes). Cependant, il est possible de réduire l'importance de ces

phénomènes, par la mise en place d'un prétraitement poussé, notamment au niveau du dégrillage et du dessablage.

d) Un procédé délicat.

Le procédé de digestion anaérobie est considéré comme un procédé biologique délicat et qu'il faut surveiller de près par des analyses régulières. Pour fonctionner correctement, il nécessite une grande régularité au niveau des apports de boues (qualité, quantité). Des alimentations brusques, par à-coups de charge, déstabilisent la fermentation et peuvent provoquer des perturbations de fonctionnement. Les temps de retour à un état normal de fonctionnement peuvent alors parfois être long [22].

e) Le problème de la sécurité.

La présence de biogaz et d'hydrogène sulfuré, entraîne la mise en place de consignes et de règles de sécurité afin d'éviter les risques d'incendie, d'explosion ou d'intoxication. Le personnel d'exploitation doit donc être formé et sensibilisé à ces risques.

## **II-15-La méthanisation et l'environnement**

Le biogaz est un produit relativement toxique. Le gaz carbonique, et surtout le méthane (qui a un effet 35 fois plus toxique que le gaz carbonique) contribuent notamment à l'effet de serre. Pour des raisons de sécurité, d'odeur et de lutte contre l'effet de serre, les CET (Centre d'Enfouissement Technique) sont déjà dans l'obligation de capter le biogaz émis lors de la fermentation mais, à défaut de possibilité locale de valorisation (besoins de chaleur), le biogaz est souvent brûlé en torchère. La réglementation relative aux décharges de classe II impose la captation du biogaz de décharge, lorsque celui-ci s'avère nécessaire, et la recherche de solutions de valorisation, ou à défaut, sa destruction par voie thermique au plus tard un an après la fin du comblement. La méthanisation se caractérise par un bilan énergétique intéressant car elle produit 4,5 fois l'énergie qu'elle consomme. Une tonne de déchet organique fournit 100 m<sup>3</sup> à 160 m<sup>3</sup> de biogaz, l'équivalent de 60 à 100 litres d'essence.

En la valorisant sous forme de chaleur et de force, on obtient 170 kWh d'électricité et 340 kWh sous forme d'eau chaude. la méthanisation est un des moyens les plus efficaces pour contribuer à réduire l'émission de gaz à effet de serre. Ce procédé produirait en moyenne trois fois moins de CO<sub>2</sub> que d'épandre des déchets agricoles.

Cette technique de traitement des déchets et effluents polluants présente la caractéristique très particulière de produire de l'énergie au lieu d'en consommer.

La méthanisation permet également de se substituer à l'incinération, rejetée souvent par la population. De plus, par rapport au compostage, elle limite les odeurs et demande trois fois moins d'espace. Même si le coût est environ 40 % supérieur à un simple compostage, avec la vente d'électricité l'amortissement est vite réalisé [30].

## Introduction

La méthanisation ou digestion anaérobie est un procédé naturel de transformation de la matière organique en énergie par des bactéries en l'absence d'oxygène.

La production de biogaz est un moyen de valoriser les déchets organiques et donc d'éviter des pollutions et des nuisances sur notre environnement.

Le biogaz est une énergie renouvelable dont l'utilisation contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il est convertible en toutes les formes d'énergie utiles (chaleur, électricité, carburant).

La digestion anaérobie est une opération dont le démarrage est généralement délicat en raison de la faible vitesse de croissance et de la sensibilité du pH des bactéries méthanifères et de leur faible population dans la boue brute.

L'objectif de notre expérimentation est d'étudier le pouvoir méthanogène de la boue de la station d'épuration des eaux usées domestiques de Hassi R'Mel et d'optimiser sa méthanisation en mode mésophile et thermophile en procédant à des mélanges avec des graisses usagées récupérées en tête de station (étape de dégraissage).

### Microbiologie de la digestion anaérobie

Il est essentiel de rappeler que lors du processus de digestion anaérobie, la conversion de composés organiques complexes en méthane et en dioxyde de carbone est réalisée par l'action concertée de microorganismes appartenant à une communauté microbienne complexe, tant d'un point de vue taxonomique que fonctionnel. Godon *et al.* (1997a) ont recensé près de 140 " espèces " sur un inventaire de 579 individus dans un digesteur [31].

Ces populations mixtes de microorganismes sont majoritairement organisées sous la forme de biofilms ou d'agrégats granulaires [32]. Plus les substances présentes dans les eaux usées sont complexes, plus il y aura d'espèces microbiennes différentes présentes dans ces biofilms [33]. Le modèle développé par Zeikus (1980) pour décrire le processus de méthanisation fait consensus (Figure I.1) ; il comprend quatre étapes, réalisées par différents groupes de microorganismes. Chaque étape mène à la formation de composés intermédiaires, servant à leur tour de substrats lors de la phase suivante [34].

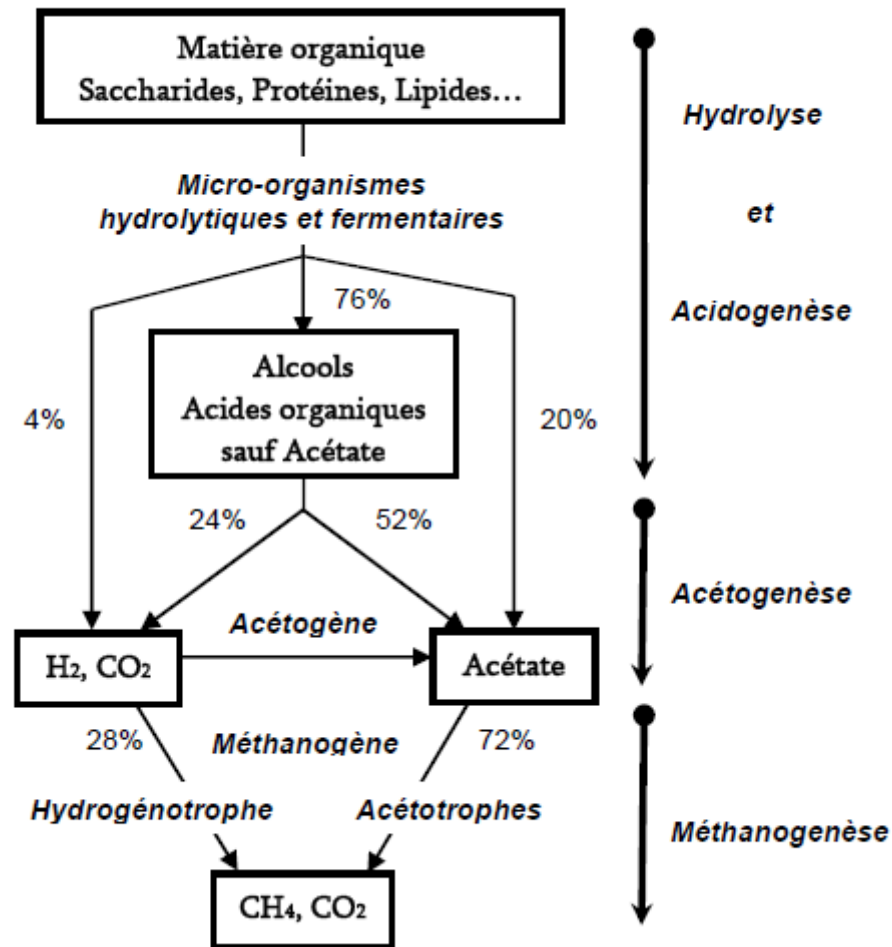


Figure III-1. Schéma de la chaîne trophique de la méthanogenèse et ses différentes étapes [17, 34,35]

### III-1-Matériel et méthodes

#### III-1-1-Dispositif expérimental

La dégradation des boues doit se faire dans des digesteurs étanches, à l'abri de l'air et de la lumière. Les températures de consigne sont fixées à 35 et 55°C respectivement pour le mode mésophile et thermophile, pendant 65 jours.

Le digesteur est une bouteille en verre brun foncé, de volume 2500 ml pour les digesteurs 1, 2 et 3 et un volume de 1000 ml pour les digesteurs 4, 5, 6 et 7.

Chacun est doté de deux tuyaux, le premier doit toucher le fond du digesteur pour prélever les échantillons de substrat pour la mesure de la température et du pH. Le deuxième reste à la surface pour collecter le biogaz produit (photographie III-1). Le tout est hermétiquement fermé pour assurer l'anaérobiose et afin d'éviter des éventuelles fuites du biogaz.



Photographie III-1. Dispositif expérimental d'un digesteur à l'échelle laboratoire.

Les digesteurs ont été élaborés de la même manière avec comme différence le volume du substrat, sa composition, le pH initial et la température d'incubation.

#### Digesteur n° 1

Le substrat est constitué d'un litre de boue sans dilution à pH 6,37 (sans modification).

#### Digesteur n° 2

On introduit un litre de boue sans dilution à pH modifié à 9,54, par une solution concentrée en NAOH, le pH initial étant de 6,37.

#### Digesteur n° 3

Le substrat est un mélange de 500 ml de boue et de 500 ml d'eau distillé (50% de boue et 50% d'eau distillé), le pH de la boue est de 6,37.

#### Digesteur n° 4

Un mélange de 400 ml de boue et de 100 ml de graisses, soit 80% de boue et 20% de graisses, le pH de la boue est 6,37.



Photographie III-2. Digesteurs en incubateur mésophile

#### Digester n° 5

Une bouteille de 1000 ml de volume remplie de 250ml de boue et de 250ml de graisses soit 50% boue et 50 % graisses, le pH de la boue 6,37.

Ces cinq digesteurs ont été placés dans un incubateur en mode thermophile à une température de 55°C.

#### Digester n° 6 et 7

Même composition que les digesteurs 4 et 5, incubés en mode mésophile à une température de 37°C.

### **III-1-2- Méthode de production**

La boue utilisée dans notre travail provient de la STEP de Hassi R'Mel, elle est récupérée après l'étape de décantation, c'est une boue dite « d'agitation prolongée ». C'est un réservoir de biomasse avec une activité bactérienne assez élevée, on parle de « boue biologique ». La boue destinée à la méthanisation subit une caractérisation avant le début de l'expérimentation, en déterminant un certains nombre de paramètres tels que le pH, les Matières En Suspension, la Matière Sèche, la Matière Sèche Volatile.

Le captage et le stockage du biogaz débutera après 4 et 6 jours d'incubation respectivement pour les modes mésophile et thermophile, il sera stockée dans des bouteilles pour être analysé le 16<sup>ème</sup>, 33<sup>ème</sup>, 48<sup>ème</sup> et 64<sup>ème</sup> jours de la méthanisation.

#### ***Température et mode mésophile-thermophile***

La température est un paramètre important pour les procédés biologiques car elle affecte la cinétique de croissance des microorganismes et le transfert de matière. Selon la plage de températures dans laquelle ils peuvent proliférer, les microorganismes sont classifiés en trois catégories : les psychrophiles (qui tolèrent une gamme de température de 10 à 30°C, avec un optimum de 12 à 18°C), les mésophiles (de 20 à 50°C, avec un optimum de 25 à 40°C), et les thermophiles (de 55 à 75°C). Certains enzymes spécifiques fonctionnent dans des plages de température bien déterminées : l'activité enzymatique augmente avec une élévation de la température jusqu'à une valeur optimale. Au-delà de cette température commence le processus de dénaturation de l'enzyme et le taux de croissance diminue rapidement. La règle de Vant Hoff stipule que le taux de croissance des microorganismes double pour une augmentation de 10°C jusqu'à la température optimale.

L'activité du consortium méthanogène est étroitement liée à la température. Deux plages de températures optimales peuvent être définies [35] : mésophile (autour de 35°C) et thermophile (environ 55-60°C°).

#### ***pH et activité enzymatique***

Pour la majorité des procédés biologiques anaérobies, les microorganismes peuvent croître dans une plage de pH de 4 à 9. Généralement, la croissance maximale des microorganismes se situe entre 6,5 et 7,3 [36]. Un traitement biologique à un pH très bas (inférieur à 4) ou trop élevé (supérieur à 9) peut exercer une action inhibitrice sur les microorganismes. La variation de la croissance bactérienne est due au changement de l'activité enzymatique avec le pH. La concentration de l'ion hydrogène est considérée comme un des facteurs les plus influents sur l'activité enzymatique [37].

### **III-2- Méthodes de caractérisation de la boue**

#### **III-2-1- pH**

La détermination du potentiel hydrogène, pH, est effectuée sur le substrat sous la norme NF 90008. La mesure de pH ( $\pm 0,1$  unité pH) se fait directement par lecture sur un pH-mètre à électrode combinée, de marque Crison GLP 22, avec une sonde CAT 52-02, fonctionnant entre 0 et 60°C.

**III-2-2 -Matières en suspension (NFT 90-105)**

Le principe de mesure des MES est la filtration sous vide de l'échantillon. L'échantillon est filtré et séché à l'étuve à 105°C pendant 30 minutes. Le résidu déposé sur le filtre est pesé. Les résultats sont exprimés en mg/l.

$$MES = \frac{(P_2 - P_1)}{VE} \cdot 1000$$

*MES* : matières en suspension en mg/l

*P1* : masse du filtre à vide

*P2* : masse du filtre plein après filtration et séchage

*VE* : volume d'échantillon

**III-2-3- Humidité et matière sèche**

L'humidité (H%) est déterminé le plus rapidement possible, pour limiter les pertes par évaporation. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour sa détermination : la méthode normée à l'étuve ou ses variantes en fonction de la température, la thermo-balance, le séchage à l'air libre.

La méthode normée Afnor NF U 44-171 d'octobre 1982, consiste en un prélèvement d'un volume d'échantillon de boue liquide (10 ml), mise à l'étuve à 105 ± 2°C jusqu'à poids constant, environ 24 heures. La matière sèche (MS%) est le taux complémentaire du degré d'humidité.

$$MS = \frac{P_2 - P_1}{VE} \cdot 1000$$

*MS* : matière sèche en mg/l.

*P1* : masse du bécher vide

*P2* : masse du bécher plein après séchage à l'étuve

*VE* : le volume de l'échantillon en ml

**III-2-4- Mesure de la teneur en matière organique**

Un volume d'échantillon de boue est calcinée dans un creuset à 550 °C, pendant 2 heures dans un four (NF U 44- 160 de novembre 1985). La teneur en matière organique totale ou en solide volatil est obtenue par différence de pesée entre la masse du creuset vide et la masse du creuset plein après calcination.

$$MM = \frac{(C_2 - C_1)}{VE} \cdot 1000$$

*C1* : pesée du creuset après passage à l'étuve

C2 : pesée du creuset après passage au four à 550°C

Ve : volume de l'échantillon de boue

pour calculer les MVS, on utilise la formule suivante :

$$\text{MVS} = \text{MES} - \text{MM} \quad (\text{mg/l})$$

#### a) Caractéristiques de la boue

La caractérisation de la boue a donné les résultats suivants:

**Tableau III-1. Caractéristiques de boues produites par la STEP de HR**

<b>Température</b> : 15,7°C (consigne dans le digesteur, 37 et 55°C)	
<b>pH</b>	6,37
<b>Conductivité</b>	1893 µs/cm
<b>MS</b>	38,07 g/l
<b>MES</b>	34,07 g/l
<b>MVS</b>	25,31 g/l ou 66,48%
<b>MM</b>	8,76 g/l ou 23%

La matière sèche (MS) représente l'ensemble des matières organiques et minérales en suspension, ainsi que les sels dissous. La matière volatile (MVS) correspond à la fraction biodégradable de la matière sèche, laquelle est transformée en méthane et gaz carbonique. Elle donne une évaluation approchée de la matière organique. Le taux de matière volatile contenue dans les boues est exprimé en % de la MS. Les matières volatiles représentent en moyenne 60 à 80 % de la matière sèche pour des boues primaires fraîches et 50 % de la matière sèche pour des boues digérées.

**Tableau III-2. Caractéristiques de boues produites par les stations urbaines [32]**

Boue	Fermentescibilité	MV
Primaire	+++	60 – 80 %
Moyenne charge	++	70 – 80 %
Faible charge – aération prolongée	+	60 – 70 %
Mixte	+++	75 %
Stabilisée biologiquement	-	50 %

Il n'existe pas encore de critère établi de mesure de la fermentescibilité (teneur en matière organique). Le taux de matières volatiles (MV) contenues dans la matière sèche (MS) permet d'évaluer ce caractère des boues (un taux de MV > 70 %, indique généralement une fermentescibilité élevée). Toutefois, une boue primaire peut présenter une teneur en MV faible (60 %) alors que ce type de boue est très fermentescible (tableau III-2).

**b) Le substrat**

Le substrat de digestion que nous avons utilisé pour notre étude peut-être de la boue employée seule (monosubstrat) ou en mélange avec des graisses usagées (co-substrat), avec ou sans dilution, à pH modifié ou non selon, l'expérimentation. Pour optimiser le processus, le substrat est chauffé et homogénéisé par un mélangeur manuel. Le biogaz produit dans le digesteur est quantifié et analysé.

**III-2-5- Chromatographie en Phase Gazeuse**

L'analyse par chromatographie en phase gazeuse nous a permis de suivre les performances des bioréacteurs. En effet, les études qualitatives et quantitatives du biogaz formé sont des indicateurs d'efficacité de la méthanisation. Les quantités de CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> diffèrent selon que l'on utilise des mono-substrat ou des co-substrat dans le cas d'une co-digestion. L'optimisation du processus de digestion a nécessité une étude comparative entre les résultats obtenus en mode mésophile et thermophile.



Photographie III-3. Chromatographe phase gazeuse

Ces analyses ont été effectuées sur un chromatographe de type HITACHI 163 avec les paramètres suivants.

Gaz vecteur : hélium

Température du four : 140°C

Volume de l'échantillon à injecter : 2 ml

### III-3- RESULTATS ET DISCUSSIONS

La méthanisation a été étudiée durant 65 jours par le suivi du pH et de la production journalière du biogaz formé au niveau des 7 digesteurs. Le volume cumulé durant tout le processus a été également évalué. Les prélèvements de biogaz sont au nombre de 4, correspondant respectivement au 16<sup>ème</sup>, 33<sup>ème</sup>, 48<sup>ème</sup> et 65<sup>ème</sup> jour, ils sont destinés à l'analyse par CPG qui détermine la richesse en biométhane. Les autres gaz analysés sont le gaz carbonique et l'azote gazeux.

**III-3- 1-Etude de la méthanisation en mode thermophile et en monosubstrat**

La première partie de notre travail est consacrée à l'étude de la digestion anaérobie en mode thermophile en monosubstrat. Nous avons traité trois cas distincts :

- Boue brute à pH initial de 6,37
- Boue brute à pH modifié à 9,54
- Boue dilué à 50% de pH 6,37

La mesure du pH, de la température et du volume de biogaz formé était effectuée quotidiennement, les résultats sont rassemblés dans le tableau III-3.

Tableau III-3. Résultats température, pH, volume journalier (Vjr), volume cumulé (Vcum) de biogaz des 3 digesteur

		100% Boues pH=6,37				100% Boues pH=9,54				50% Boues+50% Eau			
				V biogaz(ml)				V biogaz(ml)				V biogaz(ml)	
N°jr	Date	T°(°C)	pH	Vjr	Vcum	T°(°C)	pH	Vjr	Vcum	T°(°C)	pH	Vjr	Vcum
1	23/03/2009		6,37				9,54				6,37		
2	24/03/2009	48,7	6,28			48,7	9,12			45,7	6,31		
3	25/03/2009	49,1	6,17			49,3	8,91			45,9	6,29		
4	26/03/2009	49,8	6,09			50,1	8,42			46,3	6,27		
5	27/03/2009	50	6,31			50,9	7,63			46,4	6,22		
6	28/03/2009	47,7	6,43	137	137	48,8	7,11	134,5	134,5	46,5	6,19	341	341
7	29/03/2009	51	6,44	178,5	315,5	48,4	6,99	92	226,5	46,9	6,24	201	542
8	30/09/2009	50,4	6,44	190	505,5	47,6	7,02	137	363,5	47,1	6,26	127	669
9	31/03/2009	46,7	6,5	296	801,5	45,4	7,04	151	514,5	48,3	6,28	179	848
10	01/04/2009	45,3	6,55	147	948,5	52,2	7,08	405	919,5	52,4	6,28	141,5	989,5
11	02/04/2009	53	6,66	198,5	1147	50	7,06	135,5	1055	51,3	6,35	170	2035
12	03/04/2009	51,9	6,69	145,5	1293	52	7,26	91,5	1147	52,8	6,55	186	2221
13	04/04/2009	52	6,78	188	1481	52	7,26	102	1249	51,9	6,63	56	2277
14	05/04/2009	47,7	6,82	333	1814	50,4	7,27	135	1384	47,5	6,64	197	2474

15	06/04/2009	51,2	6,92	925	2739	48,1	7,42	159,5	1543	50,9	6,68	262	2736
16	07/04/2009	52	6,93	268	3007	51,2	7,66	240	1783	51,9	6,75	319,5	3056
17	08/04/2009	51,9	7,08	78,5	3085	50,9	7,33	240	2023	51,4	6,86	178	3234
18	09/04/2009	50,7	7,28	81,5	3167	49,8	7,78	230	2253	51,5	6,99	102,5	3336
19	10/04/2009	48,8	7,38	190,5	3357	50,7	7,8	299,5	2553	51,2	7,03	233	3569
20	11/04/2009	47,2	7,03	167	3524	49	7,4	368	2921	49,3	6,99	361	3930
21	12/04/2009	48,9	6,93	149	3673	49,6	7,34	340	3261	48,9	6,79	260	4190
22	13/04/2009	50,8	7,06	186	3859	44,8	7,54	343	3604	50,5	6,94	337	4527
23	14/04/2009	46,6	7,12	150	4009	46,7	7,5	390	3994	48,1	6,91	338	4865
24	15/04/2009	49,5	6,91	140	4149	48,4	7,19	50	4044	49,3	6,81	149	5014
25	16/04/2009	49,8	6,9	196,5	4346	48,9	7,28	192	4236	48,7	6,71	187	5201
26	17/04/2009	48,5	6,93	148	4494	47,4	7,29	143	4379	49,4	6,72	133	5334
27	18/04/2009	46,3	6,97	184	4678	47,5	7,24	148	4527	44	6,83	43	5377
28	19/04/2009	49,8	6,91	193	4871	48,2	7,26	235,5	4762	49,3	6,76	40	5417
29	20/04/2009	48	7,05	231	5102	48,1	7,28	146	4908	47,7	6,79	92	5509
30	21/04/2009	47,5	6,97	141	5243	48,7	7,3	144	5052	46,7	6,63	131	5640
31	22/04/2009	47,4	7	193	5436	49,5	7,31	134	5186	49,2	6,71	88	5728
32	23/04/2009	51	6,92	187	5623	50,7	7,31	134	5320	50,1	6,72	79,5	5808
33	24/04/2009	45,3	7,01	120,5	5743	48,9	7,32	36,5	5357	47,9	6,77	62	5870
34	25/04/2009	49,5	6,99	226,5	5970	50,8	7,29	197,5	5554	51,6	6,76	90	5960
35	26/04/2009	49,2	6,97	234	6204	49,6	7,3	154,5	5709	48,1	6,73	142,5	6102
36	27/04/2009	49	7,03	40	6244	49	7,36	64	5773	46,6	6,79	55	6157

37	28/04/2009	48	7,19	26,5	6270	50,2	7,55	104,5	5877	49	7,01	107,5	6265
38	29/04/2009	50,3	7,28	31	6301	51,1	7,51	62	5939	49,6	6,97	184,5	6449
39	30/04/2009	49,1	7,33	27	6328	51,8	7,53	46	5985	50,1	6,97	100,5	6550
40	01/05/2009	48,6	7,22	13	6341	50,4	7,55	165	6150	48,7	7,04	60,5	6610
41	02/05/2009	49,1	7,23	60	6401	52,1	7,55	84,5	6235	49,2	7,04	65	6675
42	03/05/2009	47,6	7,29	14,5	6416	49,7	7,56	80	6315	50,1	7,1	55	6730
43	04/05/2009	49,9	7,27	14,5	6430	53	7,55	79	6394	51,5	7,14	65	6795
44	05/05/2009	51	7,63	27	6457	50,5	8,03	57	6451	49,7	7,46	131	6926
45	06/05/2009	50,2	7,73	32	6489	51,5	7,97	42	6493	48,3	7,67	112	7038
46	07/05/2009	49,9	7,7	74,5	6564	49,8	8,02	38,5	6531	49,1	7,48	66	7104
47	08/05/2009	50	7,67	33	6597	50,7	8,04	42	6573	51	7,56	45,5	7150
48	09/05/2009	50,2	7,68	125,5	6722	52,2	8	168	6741	51,1	7,52	31,5	7181
49	10/05/2009	50,3	7,73	55,5	6778	49,8	8,02	81	6822	52,3	7,54	37,5	7219
50	11/05/2009	46,2	7,76	18	6796	49,6	8,04	32	6854	50,1	7,57	15	7234
51	12/05/2009	48,9	7,23	31	6827	49,5	7,45	87	6941	49,2	7,75	25	7259
52	13/05/2009	50,3	7,73	74	6901	49,5	8,09	134	7075	48,9	7,65	22,5	7281
53	14/05/2009	49,6	7,84	131	7032	51	7,97	97	7172	49,3	7,51	71	7352
54	15/05/2009	51,1	7,71	145	7177	48,6	8,02	73	7245	50,4	7,55	20	7372
55	16/05/2009	50,9	7,71	140	7317	48	7,95	79	7324	49,6	7,53	30	7402
56	17/05/2009	49,6	7,8	72	7389	49,8	8,07	80	7404	50,3	7,58	24	7426
57	18/05/2009	49,5	7,84	90	7479	50,7	8,01	94	7498	49,8	7,62	32	7458
58	19/05/2009	50	7,77	35,5	7514	49,2	8,03	182,5	7681	48,6	7,58	11,5	7470

---

59	20/05/2009	52,8	7,81	69	7583	49,4	8	68	7749	51,3	7,59	15	7485
60	21/05/2009	53,6	7,83	36	7619	49,8	8,03	62	7811	51,6	7,62	14	7499
61	22/05/2009	50,1	7,87	62	7681	50,1	8,02	59	7870	50,8	7,83	17	7516
62	23/05/2009	51,1	7,84	23	7704	48,1	8,08	50	7920	49,2	7,62	26,5	7542
63	24/05/2009	50,9	7,95	71	7775	48,1	8,09	75	7995	51,5	7,58	112	7654
64	25/05/2009	51,2	7,77	112	7887	48,5	7,98	79	8074	51	7,51	92	7746
65	26/05/2009	48,4	7,99	45	7932	49,3	8,06	66,5	8140	50,9	7,75	8,5	7755

**III-3-1- a-Production cumulée**

Les 65 jours de méthanisation ont fourni une quantité de biogaz de 8140 mL pour la boue à pH modifié (9,54), 7327 mL pour la boue brute (pH 6,34), tandis que la boue diluée à 50% a produit un volume de biogaz de 7755 mL.

Séquence obtenue pour les trois substrats :

$$V_{\text{cum}}(\text{pH } 9,54) > V_{\text{cum}}(\text{diluée } 50\%) > V_{\text{cum}}(\text{pH } 6,37)$$

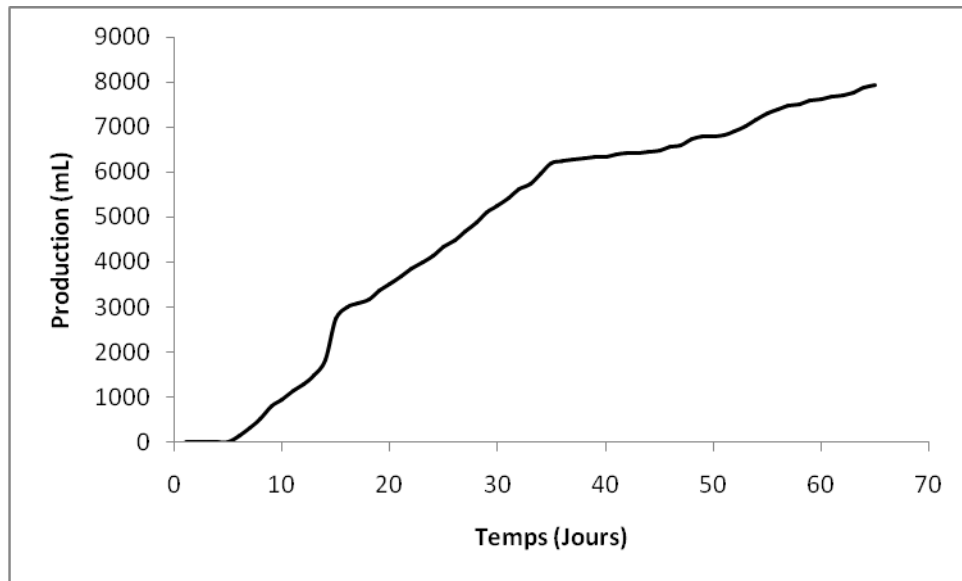


Figure III-2. Cinétique de la production cumulée du biogaz. Boue à pH = 6,37

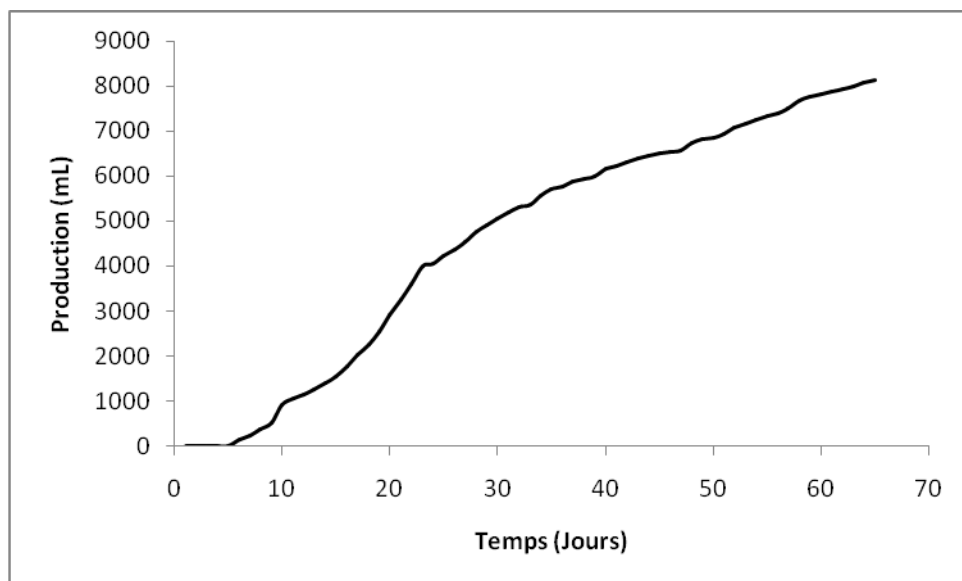


Figure III-3. Cinétique de la production cumulée du biogaz. Boue à pH = 9,54

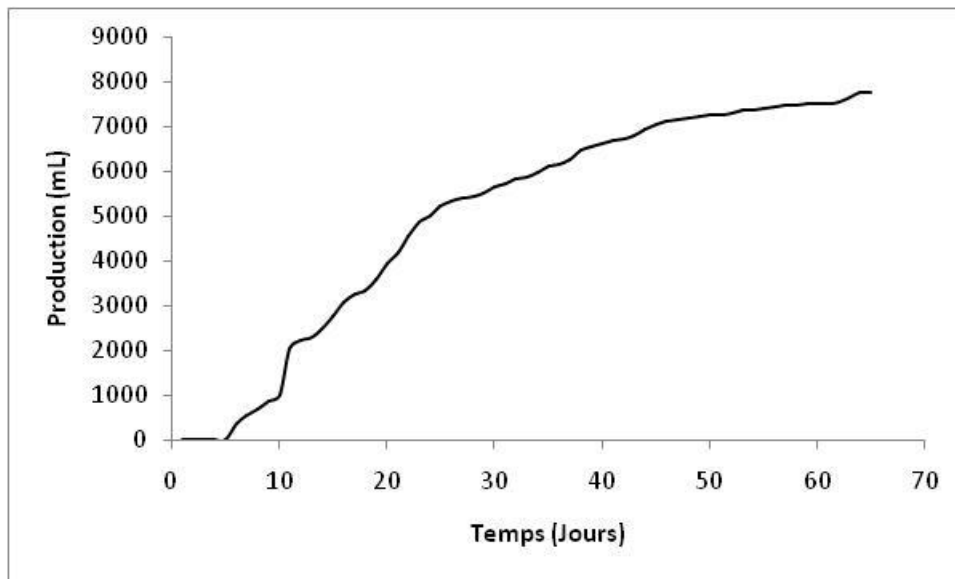


Figure III-4. Cinétique de la production cumulée du biogaz. Boue diluée à 50%

La cinétique de production (Figures III-2, III-3 et III-4) se divise en trois phases principales, la première étant difficile à apprécier qualitativement et quantitativement :

1. **Phase de latence:** Cette période a été relativement courte au cours de nos expérimentations depuis la fermeture du digesteur. Une très faible production de biogaz ayant été produite sans pouvoir la quantifier. Durant cette phase se déroulent l'hydrolyse, l'acidogénèse et l'acétogénèse. Elle précède la phase de gazéification ou la méthanogénèse qui est responsable de la production du biogaz [33,34].
2. **Phase exponentielle:** A partir de 6<sup>ème</sup> jour, les conditions de production sont atteintes, ce qui permet de comptabiliser les quantités de biogaz les plus importantes.
3. **Phase de palier:** A partir du 25<sup>ème</sup> jour, la production ralentie probablement sous l'effet de l'épuisement du substrat de digestion constituant la source nutritive et énergétique de la flore microbologique et particulièrement la flore méthanogène qui est directement responsable de la production du biogaz.

### III-3-1-b- Production journalière

La cinétique de la production journalière évolue selon les Figure. III-5, III-6 et III-7. Une similitude d'évolution pour les trois expériences. Une corrélation peut être suggérée entre la production journalière et celle cumulée du biogaz. Les phases exponentielles et de palier de production sont obtenus à partir de valeurs élevées de la production journalière correspondant au début de la courbe et des faibles valeurs, partie terminale de la courbe.

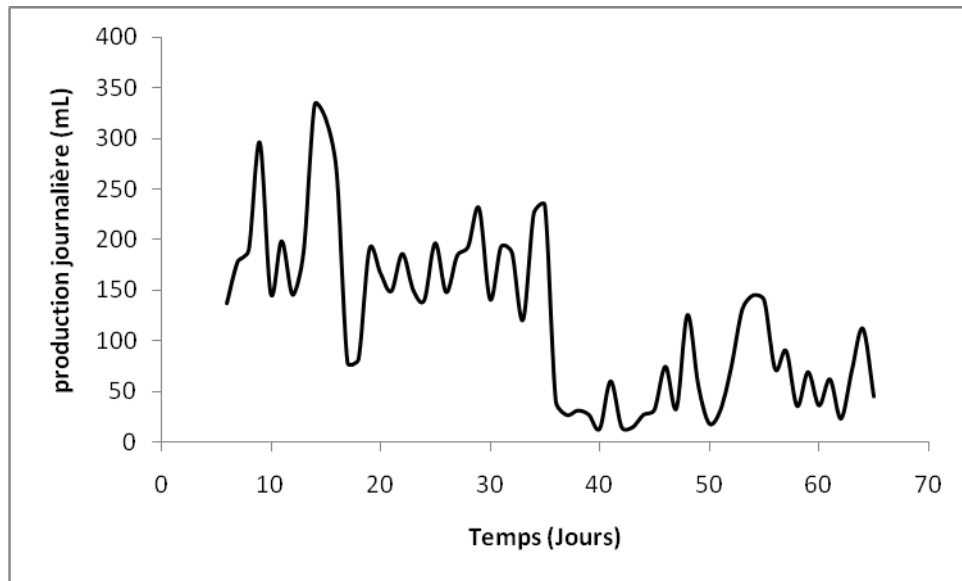


Figure III-5. Cinétique de la production journalière du biogaz. Boue à pH = 6,37

### Digesteur 1

La production optimale du biogaz est entre le 6<sup>ème</sup> et le 35<sup>ème</sup> jour avec un volume journalier variant entre 78,5 (17<sup>ème</sup>) ml et un maximum de 234 ml (35<sup>ème</sup>).

Une chute de production de biogaz est remarquée des le 35<sup>ème</sup> jour jusqu'à la fin de la méthanisation avec une valeur minimale atteignant 13 ml de biogaz.

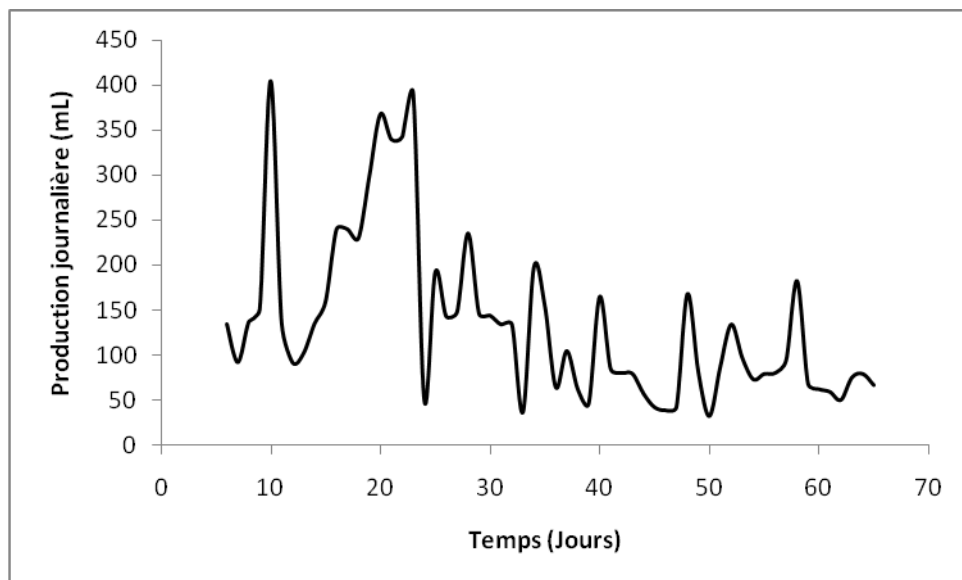


Figure III-6. Cinétique de la production journalière du biogaz. Boue à pH = 9,54

### Digesteur 2

La production optimale du biogaz est entre le 6<sup>ème</sup> et le 23<sup>ème</sup> jour avec un volume journalier variant entre 91,5 (12<sup>ème</sup>) ml et un maximum de 390 ml (23<sup>ème</sup>).

Une chute de production de biogaz est remarquée des le 23<sup>ème</sup> jour jusqu'à la fin de la méthanisation avec une valeur minimale atteignant 32 ml de biogaz.

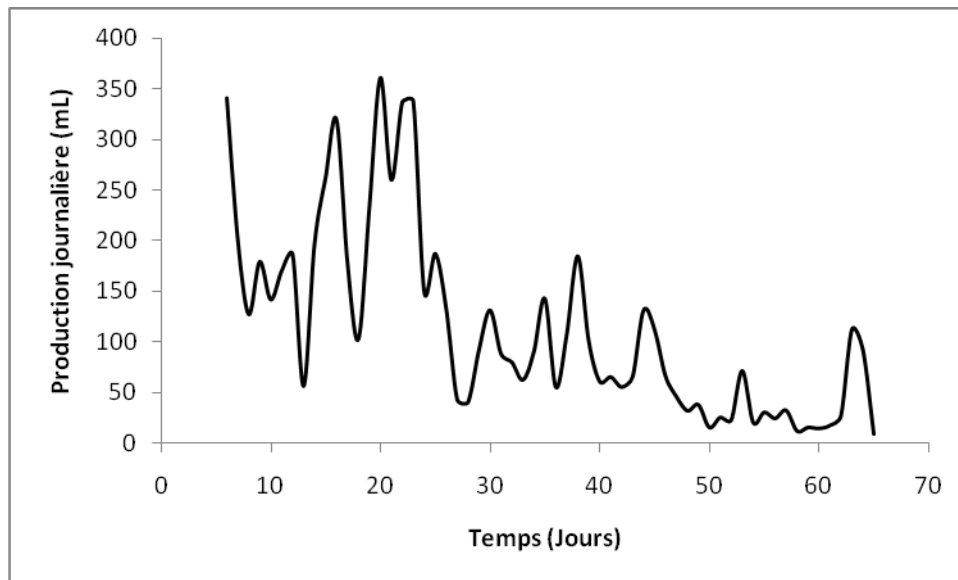


Figure III-7. Cinétique de la production journalière du biogaz. Boue diluée à 50%

### Digesteur 3

La production optimale du biogaz est entre le 6<sup>ème</sup> et le 23<sup>ème</sup> jour avec un volume journalier variant entre 56 ml (13<sup>ème</sup>) ml et un maximum de 338 ml (23<sup>ème</sup>).

Une chute de production de biogaz est remarquée des le 23<sup>ème</sup> jour jusqu'à la fin de la méthanisation avec une valeur minimale atteignant 11,5 ml de biogaz.

#### III-3-1-c- Evolution du pH au cours de la production

Trois phases dans l'évolution des valeurs de pH sont observées au cours de la production du biogaz. La nette distinction de ces 3 phases dépend de la nature du substrat, du mode d'agitation et de l'activité bactérienne qui elle-même fonction de l'évolution de plusieurs facteurs (pH, température...). Les figures III-8, III-9 et III-10 expriment l'évolution du pH pour les trois cas de monosubstrat étudiés.

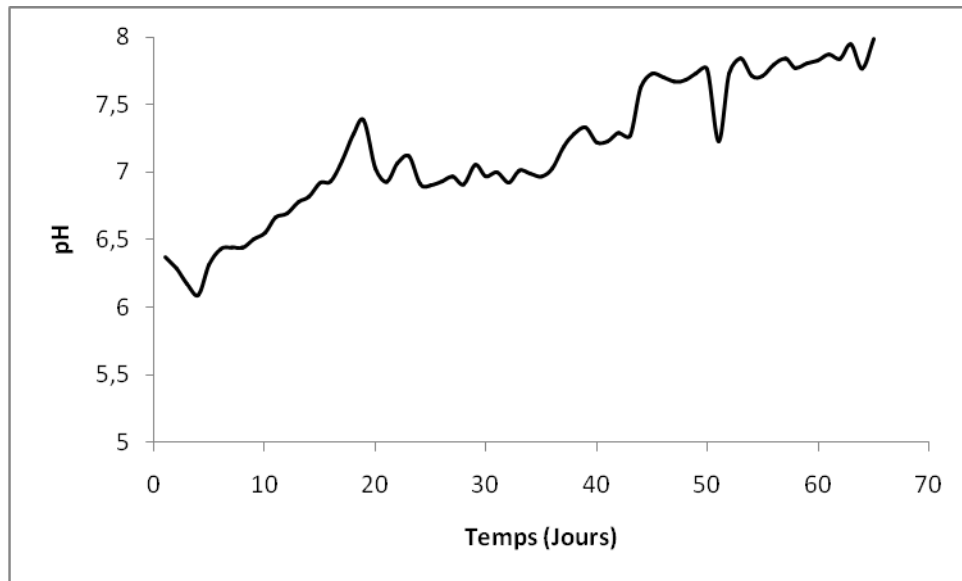


Figure III-8. Evolution du pH durant la production du biogaz. Boue à pH = 6,37

### *Digesteur 1*

- **1ère phase: acidification du substrat.** Elle est observée entre le début de l'expérimentation le pH passe de 6,37 à 6,09 le 4<sup>ème</sup> jour.
- **2ème phase: alcalinisation du substrat.** C'est la période d'évolution du pH la plus lente, elle est comprise entre le 4ème et le 19<sup>ème</sup>, il passe de 6,09 à 7,38. **Cette phase coïncide avec une forte production du biogaz.**
- **3ème phase: stabilisation du pH du substrat :** à partir du 19ème jour de production, il y a une stabilisation autour de ces valeurs. Celles-ci varient entre 7,4 et 7,8.

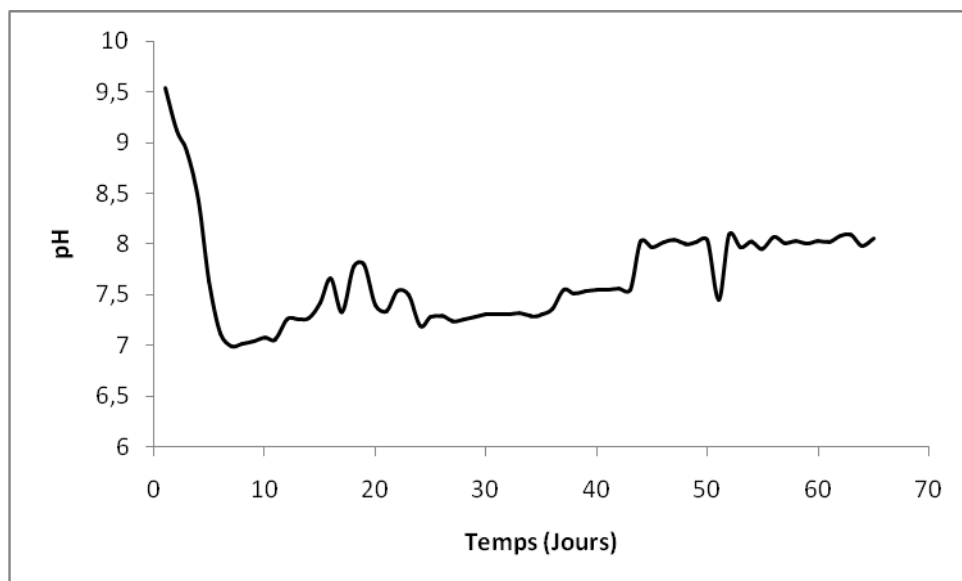


Figure III-9. Evolution du pH durant la production du biogaz. Boue à pH = 9,54

*Digesteur 2*

- **1ère phase: acidification du substrat.** Elle est observée entre le début de l'expérimentation le pH passe de 9,54 à 6,99 le 7<sup>ème</sup> jour.
- **2ème phase: alcalinisation du substrat.** C'est la période d'évolution du pH la plus lente, elle est comprise entre le 7<sup>ème</sup> et le 19<sup>ème</sup>, il passe de 6,99 à 7,8.
- **3ème phase: stabilisation du pH du substrat :** à partir du 19<sup>ème</sup> jour de production, il y a une stabilisation autour de ces valeurs. Celles-ci varient entre 7,8 et 8,09.

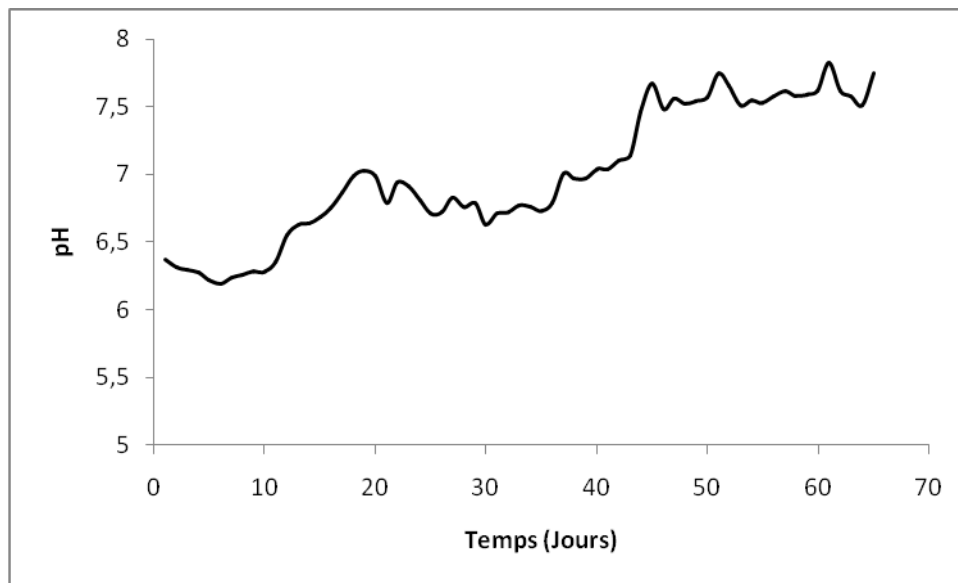


Figure III-10. Evolution du pH durant la production du biogaz. Boue diluée à 50%

*Digesteur 3*

- **1ère phase: acidification du substrat.** Elle est observée entre le début de l'expérimentation le pH passe de 6,37 à 6,19 le 6<sup>ème</sup> jour.
- **2ème phase: alcalinisation du substrat.** C'est la période d'évolution du pH la plus lente, elle est comprise entre le 7<sup>ème</sup> et le 19<sup>ème</sup>, il passe de 6,23 à 7,03.
- **3ème phase: stabilisation du pH du substrat :** à partir du 19<sup>ème</sup> jour de production, il y a une stabilisation autour de ces valeurs. Celles-ci varient entre 7,03 et 7,83.

**Remarque**

La comparaison de l'expérimentation de la boue brute à pH 6,37 avec celle à pH modifié 9,54 a révélé l'effet favorable de l'alcalinisation du substrat sur la méthanisation.

Les variations, très importantes, du pH sont dues probablement au mode d'agitation, puisque nous avons utilisé une agitation manuelle en discontinue; cela altère l'homogénéisation du substrat fermenté.

❖ III-3-1-d Evolution des matières sèches dans les digesteurs 1, 2 et 3

Les performances de la digestion anaérobie sont variables suivant le type de boue introduit en digestion, un des facteurs d'évaluation de l'efficacité du processus est le taux d'abattement de la matière sèche (MS). Le tableau III-4 contient les taux de MS des échantillons de boues prélevés le 16<sup>eme</sup>, le 33<sup>eme</sup>, le 48<sup>eme</sup> et le 65<sup>eme</sup> jour.

Tableau III-4. Résultats des matières sèches des digesteurs 1, 2 et 3

Prélèvements	MS (BOUES pH=6,37) (g/l)	MS (BOUES pH=9,54) (g/l)	MS (BOUES DILUEE à 50%)
16	27,5	24,1	14,77
33	24,1	16,67	12,03
48	23,67	14,26	11,6
65	21,35	13,1	11,04

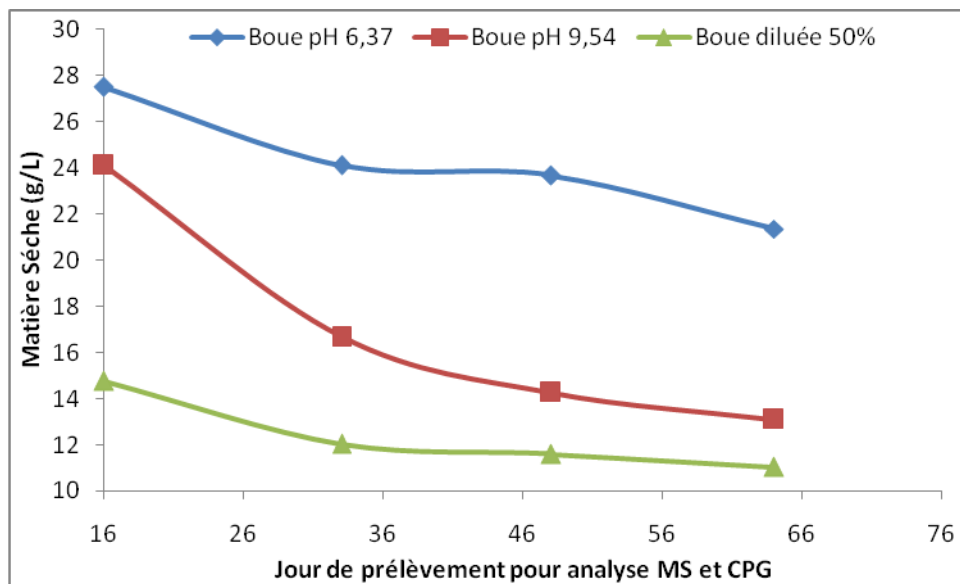


Figure III-11. Evolution des matières sèches dans les digesteurs 1, 2 et 3

## ❖ Evolution des matières sèches dans les digesteurs 1, 2 et 3

Nous remarquons une diminution des matières sèches de la boue à pH modifié (9,54) de la valeur initiale de 38,07 à 13,1, ce qui donne un abattement de 65,59%. Ce qui coïncide avec de fortes productions en biogaz comme l'atteste le volume cumulé obtenu étant le plus important parmi les trois cas étudiés. Les résultats obtenus pour la boue à pH 6,37 donnent une chute en MS de 43,92%.

**4.4. Analyse quantitative et qualitative du biogaz produit**

Le tableau III-5 contient les pourcentages des échantillons destinés à l'analyse CPG des trois expérimentations. Ces analyses ont donné les quantités en pourcentage volumique du CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>.

Tableau III-5. Composition du biogaz des 3 digesteurs

Prélèvement N°	Date d'analyse	constituants	Quantité en %. Boue pH=6,37	Quantité en %. Boue pH=9,54	Quantité en %. Boue diluée 50%
1	16 <sup>ème</sup> jour de production	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>15,203</b>	<b>34,203</b>	<b>35,007</b>
		N <sub>2</sub>	64,326	42,61	34,52
		CO <sub>2</sub>	20,47	23,187	30,47
2	33 <sup>ème</sup> jour de production	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>68,52</b>	<b>77,923</b>	<b>53,238</b>
		N <sub>2</sub>		0,067	
		CO <sub>2</sub>	31,48	21,957	46,762
3	48 <sup>ème</sup> jour de production	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>37,57</b>	<b>31,9</b>	<b>42,37</b>
		N <sub>2</sub>	41,27	54,42	35,11
		CO <sub>2</sub>	21,16	13,68	22,52
4	65 <sup>ème</sup> jour de production	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>20,787</b>	<b>23,451</b>	<b>34,332</b>
		N <sub>2</sub>	67,197	64,005	44,509
		CO <sub>2</sub>	12,016	12,543	21,159

**Caractérisation du biogaz du digesteur 1, 2 et 3**

Le tableau III-5 exprime la composition du biogaz par rapport au méthane et au gaz carbonique en fonction du temps durant la méthanisation. On constate que 16 jours de digestion donne 15,2, 34,2 et 35% de CH<sub>4</sub> pour respectivement la boue à pH 6,37, la boue à

pH 9,54 et pour la boue diluée à 50%. Pour les 17 jours suivants, la production en méthane est optimale et atteint les pourcentages respectifs de 68,52 ; 77,92 et 53,24%. A partir du 34<sup>ème</sup> jour, la production du biogaz diminue progressivement comme on peut le constater sur la figure III-14

Dans le cas de la boue à pH 9,54, la quantité du méthane analysée durant la production du biogaz varie de 34,2 à 23,45 %. La composition optimale (77,92%) a été obtenue durant la période des fortes productions. Une relation proportionnelle semble être établie entre la production du biogaz et la qualité de sa composition.

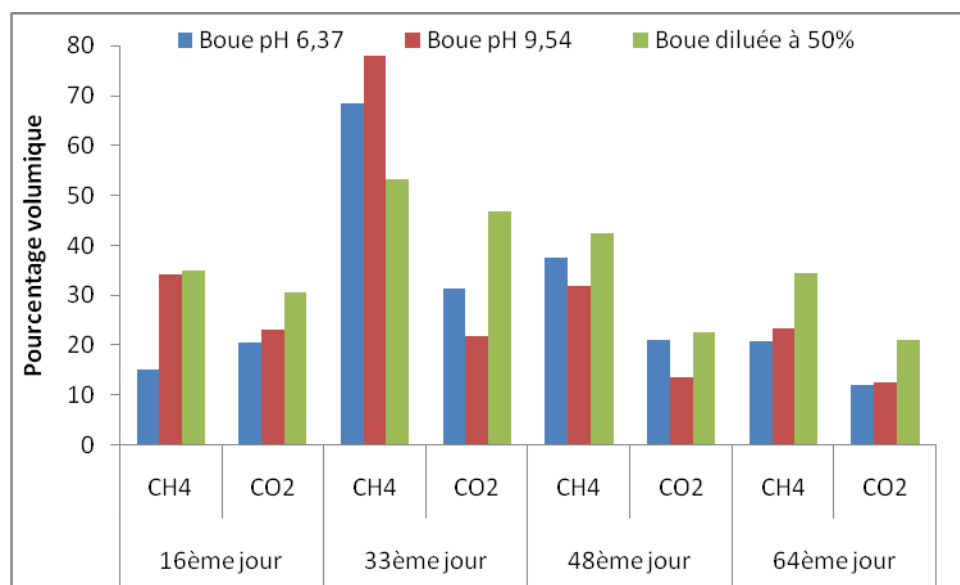


Figure III-12 Evolution des pourcentages volumiques du CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub>.  
du biogaz des digesteurs 1, 2 et 3.

La production du biogaz a été obtenue à partir de la boue : un déchet de station d'épuration des eaux usées. Les résultats mettent en évidence la possibilité de produire du biométhane à partir des déchets organiques qui reste une source énergétique non exploitée en Algérie.

L'étude proposée présente une première approche de cette prospection qui a consisté à méthaniser la boue en monosubstrat et en mode thermophile. Les résultats ont montré l'intérêt d'alcaliniser le substrat qui a eu pour effet d'augmenter la production en biogaz et sa teneur en CH<sub>4</sub>.

### III-3-2- Etude de la méthanisation de la boue en mode thermophile et mésophile avec co-substrat

D'autres déchets organiques propres d'origine diverses dits «co-substrats» peuvent être mélangés aux boues (« co-digestion ») pour compléter en quantité les apports nutritifs et augmenter la capacité méthanogène du substrat :

- le gazon et les feuilles provenant d'espaces verts
- les déchets de l'industrie agro-alimentaire
- les résidus d'assainissement (boues, matière de vidange, graisses de station d'épuration ...)
- les déchets de restauration collective, huile de friture, eaux grasses ....

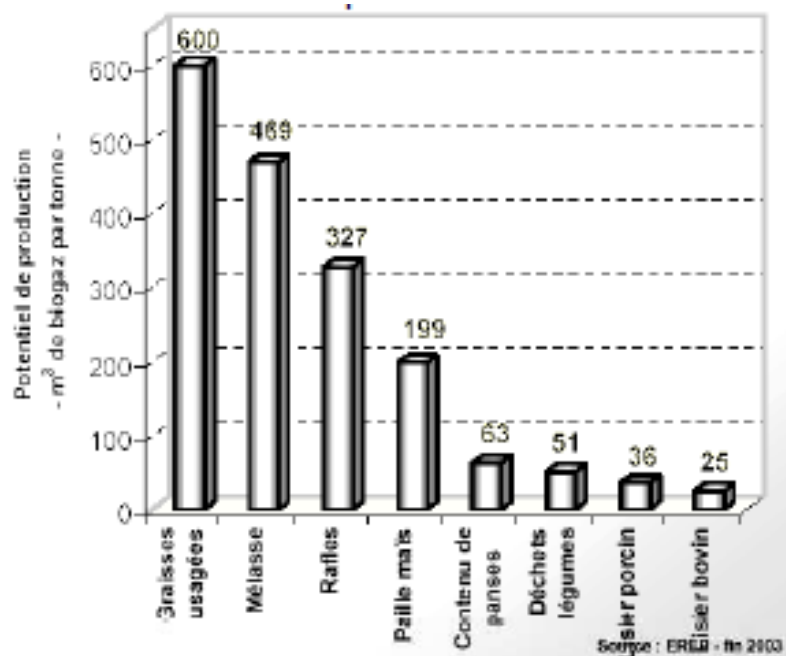


Figure III-13. Diagramme représentant le Potentiel de production de biogaz selon le produit qui fermente [42]

Pour une production maximale de méthane, il est préférable d'utiliser des co-substrats riches en graisses, protéines et hydrates de carbone car leur dégradation entraîne une formation importante d'acides gras volatils, principaux précurseurs du méthane. La figure III-15 indique clairement que les graisses usagées génèrent de grandes quantités de biogaz [42].

C'est dans ce contexte que nous avons étudié l'optimisation de la méthanisation des boues de la STEP HR. Les graisses usagées collectées en début de station au niveau de l'étape de dégraissage ont été mélangées aux boues, nous avons donc procédé à une co-digestion selon

les deux modes mésophile et thermophile. Nous avons optimisé la nature du substrat et la température.

Nous avons abordé quatre cas distincts :

- [Boue (80%) + graisse (20%)] en mode thermophile
- [Boue (50%) + graisse (50%)] en mode thermophile
- [Boue (80%) + graisse (20%)] en mode mésophile
- [Boue (50%) + graisse (50%)] en mode mésophile

Nous avons suivi le même protocole expérimental, à savoir, la mesure du pH, de la température et du volume de biogaz formé, les résultats figurent sur le tableau III-6.

Tableau III-6

N°jr	Mode thermophile								Mode Mésophile							
	50% Boues+50% graisses				80% boue+20% graisses				50% boues + 50% graisses				80 % boues + 20% graisses			
	T°(°C)	ph	Vbiogaz(ml)		T°(°C)	ph	Vbiogaz(ml)		T°(°C)	ph	Vbiogaz(ml)		T°(°C)	ph	Vbiogaz(ml)	
1																
2	41,2	6,36			41,9	6,33			27,7	6,36			28,2	6,35		
3	41,5	6,29			42,1	6,32			27,8	6,33			28,5	6,31		
4	41,9	6,22			42,4	6,28			28,3	6,28			29,3	6,25		
5	42	6,4			42,7	6,21			30,2	6,4			30,9	6,43		
6	42,1	6,42	327	327	42,9	6,46	21	21	31	6,41	68,2	68,2	31,2	6,64	31	31
7	42,5	6,45	24	351	41,4	6,52	31	52	31,5	6,44	21,5	89,7	33,3	6,66	45	76
8	43,8	6,57	28	379	35,6	6,53	37	89	33	6,45	22	112	33,5	6,73	29	105
9	44,7	6,58	22,5	402	36,5	6,62	42	131	33,1	6,49	14,5	126	33,7	6,71	18,5	124
10	46,2	6,57	26	428	37,4	6,63	49	180	32,9	6,56	21	147	33,8	6,68	24,5	148
11	48	6,56	22,5	450	44,8	6,65	53	233	35,4	6,58	22,5	170	34,9	6,8	20	168
12	50,6	6,66	29	479	42,2	6,65	57	290	33,6	6,66	21,5	191	35	6,96	27,5	196
13	48	6,73	32	511	47	6,79	59,5	350	31,6	6,79	19	210	35,1	7,12	22	218
14	46,1	6,83	51	562	50,9	6,8	63	413	31,4	6,97	28	238	35,3	7,17	50	268
15	48,5	6,81	98	660	50	7,03	69,5	482	33,3	6,99	48	286	35,5	7,14	96	364
16	50,2	6,85	135	795	46,4	6,95	164	646	34,2	7,01	85,5	372	35,6	7,04	181	544
17	47,3	6,98	24,5	819	44,7	7,01	72,5	719	33,1	7,31	200	572	32,1	7,4	146	690
18	47,5	6,9	21	840	47,8	7,03	67	786	33,1	7,17	54	626	30,9	7,56	464	1153
19	47	7,11	20,5	861	44,8	7,06	89	875	34,6	7,14	27	653	35,2	6,4	25,5	1179

20	48,5	6,7	22	883	48,4	6,64	76	951	34,5	6,73	34	687	34,7	6,96	28	1207
21	46,9	6,75	50,5	933	51,8	6,65	44	995	32,1	7,2	20	707	33,5	7,04	32	1239
22	43,9	7,03	22	955	49,6	6,9	52	1047	32,9	6,98	20	727	32	7,1	40	1279
23	39,7	7,24	20,5	976	40,8	7,14	49	1096	34,1	6,79	42	769	32,3	7,12	39,5	1318
24	42,2	6,82	1220	2196	49,6	6,78	52	1148	34,4	6,59	38	807	31,7	6,81	132	1450
25	40,8	6,93	31	2227	45,5	6,89	82	1230	31,9	6,78	43	850	33,3	6,79	85	1535
26	43,7	6,87	71	2298	49,1	6,84	72	1302	33,9	6,69	35	885	34,7	6,79	19,5	1554
27	39,1	7	70	2368	43	6,86	79	1381	32,1	6,66	41	926	34,2	6,78	75	1629
28	44,4	6,76	55	2423	46,4	6,82	52	1433	35,5	7,16	46	972	38,3	6,77	71	1700
29	48	6,84	35	2458	46,7	6,85	47	1480	35,4	7,05	48	1020	37,8	6,74	121	1821
30	45,7	6,9	8	2466	48,7	6,91	75	1555	34,5	6,95	43	1063	36,1	6,77	40	1861
31	46,3	6,84	12	2478	46,9	6,93	86	1641	34,6	6,91	43	1106	34,6	6,77	75,5	1937
32	45,3	6,88	46	2524	46,9	7	93	1734	35,4	6,95	43	1149	37	6,76	84,5	2021
33	44,1	7,04	47	2571	46	7	98,5	1832	36	6,91	44	1193	36	6,83	71	2092
34	45,1	7	50	2621	50,1	6,99	121	1953	36	7,03	66,5	1259	37,6	6,85	73,5	2166
35	45,7	6,89	104	2725	49,7	7,04	132	2085	35,8	7,06	57,5	1317				2166
36	46,7	6,83	77	2802	47,8	7,08	138	2223	33,1	7,06	49,5	1366	35	6,8	20	2186
37	47,2	7,13	77,5	2879	46,3	7,4	146	2369	34,5	7,25	26	1392	35	7,1	31	2217
38	48,4	7,13	53	2932	50,5	7,29	132	2501	35	7,16	39,5	1432	35,6	7,08	76	2293
39	47,2	7,21	61	2993	47	7,31	139	2640	33,7	7,3	47	1479	36	7,05	21,5	2314
40	50,1	7,16	49	3042	45,4	7,42	148	2788	33,6	7,21	53,5	1532	34,4	7,17	25	2339
41	48,2	7,3	62,5	3105	47,7	7,42	152	2940	34,7	7,28	21	1553	35,7	7,07	29	2368
42	51,6	7,27	58	3163	45,9	7,34	162	3102	34,1	7,32	52	1605	36	7,09	25	2393
43	49,2	7,28	40	3203	48,1	7,3	159	3261	35	7,33	46,5	1652	35,9	7,5	27	2420
44	47,4	7,65	25	3228	48,7	7,85	152	3413	34,5	7,88	74,5	1726	36,4	7,54	33	2453
45	46,9	7,73	16	3244	51,6	7,75	174	3587	35,4	7,81	31	1757	36,5	7,61	42	2495

46	48,1	7,65	52	3296	48,4	7,85	179	3766	35,3	7,82	99,5	1857	37,6	7,55	27	2522
47	45,7	7,78	23	3319	44,1	7,98	383	4149	38,5	7,78	56,5	1913	37,9	7,59	35,5	2558
48	40,9	7,68	34	3353	46,3	7,95	391	4540	36,7	7,82	118	2031	38,6	7,6	46	2604
49	52,3	7,69	29	3382	42,8	7,99	396	4935	37,9	7,89	45,5	2077	39,2	7,6	39,5	2643
50	48,1	7,76	20	3402	50,7	7,94	75	5010	35,1	7,88	42	2119	34,7	7,68	27	2670
51	46,1	7,72	23	3425	50,4	7,87	68	5078	34	7,9	41	2160	35,7	7,7	20,5	2691
52	46	7,73	45	3470	50,5	7,88	63	5141	35,1	7,85	38,5	2198	36,1	7,48	39,5	2730
53	49	7,74	50	3520	48,9	7,94	57	5198	36,1	7,51	43	2241	35,9	7,68	25	2755
54	47,6	7,72	36,5	3556	50,2	7,85	47	5245	33,5	7,92	35	2276	35,4	7,7	42	2797
55	47	7,74	20	3576	47,8	7,97	40	5285	33,7	7,96	23	2299	35,5	7,6	13	2810
56	48	7,75	20,5	3597	51,1	7,93	42	5327	34,7	7,9	21	2320	36,1	7,7	44	2854
57	47,3	7,93	24	3621	48,3	7,76	34,5	5362	35,9	7,95	22	2342	36,3	7,68	32,5	2887
58	49,2	7,78	21	3642	49	7,91	50	5412	36,9	7,81	39	2381	36,7	7,62	15	2902
59	47,2	7,83	34	3676	51,7	7,95	39	5451	35,8	7,9	28	2409	36,2	7,68	36	2938
60	49,9	7,76	38	3714	47,2	8,01	16	5467	35,8	7,89	34	2443	33,9	7,69	43	2981
61	49,2	7,8	42	3756	49,7	8,05	23	5490	35,5	7,87	40	2483	34,5	7,72	36	3017
62	49,5	7,79	38	3794	52,1	7,9	29	5519	35,6	7,9	11	2494	36	7,69	19	3036
63	50,1	7,87	33	3827	48,1	8,01	32	5551	36	7,87	13	2507	35,6	7,71	10	3046
64	51,5	7,77	25	3852	49,2	7,92	21	5572	36,1	7,9	6	2513	37,1	7,64	24	3070
65	51,7	7,73	20	3872	51,1	7,92	10	5582	34,2	8,02	7	2520	35,1	7,74	22	3092

Durant une période de production de 65 jours, le volume du biogaz produit est évalué à 5582 mL, pour le mélange boue (80%) + graisses (20%) en mode thermophile. Le même mélange en mode mésophile donne un volume cumulé de 3092 mL. Le mélange boue (50%) + graisses (50%) en mode thermophile donne 3872 mL, en mode mésophile 2520 mL.

Il ressort de ces résultats que la production de biogaz augmente en présence des graisses à condition de respecter des proportions bien déterminées. A savoir que les graisses sont biodégradables mais moins hydrolysables (hydrolyse lente), une accumulation d'une quantité considérables d'acides gras cause le ralentissement de l'activité biologique et par conséquent réduit le volume de biogaz formé.

Pour le facteur température, il est possible de travailler en zone thermophile, entre 45 et 55°C, pour accroître les vitesses de biodégradation, donc la productivité en méthane. Le mode thermophile est recommandé sous réserve d'une isolation thermique optimale.

### III-3-2-a- Analyse quantitative et qualitative du biogaz produit

Le même mode opératoire que pour le monosubstrat est suivi pour étudier la méthanisation avec co-substrats. A savoir, l'abattement de la matière sèche (MS) dont les résultats sont mentionnés dans les tableaux III-7 et III-8 pour respectivement le mode mésophile et thermophile.

Les analyses CPG ont donné les quantités en pourcentage volumique du CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub> indiqués dans le tableau III-9 et III-10.

Tableau III-7. Résultats de matière sèche du mélange à 80%Boue+20% graisse et mélange à 50%boue +50%graisse en mésophile

temps (jour)	MS du mélange à 50%boue +50%graisse méso (g/l)	MS du mélange 80%Boue+20% graisse meso g/l
16	33,4	32,5
33	26,5	24,2
48	24,8	17,8
65	22,3	12,3

Tableau III-8 : Résultats de matière sèche du mélange à 80% Boue+20% graisse et mélange à 50% boue +50% graisse en thermophile

temps (jour)	MS mélange à 50% boue +50% graisse TH (g/l)	MS mélange 80% Boue+20% graisse TH (g/l)
16	31,7	27,6
33	27,9	21,5
48	19,8	13,7
65	17,5	10,9

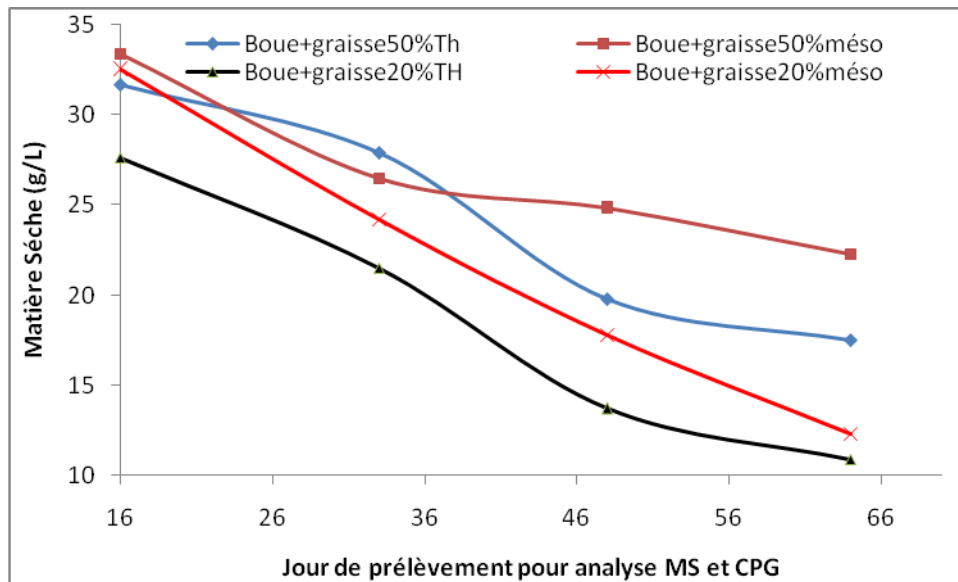


Figure III-14 .Evolution de la Matière Sèche du biogaz au cours de la méthanisation

❖ Evolution des matières sèches dans les digesteurs 4, 5, 6 et 7

Notons l’abattement de la matière sèche dans les quatre expériences, cette chute est plus importante pour le mélange [Boue (80%) + graisse (20%)] en mode mésophile, suivie de [Boue (80%) + graisse (20%)] en mode thermophile, puis [Boue (50%) + graisse (50%)] thermophile et enfin [Boue (50%) + graisse (50%)] mésophile. Une corrélation semble établie entre le taux de diminution de la matière sèche et le pourcentage volumique obtenu pour le biométhane. En effet, un abattement de MS entre le 16<sup>ème</sup> et le 65<sup>ème</sup> de l’ordre de 60% est obtenu pour le mélange [Boue (80%) + graisse (20%)] selon les deux modes. Ces taux sont

moins importants pour le mélange [Boue (50%) + graisse (50%)], ils sont de 44,79 et 33,23% pour respectivement le mode thermophile et mésophile.

### III-3-2-a- Analyse quantitative et qualitative du biogaz produit de la méthanisation des cosubstrat en mésophile

Tableau III-9. Résultats d'analyse quantitative et qualitative du biogaz produit de la méthanisation des cosubstrat 50% boue+50% graisse et 80% Boue+20% graisse en mésophile

Temps (jour)	date d'analyse	constituants	% volumique mélange à 50% boue+50% graisse meso	% volumique mélange à 80% Boue+20% graisse meso
16	08/04/2009	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>2,063</b>	<b>9,230</b>
		N <sub>2</sub>	87,528	85,780
		CO <sub>2</sub>	10,409	4,990
33	25/04/2009	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>65,400</b>	<b>95,060</b>
		N <sub>2</sub>	12,856	
		CO <sub>2</sub>	21,744	4,940
48	10/05/2009	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>54,420</b>	<b>83,700</b>
		N <sub>2</sub>	37,190	12,940
		CO <sub>2</sub>	8,390	3,360
65	26/05/2009	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>10,786</b>	<b>14,833</b>
		N <sub>2</sub>	82,489	76,534
		CO <sub>2</sub>	6,725	8,633

Tableau III-10. Résultats d'analyse quantitative et qualitative du biogaz produit de la méthanisation des mélange 50% boue+50% graisse et 80% Boue+20% graisse en thermophile

Temps (jour)	date d'analyse	constituants	% volumique mélange à 50% boue+50% graisse TH	% volumique mélange à 80 % boue+20% graisse TH
16	08/04/2009	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>8,277</b>	<b>16,150</b>
		N <sub>2</sub>	82,742	71,180
		CO <sub>2</sub>	8,981	11,670
33	25/04/2009	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>51,256</b>	<b>97</b>
		N <sub>2</sub>		1,200
		CO <sub>2</sub>	48,744	1,800
48	10/05/2009	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>37</b>	<b>86,920</b>
		N <sub>2</sub>	12,900	
		CO <sub>2</sub>	50,100	13,080
65	26/05/2009	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>14,027</b>	<b>34,027</b>
		N <sub>2</sub>	75,313	45,913
		CO <sub>2</sub>	10,660	20,060

L'interprétation des résultats obtenus repose d'une part sur la mise en évidence de l'effet de la température sur le processus de méthanisation. Les figures III-15 ,III-16 ,III-17 et III-18 représentent l'influence de la température dans le cas du mélange boue+graisse.

D'autre part, l'étude fait ressortir l'effet de l'addition des graisses usagées aux boues dans les proportions de 80/20 et 50/50, ce qui est exprimé par les figures III-19, III-20, III-21 et III-22

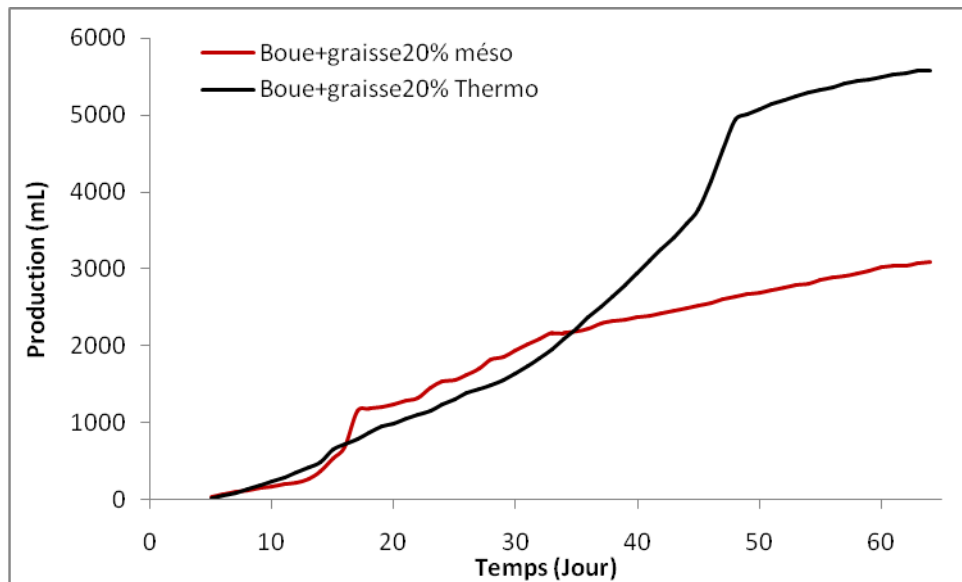


Figure III-15. production cumulée du biogaz en mésophile et en thermophile pour le substrat à 80% boue + 20 % graisse.

Le mélange boue (80%) - graisse (20%) a été soumis à une dégradation anaérobie à température de 37°C puis 55°C, donc en mode mésophile et thermophile. On constate l'écart obtenu par rapport au volume de biogaz produit, on en déduit qu'augmenter la température favorise la formation de biogaz. La décomposition et la production de biogaz sont plus rapides mais le processus est aussi plus sensible à la variabilité des substrats et de la température. La digestion thermophile permet une destruction plus complète des organismes pathogènes que les processus de digestion à basse ou moyenne température

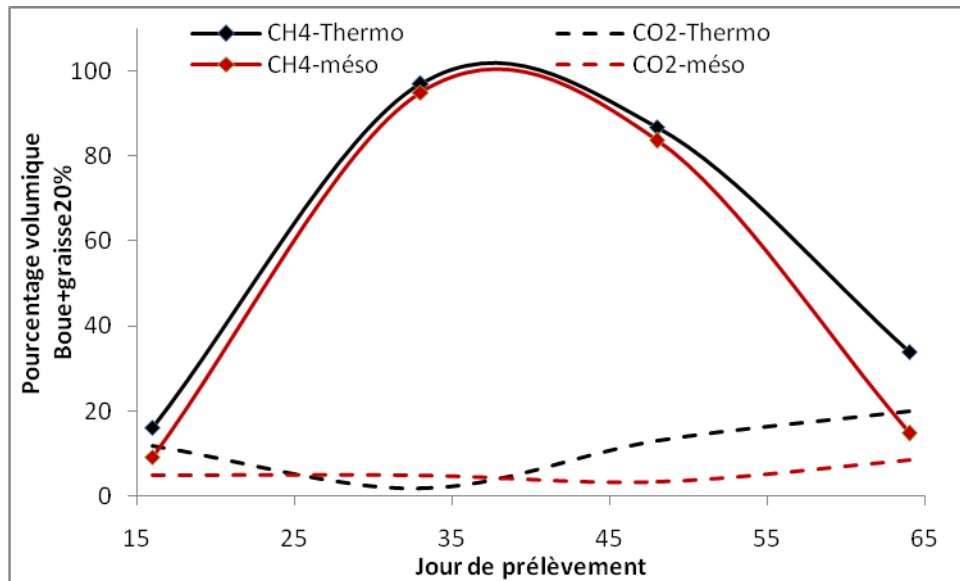


Figure III-16 évolution du pourcentage volumique du CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> pour le mélange à 80% boue + 20% graisse

La production de biogaz obtenue pour ce mélange au bout de 65 jours à les valeurs respectives de 5582 et 3092 mL. Nous remarquons que ces deux digestions donnent un optimum en méthane évalué à 95 et 97% et des quantités en CO<sub>2</sub> très faibles (4,94 et 1,8%).

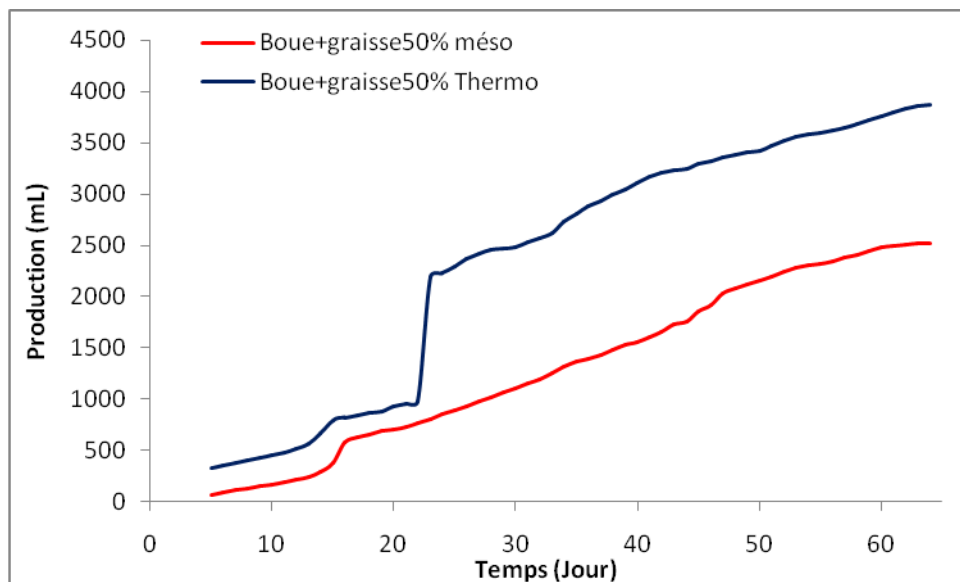


Figure III-17. Production cumulée du biogaz en mesophile et en thermophile pour le mélange à 50% boue + 50 % graisse

Pour le même mélange boue (50%) - graisse (50%) soumis à la digestion selon les deux modes, l'écart est également obtenu dans la production de biogaz. Il en ressort l'effet positif de la température.

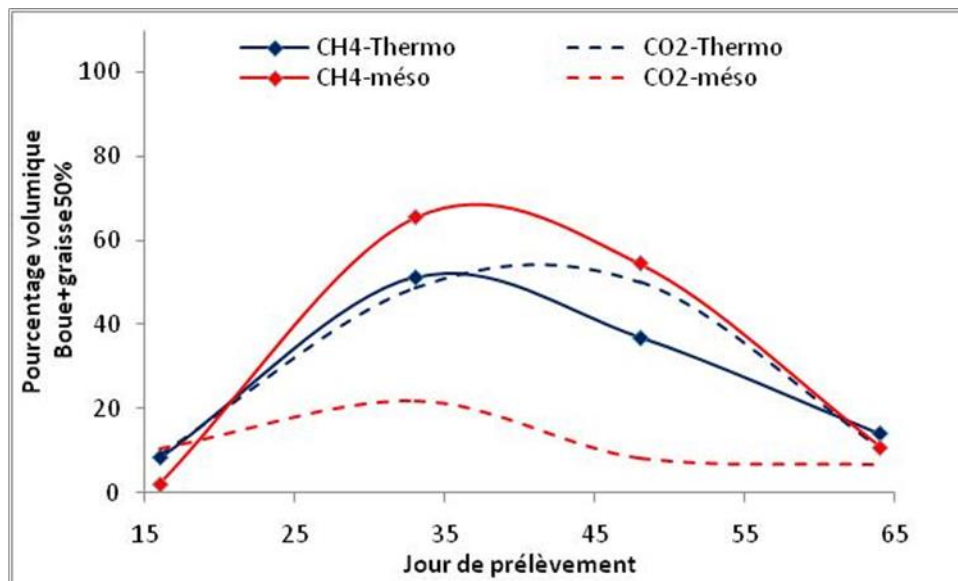


Figure III-18. Evolution du pourcentage volumique du CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub>

pour le mélange à 50% boue + 50% graisse en mode mesophile et thermophile

La proportion des graisses a été augmentée dans ce mélange pour passer de 20 à 50%. La production de biogaz a diminué de 5582 à 3872 mL en mode thermophile et de 3092 à 2520 mL en mode mésophile. Pour le premier mode, le biométhane passe de 97 à 51,5%, pour le second de 95 à 64,5%. Tandis que le CO<sub>2</sub> augmente est atteint les valeurs respectives de 48,74 et 21,74%.

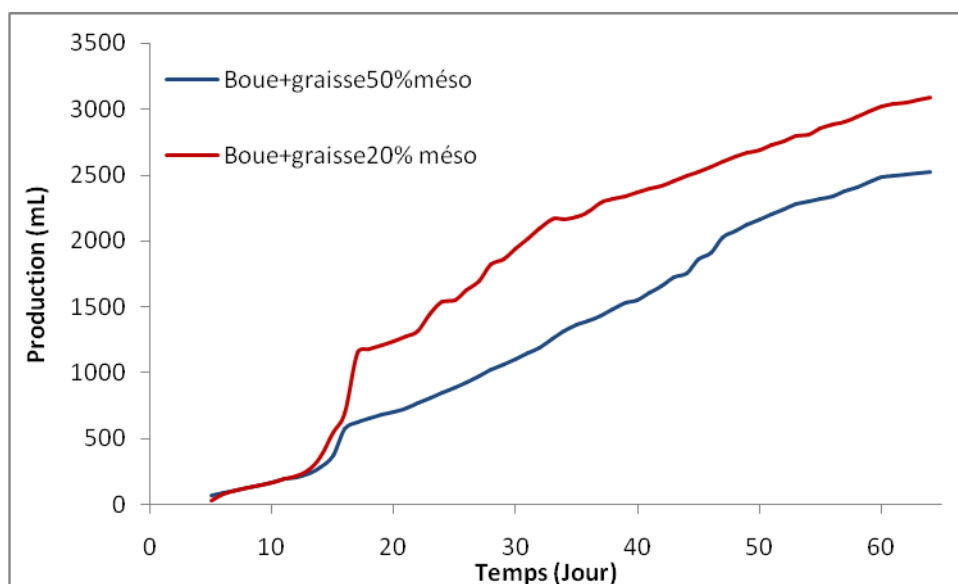


Figure III-19. Production cumulée du biogaz en mesophile des mélange à 80% boue + 20% graisse et à 50% boue + 50% graisse

La figure III-19 représente pour un même mode mésophile, l'effet défavorable causé par l'augmentation de la proportion des graisses dans le mélange avec la boue.

On rappelle que les graisses sont difficilement hydrolysables, ce qui impose une optimisation de la quantité à ajouter en vue d'augmenter la production de biogaz .

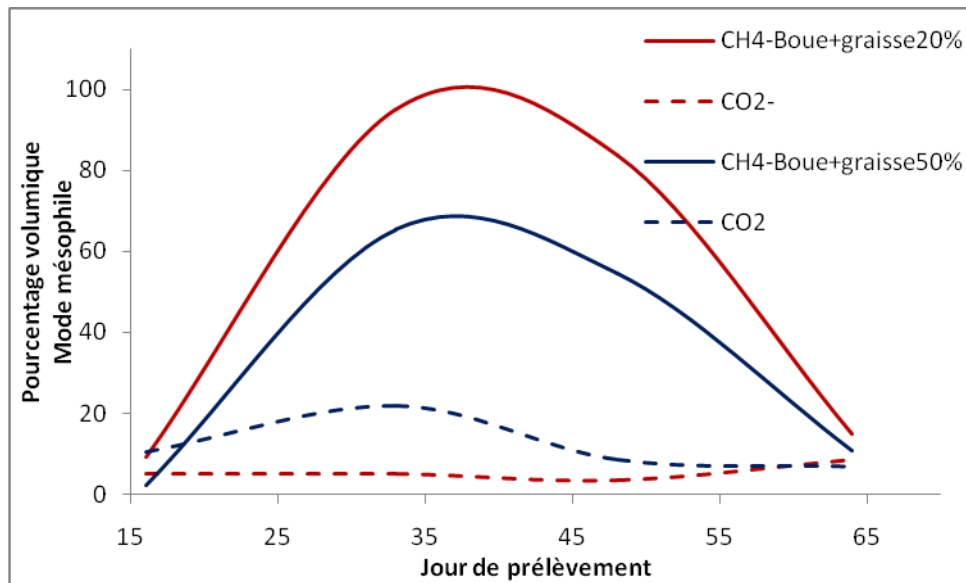


Figure III-20 .évolution du pourcentage volumique du CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub>

En mesophile pour les mélange à 80% boue +20%graisse et à50% boue + 50% graisse

L'évolution du méthane au cours de la méthanisation en mode mésophile est réduite dans le cas d'une proportion de graisse à 50%. Ce résultat confirme la constatation précédente.

En générale, plus il se forme de CH<sub>4</sub> moins on détecte de CO<sub>2</sub>.

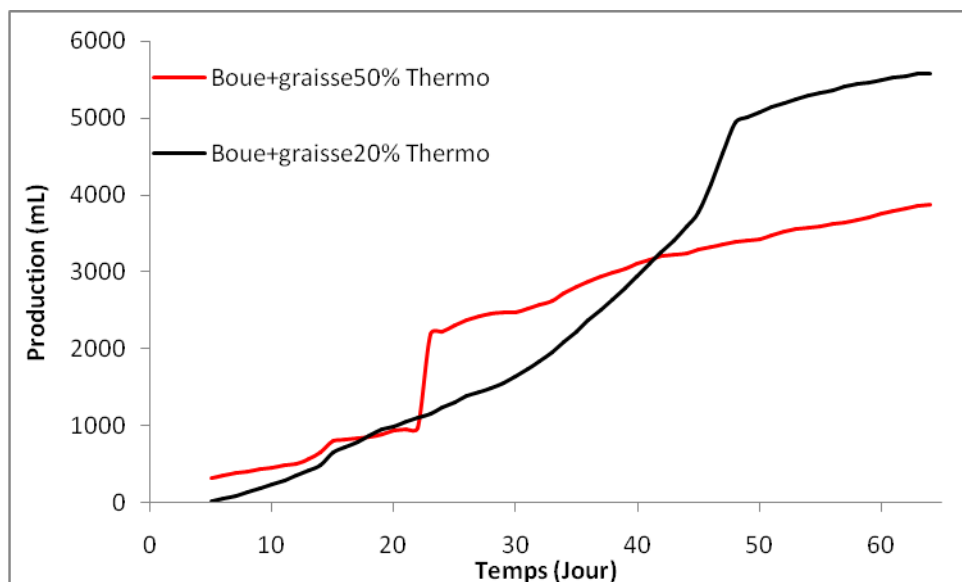


Figure III-21. production cumulée du biogaz en thermophile des mélange

A80% boue + 20% graisse et à 50% boue + 50 % graisse

Pour le mode thermophile, une proportion de 20% en graisse donne plus de biogaz que celle à 50%. Donc, pour les deux modes, la quantité de graisse à ajouter est à optimiser, toute augmentation risque de ralentir la digestion.

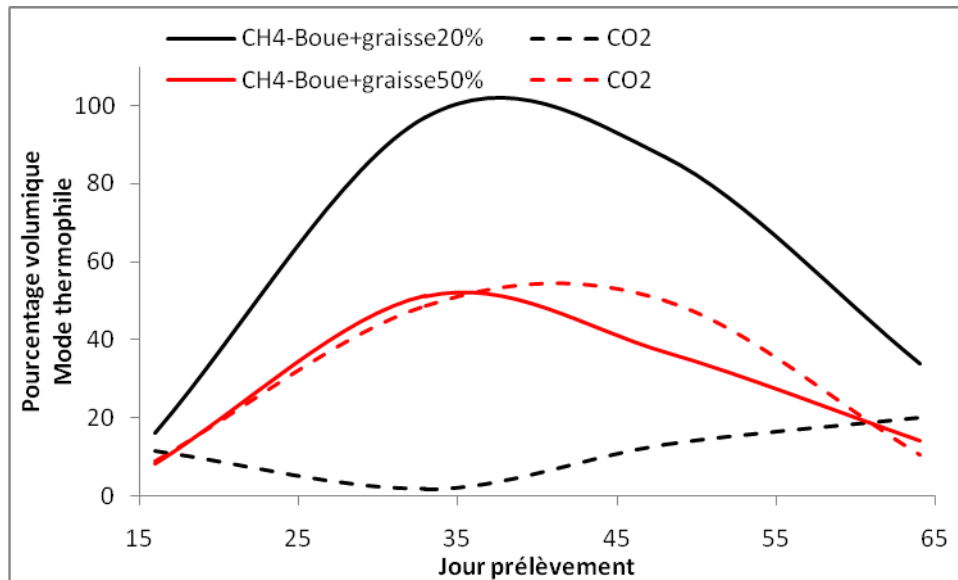


Figure III-24. évolution du pourcentage volumique du CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> en thermophile pour le mélange à 80% boue + 20% graisse

La figure III-24 confirme la déduction précédente à savoir, qu'une grande quantité de graisse réduisait l'efficacité de la méthanisation. A 50% de graisse le biométhane produit est à un pourcentage relativement faible, alors que le CO<sub>2</sub> est formé en quantité nettement supérieure comparé aux autres cas.

L'essai de co-digestion a été conduit avec des graisses usagées issues de l'étape de dégraissage de la phase de prétraitement en début de station. Ces graisses permettent une addition supplémentaire en matière organique et en matières sèches. L'apport d'un co-produit de nature lipidique permet donc une augmentation de la teneur en méthane.

Notre pays est appelé à mettre en place de nombreuses stations d'épuration produisant d'abondantes quantités de biogaz (méthane, gaz carbonique et sulfure d'hydrogène) qui s'échappent dans l'atmosphère, contribuant ainsi aux émissions de gaz à effet de serre.

S'il n'est pas utilisé, le biogaz est malodorant et polluant. Mais il est très riche en énergie et peut être exploité pour produire différentes formes d'énergie (électricité, chaleur, pompage,...) tout en éliminant les odeurs et la pollution de l'air.

Le traitement anaérobie des boues peut s'effectuer soit dans de simples bassins ou lagunes de décantation (de plus de trois mètres de profondeur), soit dans des digesteurs spécialement

conçus. Le bilan énergétique de la digestion anaérobie quantifie la différence entre l'énergie produite et l'énergie consommée par le process. Dans ce qui suit, nous nous proposons de faire un dimensionnement de digesteur adapté à la digestion des boues de la STEP de Hassi R'Mel. En plus, nous présentons deux approches relatives au bilan énergétique à base de données obtenues de la dite station.

### III-4-3-Bilan sur la production énergétique de la méthanisation.

Un des points clé à prendre en compte pour l'étude d'un traitement par digestion est la production et la valorisation d'une source énergétique importante. Cette ressource est en premier lieu utilisée pour le maintien à 37 °C du digesteur. Les besoins pour ce chauffage ne représentent que 15 à 30 % de l'énergie valorisable. Il reste donc une quantité d'énergie non négligeable à exploiter (voir bilan énergétique)

#### 1) La production initiale de matières sèche de la STEP de HR.

La production initiale de boue urbaine à la STEP de HR, correspond à la production avant digestion anaérobie. Cette production initiale est basée sur 2,38 kg de Matières Sèches par équivalent habitant et par an déterminé à partir de la production annuelle de boue de la station qui est de 936 m<sup>3</sup> pour les 15000 eqh

Cette production initiale sera nommée P<sub>1</sub>, avec P<sub>1</sub> en tonnes de MS / an.

$$P_1 = \frac{2,38 \times eqh}{1000}$$

Cette production P<sub>1</sub> correspond ainsi à la production de la station

#### 2) Caractéristiques de la station.

- Capacité de la station d'épuration urbaine de HR : 15 000 eqh.
- Chaîne de traitement de l'eau : Prétraitement, traitement secondaire par boue activée faible charge.
- Boues produites : Boues biologiques de faible charge.
- Production de boue en matière sèche P<sub>1</sub> : P<sub>1</sub> = 35,7 t de MS / an.

### 3) Caractéristiques de la digestion anaérobie.

Etude du cas le substrat à 100% boue à pH =6,37

#### a) Principaux paramètres.

- Taux d'abattement des MS : 44 %.
- Facteur n :  $n = 0,56$
- Productivité en méthane : 110 m<sup>3</sup> / t de MS initiale.
- Pouvoir calorifique inférieur du Méthane (PCI) : 9,95 kWh / (n) m<sup>3</sup>.

#### b) Principaux résultats.

- Quantité de MS éliminée par la digestion.

$$\text{MS éliminées} = P_1 \times 0,44$$

$$\text{MS éliminées} = 15,708 \text{ t de MS / an.}$$

- Production P<sub>2</sub> de boue après digestion.

$$P_2 = n \times p_1$$

$$P_2 = 19,99 = 20 \text{ t de MS.}$$

### 4) Le volume de boues produites Vi et le débit journalier Q

Nous partons d'une boue non centrifugée présentant une siccité de 3 à 5% (4 % en moyenne).

D'après la production initiale de boue, le volume Vi correspondant est calculé :

$$V_i = 35,7 \times 100 / 4$$

$$V_i = 892,5 \text{ m}^3$$

Pour éviter de sous-dimensionner le digesteur, on tiendra compte de la variabilité des teneurs en matières sèches de l'effluent arrivant à la station, soit un ratio de 2,38 kg MS/eqh/an.

Ceci conduit à prévoir un digesteur pour le traitement annuel de 1000 m<sup>3</sup>/an de boues. La production volumique de substrat sur l'année est considérée relativement constante, soit un débit journalier équivalent à :

$$Q = 2,74 \text{ m}^3/\text{j}$$

### 5) Dimensionnement du digesteur

#### a) Calcul du volume effectif $V_e$

Le choix du procédé de digestion anaérobie s'est porté sur un digesteur mésophile. Le temps de séjour dans le digesteur ou temps de rétention hydraulique (TRH) est de 30 à 35 jours. Le volume effectif du digesteur ( $V_e$ ) en considérant le temps de séjour le plus grand est :

$$V_e = Q \times \text{TRH}$$

$$V_e = 2,74 \times 35$$

$$V_e = 95,89 \text{ m}^3$$

En tenant compte du bullage, il faut donc un digesteur d'un volume total de  $100 \text{ m}^3$ .

$$V_t = 100 \text{ m}^3$$

#### b) Géométrie du digesteur

On a choisi un digesteur cylindrique respectant le rapport diamètre sur hauteur égal à 1.

Le volume de ce digesteur s'écrit:

$$V_{\text{tot}} = 0,25 H \times d^2 \times \pi$$

Avec un volume total de  $100 \text{ m}^3$ , on en déduit la hauteur et le diamètre de notre digesteur :

$$H = d = 5,03 \text{ m}$$

Ce calcul rapide nous permet d'avoir une idée de la taille du digesteur nécessaire.

### 6) Bilan énergétique de la méthanisation de boue.

#### ❖ Première approche

Le bilan énergétique de la digestion anaérobie quantifie la différence entre l'énergie produite et l'énergie consommée par le process.

#### a) Production de méthane.

$$\text{Production de méthane} = \text{productivité en méthane} \times P1$$

Production de méthane =  $110 \times 35,7 = 3927 \text{ m}^3$  de méthane / an.

b) Energie totale **Et** disponible annuellement.

Et = production de méthane  $\times$  PCI du méthane

$$Et = 3927 \times 9,95 = 39073,65 \text{ kWh/ an}$$

$$Et = 0,03907 \text{ GWh / an} = 39,07 \text{ MWh/an}$$

\* Le kWh est la quantité d'énergie nécessaire pour faire fonctionner par exemple un appareil d'une puissance de 1 kW ou 1000 W pendant une heure. On utilise aussi le MWh (1 MWh =  $10^3$  kWh, 1GWh =  $10^6$  kWh).

\*La tonne d'équivalent pétrole (tep) est une unité de mesure couramment utilisée par les économistes de l'énergie pour comparer les énergies entre elles. C'est l'énergie produite par la combustion d'une tonne de pétrole moyen

Il y a une correspondance entre la tep et le kWh, permettant de passer d'une unité à l'autre :

$$1000 \text{ kWh} = 0,086 \text{ tep} \text{ ou inversement } 1 \text{ tep} = 11\,630 \text{ kWh}$$

c) Energie valorisable **Ev** annuellement.

En considérant que 95 % de l'énergie disponible est valorisable (5% éliminés en torchère pour assurer une alimentation à débit optimal des installations de valorisation) :

$$Ev = Et \times 0,95$$

$$Ev = 0,03712 \text{ GWh / an} = 37,12 \text{ MWh/an}$$

d) Energie nécessaire au chauffage du digesteur.

Hypothèses :

- Les besoins en chaleur lors de la digestion de boues de faible charge représentent 30 % de l'énergie valorisable.
- Le chauffage se fait par une chaudière biogaz, dont le rendement « global » de transformation énergétique est de 90 % Donc, l'énergie nécessaire au chauffage du digesteur est :

$$E_{\text{chauffage}} = 0,3 Ev / 0,9$$

$$E_{\text{chauffage}} = 0,0123 \text{ GWh / an} = 12,3 \text{ MWh/an}$$

e) Energie restante disponible.

$$E_{\text{restante}} = Ev - E_{\text{chauffage digesteur}}$$

$E_{\text{restante}} = 0,03712 - 0,01230 = 0,0247 \text{ GWh /an}$

Energie restante disponible est 24,7 MWh/an

### 7) Discussion des résultats obtenus

La production annuelle en énergie calculée à partir des quantités de boues à traiter égale à 39,07 MWh nous apparaît faible pour pouvoir alimenter une chaudière (12,3 MWh), un brassage des boues par recirculation du biogaz dans le digesteur et d'autre part pour valoriser le biogaz en combustible. Pour pouvoir brasser les boues convenablement et économiser considérablement cette production Il faudra donc se tourner vers un brassage mécanique des boues, ce qui signifie un coût de fonctionnement acceptable pour l'installation.

#### ❖ Deuxième approche

##### a) 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 (MO) traitée pour un temps de rétention infini ; il est fonction de la biodégradabilité du substrat. La constante  $B_o$  est de l'ordre de  $0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$  quelque soit la nature du substrat [43]. La teneur en MO est de  $25,31 \text{ g.L}^{-1}$ . Le substrat représente alors une quantité annuelle de 25,31 tonnes de MO. La production en méthane est alors telle que :

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

$$P_{\text{CH}_4} = 25310 \times 0,5$$

$$P_{\text{CH}_4} = 12655 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{an}$$

##### b) Energie totale Et disponible annuellement

Le PCI du méthane vaut  $9,94 \text{ kWh/m}^3$  dans les conditions normales de température et de pression [41].

On en déduit l'énergie totale Et :

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

$$E_t = 12655 \times 9,94$$

$$E_t = 125,8 \text{ MWh/an}$$

##### c) Energie valorisable $E_v$ annuellement

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, de façon à garantir une alimentation à débit nominal des brûleurs. Le biogaz éliminé est alors éliminé en torchère.

D'où l'énergie valorisable annuellement:

$$E_v = 119,5 \text{ MWh/an}$$

#### d) Energie nécessaire au chauffage du digesteur

Hypothèses :

- Les besoins en chaleur lors de la digestion de boues biologiques représentent 30 % de l'énergie valorisable [44].
- Le chauffage se fait par une chaudière biogaz, dont le rendement « global » de transformation énergétique est de 90 %.

Donc, l'énergie nécessaire au chauffage  $E_{\text{chauffage}}$  du digesteur est de :

$$E_{\text{chauffage}} = (E_v \times 0,3) / 0,9$$

$$E_{\text{chauffage}} = 39,83 \text{ MWh/an}$$

#### e) Energie restante disponible

$$E_{\text{restante}} = E_v - E_{\text{chauffage}}$$

$$E_{\text{restante}} = 79,66 \text{ MWh/an}$$

### **4) Discussions des résultats obtenus**

La production annuelle en énergie calculée à partir des quantités de boues à traiter égale à 120 MWh nous apparaît faible pour pouvoir alimenter une chaudière (40 MWh), un brassage des boues par recirculation du biogaz dans le digesteur et d'autre part pour valoriser le biogaz en combustible. Pour pouvoir brasser les boues convenablement et économiser considérablement cette production Il faudra donc se tourner vers un brassage mécanique des boues, ce qui signifie un coût de fonctionnement acceptable pour l'installation.

# PERSPECTIVES

## Traitement des eaux et gestion des déchets

Les quantités de boues produites dans les stations d'épuration augmentent chaque année. Pour les valoriser, plusieurs filières permettent de récupérer l'énergie qu'elles contiennent.

La mise en place de Stations d'Épuration engendre des quantités de boues importantes considérées comme des déchets à gérer en raison de leur volume. Trouver le meilleur moyen de les valoriser reste donc un enjeu essentiel. D'autant que l'avenir de la filière classique de l'épandage (les boues organiques sont largement utilisées comme fertilisants pour les sols - avenir incertain. Ces substrats contiennent souvent des substances toxiques (métaux lourds) ou des produits (azote et phosphore) contribuant à la dégradation des sols lorsqu'ils sont stockés en trop grande quantité).

## Valorisation énergétique

Dans un contexte de crise de l'énergie, l'enjeu est de transformer les boues en combustible renouvelable. Les boues organiques ont en effet du pouvoir calorifique intéressant, quand elles sont séchées, ce dernier frôle les 4 à 5 kWh par tonne, l'équivalent de celui du bois.

L'énergie des boues peut être récupérée sous forme de chaleur mais aussi en produisant du biogaz. L'idée est ensuite d'utiliser cette énergie directement au sein de la station d'épuration (production d'eau chaude pour les chaudières, d'air chaud ou de vapeur pour le séchage...) ou de la revendre sous forme d'électricité ou de gaz.

## Préparer le substrat

Le procédé de méthanisation permet de valoriser 40 % des boues sous forme de biogaz (et donc de réduire de 40 % en moyenne les quantités de matière sèche des boues). Pour améliorer ce chiffre, des recherches sont conduites, principalement en Europe et en Amérique du Nord, sur le prétraitement des boues. Leur objectif est de développer des technologies pour les désintégrer, afin de rendre la matière organique plus accessible aux micro-organismes. « Il faut préparer le substrat pour qu'il soit le plus facile possible à ingérer » [Direction technique de Veolia Eau].

Les industriels ont exploré de multiples pistes pour faire en sorte que les bactéries dégradent plus de matière organique. Homogénéisation par ultrasons ou à haute pression, centrifugation, broyage par billes, mais aussi champs électriques pulsés, congélation-décongélation, oxydation par voie humide (les boues sont chauffées en présence d'un gaz oxydant)... La plupart de ces procédés sont commercialisés.

Dans le cadre de la digestion de boues d'épuration, l'étape limitante de la digestion anaérobie est l'hydrolyse enzymatique permettant de réduire les polymères en monomères simples facilement dégradables [45, 46]. L'idée d'améliorer les performances de la digestion anaérobie est donc de réaliser un couplage avec un procédé physico-chimique de lyse cellulaire.

Le but de ce pré-traitement est de réaliser cette hydrolyse en amont de la digestion anaérobie. Ainsi, la matière est en partie solubilisée et est rendue plus facilement accessible et biodégradable pour les microorganismes épurateurs [47,48]. Ainsi, après traitement et digestion, la quantité de boues produites par la station d'épuration serait plus faible tout comme la quantité de boues à épandre : l'impact sur l'environnement pourrait être réduit.

Mais une technologie garde cependant une longueur d'avance. « Les résultats les plus concluants pour rendre la biomasse accessible à la digestion sont obtenus grâce à l'hydrolyse thermique, avec des taux de conversion de la matière organique en biogaz qui atteignent 60 % » [direction technique de Suez]. Cette méthode consiste à chauffer les boues par injection de vapeur ou par contact direct avec un échangeur de chaleur. Seul souci : elle reste très consommatrice d'énergie.

## **Le potentiel énergétique et codigestion**

Une autre voie donne aussi de bons résultats en termes d'augmentation de la production de biogaz : la codigestion. Les boues organiques sont mélangées avec différents éléments (graisses animales, sang, lisiers, maïs...). C'est la solution qui a été retenue par Veolia sur la station d'épuration basée à Sablé-sur-Sarthe. Cette dernière traite les eaux usées de deux usines (un abattoir de volaille et une usine de préparation de plats cuisinés à base de viande). Elle a été équipée d'un digesteur de boues. En plus des boues issues des procédés d'épuration, celui-ci est alimenté en graisses animales. Leur potentiel énergétique est en effet très élevé. La production de biogaz qui s'établissait à 2100 m<sup>3</sup>/jour, est passée, avec l'ajout des graisses, à 3100 m<sup>3</sup>/jour (+50 %). L'installation d'un système de cogénération pour transformer ce biogaz en électricité et en chaleur est en cours.

La ville de Budapest, en Hongrie, a opté pour le même procédé dès 2004, au moment de la rénovation de sa station d'épuration, une des plus importantes d'Europe de l'Est (elle traite les eaux d'un million d'habitants). Dans ce cas, les boues sont mélangées avec des déchets de l'industrie agroalimentaire (débris de pain, de gâteaux...) avant d'être envoyées dans un digesteur. Résultat : la production de biogaz a été multipliée par trois. Celui-ci est transformé en énergie électrique (par cogénération) qui est revendue sur le réseau extérieur. La ville d'Oslo, en Norvège, a quant à elle décidé d'aller plus loin : le méthane produit sur ses stations d'épuration devrait, à partir de 2010, alimenter les bus de la ville...

## Conclusion

La digestion anaérobie apparaît donc comme une étape de traitement des boues très intéressante à étudier, dans le cadre de l'élaboration de filières d'élimination et de valorisation adaptées et fiables. Elle pourrait apporter une partie de la réponse à la problématique de gestion des boues, en termes de dépollution et de production énergétique.

Les critères de décision devront se baser sur des contraintes essentiellement environnementales, énergétiques et économiques.

D'un point de vue économique, il faut tenir compte de l'ensemble des bénéfices induits :

- Réduction des quantités à traiter et des frais liés.
- Production d'énergie utilisée pour les besoins de la station ou valorisée de manière annexe.
- Diminution des impacts environnementaux liés à l'élimination des boues (moins de boues à éliminer).

Plusieurs paramètres laissent voir de bonnes perspectives pour cette filière de traitement des boues :

- utilisation de monosubstrat (boue seule), avec modification de pH et/ou dilution.
- choix du mode mésophile ou thermophile.
- mélange de la boue avec des cosubstrats à des proportions différentes, afin d'optimiser la production de biogaz.

La digestion anaérobie en mode thermophile en monosubstrat a été étudiée en premier. Nous avons traité trois cas distincts :

- Boue brute à pH initial de 6,37
- Boue brute à pH modifié à 9,54
- Boue dilué à 50% de pH 6,37

La production cumulée en biogaz en 65 jours de méthanisation a donné la séquence :

$$V_{cum}(\text{pH } 9,54) > V_{cum}(\text{diluée } 50\%) > V_{cum}(\text{pH } 6,37)$$

La comparaison des résultats a révélé essentiellement l'effet favorable de l'alcalisation du substrat sur la méthanisation.

La production journalière a atteint des valeurs maximales pendant les premières semaines du processus mais s'affaiblit ensuite à cause de l'appauvrissement du milieu en matière organique servant de substrat aux microorganismes.

Les variations, très importantes, du pH sont dues probablement au mode d'agitation, puisque nous avons utilisé une agitation manuelle en discontinue; cela altère l'homogénéisation du substrat.

Nous avons remarqué une diminution des matières sèches :

- La boue à pH modifié (9,54) donne une diminution de MS de 38,07 à 13,1, ce qui donne un abattement de 65,59%.
- La boue à pH 6,37 donne une chute en MS de 43,92%.

La composition du biogaz par rapport au méthane et au gaz carbonique en fonction du temps durant la méthanisation a été évaluée grâce à la chromatographie en phase gazeuse.

- 16 jours de digestion donne 15,2, 34,2 et 35% de CH<sub>4</sub> pour respectivement la boue à pH 6,37, la boue à pH 9,54 et pour la boue diluée à 50%.
- Les 17 jours suivants, la production en méthane est optimale et atteint les pourcentages respectifs de 68,52 ; 77,92 et 53,24%. A partir du 34<sup>ème</sup> jour, la production du biogaz diminue.

La composition optimale en CH<sub>4</sub> (77,92%) a été obtenue durant la période des fortes productions. Une relation proportionnelle semble être établie entre la production du biogaz et sa composition.

La codigestion a fait l'objet de la seconde partie de ce travail, l'étude s'est faite selon les deux modes mésophile et thermophile. Nous avons optimisé la nature du substrat et la température, obtenant 04 cas distincts à étudier, les volumes cumulés en biogaz obtenus sont :

- [Boue (80%) + graisse (20%)] en mode thermophile avec un volume cumulé est de 5582 mL
- [Boue (50%) + graisse (50%)] en mode thermophile, Vcum = 3872 mL
- [Boue (80%) + graisse (20%)] en mode mésophile, Vcum = 3092 mL
- [Boue (50%) + graisse (50%)] en mode mésophile, Vcum = 2520 mL

La teneur du biogaz en biométhane atteint des valeurs extrêmement importantes pour le mélange boue 80% -graisse 20%. L'addition de cosubstrat est bénéfique à condition de respecter les proportions par rapport aux boues. La température semble favoriser la digestion anaérobie, ce qui est illustré par le mélange boue 50% -graisse à 50%.

A la fin de ce mémoire, nous avons proposé deux approches concernant le bilan énergétique de la méthanisation de boue. En effet, en se basant sur la quantité de boue produite par la STEP HR, nous avons estimé les dimensions du digesteur le plus adapté. La production annuelle en énergie a été également calculée

## Références bibliographiques

[1]: Revue SONATRACH N° 48 mars 2006

[2]:A.BOUTMEDJET, « La valorisation des boues résiduaires urbaines en plantation forestière dans les zones arides », Mémoire de magister : Agronomie saharienne. Ouargla 2004.

[3]: DEGREMONT, « Mémento technique de l'eau » .10<sup>ème</sup> édition, tome 1.Paris édition Lavoisier technique et documentation, 2005.

[4]: P, DUCHENE, « Les systèmes de traitement des boues des stations d'épuration des petites collectivités ». Documentation technique du FNDAE. N° 09, p 8-9,1990.

[5]: B, POMMEL, « La valorisation agricole des déchets : les boues résiduaires urbaines» INRA, 70 p, 1979.

[6]: MB, DEBBA, « Contribution à l'étude des boues résiduaires : intérêt agronomique et effet des polluants dans le sol et le végétal ». Mémoire de magistère en science agronomique université de Mostaganem. 180p, 1998.

[7]: J.L, MOREL, « Contribution à l'étude des boues résiduaires dans le sol ». Thèse de docteur université NANCY .122 p, 1977.

[8]: Documentation technique du FNDAE. N° 09, p 8-9.

[9]: J.JAROZ, « Le traitement des boues des stations d'épuration», centre de formation et de documentation sur l'environnement industriel, Paris 06 – France, 1985.

[10]: B, JAMONET, « Le traitement des boues résiduaires» .Université des sciences et techniques du Languedoc. Montpellier, 1987.

[11]: DEGREMONT, « Mémento technique de l'eau», 8<sup>ème</sup> Edition, technique et documentation, tome II ,1459p, 1989.

[12]: G KECK, E.VENUS, « Déchets et risques pour la santé » techniques de l'ingénieur. Traité de l'environnement, 2000.

[13]: J.DEVAUX « Ecologie approche scientifique et pratique » Paris édition Lavoisier technique et documentation, 1998.

[14]: C.BOUGRIER « Optimisation du procédé par mise en place d'un co-traitement physico-chimique application au gisement de biogaz représenté par les boues d'épuration des eaux usées », Mémoire de doctorat génie des procédés Toulouse , 2005.

[15]: A.ADDOU « Développement durable traitement des déchets valorisation, élimination » édition ellipses.

- [16]: Revues des énergies renouvelables, publication du CDER, juin 2001.
- [17]: R.MOLETTA « Procédés biologiques anaérobies, dans la gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires », Paris .édition Lavoisier techniques et documentation , 2002.
- [18]: D.B ,ARCHER, et B. H. KIRSOP, « The microbiology and control of anaerobic digestion». Anaerobic digestion, a Waste Treatment Technology. A. Wheatley. London, Elsevier: 43-91, 1990.
- [19]: P.J.COLBERG , « Anaerobic microbial degradation of cellulose, lignin, oligolignols, and monoaromatic lignin derivatives ». Biology of Anaerobic Microorganisms. A. J. B.Zehnder. New York, John Wiley & Sons: 333-372, 1988.
- [20]: M.J.MCINERNEY, M. P. Bryant, R. B. Hespell et J. W. Costerton ,« Syntrophomonas wolfei gen. Nov. Sp. Nov., an anaerobic syntrophic fatty acid-oxidizing bacterium » Appl. Environ. Microbiol. 41 (4): 1029-1039, 1981.
- [21]: J.DOLFING, « Acetogenesis. Biology of Anaerobic Microorganisms » .A. J. B. Zehnder. New York, John Wiley & Sons: 417-468, 1988.
- [22]: MORGAN, J. W., L. M. Evison et C. F. Forster ,«Changes to the Microbial Ecology in Anaerobic Digesters Treating Ice-Cream Wastewater during Start-up » Wat. Res. (6): 639-653, 1991.
- [23]: G.D.VOGELS, J. T.Keltjens et C. van der Drift, Biochemistry of methane production.Biology of Anaerobic Microorganisms ». A. J. B. Zehnder. New York, John Wiley & Sons: 707-770, 1988.
- [24]: A.DEMEYER, F. JACOB, M. JAY, G. MENGUY ET J. PERRIER , La fermentation méthanique. La conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies ». Paris, Technique et Documentation: 213-249, 1981.
- [25]: R.S.OREMLAND, « Biogeochemistry of methanogenic bacteria. Biology of Anaerobic Microorganisms ». A. J. B. Zehnder. New York, John Wiley & Sons: 641-70, 1988.
- [26]: H.S.JEE, T. MANO, N. NISHIO ET S. NAGAI, « Influence of redox potential on methanation of methanol by *Methanosarcina barkeri* in Eh-stat batch culture », Journal of Fermentation Technology 66 (1): 123-126, 1988.
- [27]: J.P BECHAC , P.BOUTIN, B.MERCIER, P.NUER « Traitement des eaux usées » édition Eyrolles, 1984
- [28]: ARER « Méthanisation des Boues de Station d'Épuration » Potentiel Réunionnais Effectué du 1er Avril au 30 Septembre 2003 Par Julien LALOE

- [29]: C.COUTURIER, S.BERGER, (SOLAGRO), «La digestion anaérobie des boues urbaines État des lieux sur le bassin Adour-Garonne » Pour l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, 2001.
- [30]: B.LA GRANGE, « biomethanisation » ,tome 2 ,EDISUD 1979
- [31]: J.GODON, E. ZUMSTEIN, P. DABERT, F. HABOUZIT ET R. MOLETTA « Microbial 16S rDNA diversity in an anaerobic digester ». Appl. Environ. Microbiol. 63 (7): 2802-2813 ,1997.
- [32]: SHAPIRO, J. A, « Thinking about bacterial populations as multicellular organisms." Annu Rev Microbiol 52: 81-104,1998.
- [33]:N.AZBAR, P. URSILLO ET R. E. SPEECE « Effect of process configuration and substrate complexity on the performance of anaerobic process »,Water res. 35 (3): 817-829,2001.
- [34]: G.ZEIKUS, « Microbial populations in digesters » . Anaerobic digestion. Stafford, Wheatleyet Hughes. Londres, Applied Science: 61-87,1980.
- [35]: J.H.THIELE, « Mixed-culture interactions in methanogenesis. Mixed cultures in biotechnology» . G. Zeikus et E. A. Johnson. New York, Mc Graw Hill: 261-292,1991.
- [36]: F.G.POHLAND, « Anaerobic treatment: fundamental concepts, applications, and new horizons. Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal Wastes ». J. F. Malina, Pohland, F.G. Lancaster, Pa, Technomic: 1-40,1992.
- [37]: J.G.FERRY, « Methanogenesis - Ecology, Physiology, Biochemistry & Genetics ». Chapman & Hall, New York-London, Chapman & Hall Microbiology Series, 536,1993.
- [38]: F.OMIL, C. D. Bakker, L. W. H. Pol et G. Lettinga « Effect of pH and low temperature shocks on the competition between sulphate reducing bacteria and methane producing bacteria in UASB reactors » , Environmental Technology 18 (3): 255-264,1997.
- [39]: Conversion biochimique de la biomasse : Aspects technologiques et environnementaux. Working Paper n°3 Pépin Tchouate Héteu (UCL-GEB) et Joseph Martin (UCL-GEB)
- [40]: P.H. SUDING, « La place du biogaz dans le développement des énergies nouvelles et renouvelables en Afrique », Le développement du biogaz en Afrique. Séminaire, atelier de travail, Bujumbura, 1991.
- [41]: I. TOU, S. IGOUD, ET A. TOUZI, « Production de biométhane à partir des déjections animales », Revue des Energies Renouvelables, N° spécial: Biomasse, production et valorisation, 2001, 103-108.
- [42]: Chambres d'Agriculture d'Aquitaine - Méthanisation / production - Novembre 2008

- [43]: B.LAFARGE. « Le biogaz, procédés de fermentation méthanique», Edition Masson Toulouse, 1995.
- [44]: C.COUTURIER , S .BERGER , « La digestion anaérobie des boues urbaines : État des lieux sur le bassin Adour-Garonne » .(SOLAGRO) – Pour l'Agence de l'Eau Adour-Garonne 2005.
- [45]: Y.Y.LI ET T. NOIKE, « Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by thermal pretreatment », *Water Science and Technology*, 26, (3-4), pp. 857-866, 1992.
- [46]: J.B.VAN LIER, A.TILCHE, B.K.AHRING , H.MACARIE, R.MOLETTA, M.DOHAANYOS, L.W.HULSHOFF POL, P.LENS ET W.VERSTRAETE, W « New perspectives in anaerobic digestion » , *Water Science and Technology*, 43, (1), pp. 1-18,2001.
- [47]:M.WEEMAES ET W. VERSTRAETE, « Evaluation of current wet sludge disintegration Techniques » , *Journal Chemistry Technology Biotechnology*, 73, (8), pp. 83-92,1998.
- [48]: DELGENÈS, J. P., PENAUD, V. ET MOLETTA, R. (2003) «Pretreatments for enhancement of anaerobic digestion of solid waste, In *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes* », J. Mata-Alvarez Editor 2003 .