

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

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie de l'Environnement

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Génie de l'Environnement

Option : Environnement

Présenté par

M^r. SIBOUKEUR Hicham

Ingénieur en Génie de l'Environnement

THEME:

Contribution à la production du biogaz à partir des boues de la station d'épuration de la ville de Hassi R'mel

Soutenu le 21/02/2010 devant le jury :

Président : Mr KERBACHI Rabah, Professeur ENP

Directeurs : Mr TOUZI Abdelkader, directeur de recherche URER MS Adrar

Mr NAMANE Abdelkader, Maitre conférence B, ENP

Examinatrices : Mme HALLEL Amina, Professeur ENP

Mlle ARAR Jazia, Maitre conférence A, ENP

Mme SALEM Zeineb, Maitre conférence A, USTHB

Ecole Nationale Polytechnique Fev 2010

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

✚ *A mes chers parents.*

✚ *A ma grand-mère.*

✚ *A la mémoire de mes grands parents.*

✚ *A mon grand frère Yacine et son épouse et ses enfants ;*

Ahmed Abdelhalim, Nabila.

✚ *A mon frère Tarek et son épouse.*

✚ *A tous mes frères : Abdelghani, Djaloul et Mohamed*

Toufik.

✚ *A notre cher trésor, ma sœur Khaira.*

✚ *A ma fiancée et tous sa famille.*

✚ *A tous ma grande famille.*

✚ *A la mémoire de mon cousin Mohamed Abdenassar.*

✚ *A tous mes amis sans exception.*

Hicham ben Abdelaziz

REMERCEMENTS

Je remercie tous d'abord **Allah** de m'avoir donné la foi et le courage pour terminer ce mémoire de Magister, pour les efforts qui nous a donné, pour pouvoir réaliser ce modeste travail.

Ce travail a été réalisé au laboratoire de la station d'épuration des eaux usées domestiques de Hassi R'mel, sous l'encadrement; de **Mrs OUALID Karim, BENHAGOUGA Aboubaker**. Que je tiens à remercier très vivement.

Je tiens à présenter mes remerciements les plus sincères à mes promoteurs ; **Mrs TOUZI Abdelkader** et **NAMANE Abdelkader**, pour avoir accepté de m'encadrer, de m'avoir donné un sens de responsabilité, pour leurs générosités, leurs gentillesse, leurs patiences et leurs précieux conseils tout le long de ce travail.

Mes remerciements sont adressés à Mr **KERBACHI Rabah**, Professeur à l'ENSP pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Je remercie également **Mme HALLAL, Mlle ARRAR** et **Mme SALEM** de l'honneur qu'elles m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail

Je remercie encore l'ensemble du service hydraulique SONATRACH Hassi R'mel pour leurs aides précieuses, nous citons : **Mrs DJAGHAB, SAADI, BACHIR, ABDELLATIF** et en particulier **Mr ZIRIRI**.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les enseignants du département de Génie de l'Environnement.

A ma promotion 2006.

Enfin, je remercie tous mes amis pour leurs soutiens.

A tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réussite de ce modeste travail.

RESUME

La fermentation méthanique ou la biométhanisation est l'une des méthodes de valorisation de la biomasse, pour la production du biogaz qui est constitué essentiellement du dioxyde de carbone et du méthane. Ce dernier peut être valorisé par différentes voies : production de chaleur et d'électricité, utilisation comme carburant ou injection directe dans le réseau du gaz naturel.

Dans notre étude nous avons contribué à l'étude de la production et de la caractérisation du biogaz produit à partir des boues de la station d'épuration de la ville de Hassi R'mel dans la Wilaya de Laghouat.

MOTS CLES :

Biomasse, Fermentation méthanique, Biométhanisation, Digestion anaérobie, Biogaz, Digesteur.

SUMMARY

The fermentation methanic or the biomethanisation is the method or the system of valuation the biomass and lump for the production of biogas, which is constitute essentially of a dioxide of the carbon and the methane. The latest may be valued by different ways: heat's production, utilization like fuwel, curbur or a direct injection in raid and system of natural gas.

In our study we contribute and focus on the production of biogas through the mud filth and humiliation of purification in Hassi R'mel in Laghouat city.

Key words:

Biomass, fermentation methanic, anaerobic digestion, biogas, digester.

ملخص :

يعتبر التخمر الميثاني واحدة من الأساليب التي يمكن بواسطتها الحصول على الغاز الحيوي (البيوغاز), والمتكون أساسا من غاز ثاني أوكسيد الكربون والميثان, وهذا الأخير له عدة استعمالات نذكر منها: إنتاج الحرارة والكهرباء ويستعمل كوقود. قمنا في هذا البحث بإنتاج الغاز الحيوي بواسطة النفايات الناتجة عن محطة تطهير المياه المستعملة لمدينة حاسي الرمل.

الكلمات المفتاح :

كتلة إحيائية, تخمر ميثاني, إختمار لا هوائي, غاز حيوي

Liste des tableaux

N°	Titre du tableau	pg
01	Composition chimique typique des boues fraîches et digérées	18
02	Valeurs de la teneur en métaux lourds des boues résiduelles	19
03	Pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la proportion de méthane	35
04	Caractéristiques moyennes du biogaz	37
05	Composition moyenne du biogaz	38
06	Gammes de concentrations des solutions étalons	45
07	Caractéristiques initiales de la boue à traiter	46
08	Composition du biogaz pour l'échantillon à 50% de dilution	55
09	Composition du biogaz pour l'échantillon à 80% de dilution	55
10	Détermination des métaux lourds	56

Liste des figures

N°	Titre de la figure	pg
01	Situation géographique de la zone d'étude " Hassi R'mel	03
02	Schéma de la station d'épuration des eaux usées « Hassi R'mel »	13
03	Classification des procédés de traitement des boues	21
04	Epaississeur	22
05	Déshydratation mécanique	23
06	Etapas de la digestion aérobie	25
07	(a) Four de la thermolyse, (b) Combustion du gaz de la thermolyse	29
08	Résidu solide de la thermolyse	29
09	Schéma de l'enceinte de gazéification	30
10	Schéma d'une unité d'oxydation par voie humide (OVH).	31
11	Etapas du processus de dégradation anaérobie des matières organiques au cours de la biométhanisation	34
12	Photo du dispositif expérimental	41
13	Bioréacteurs dans l'incubateur à 37°C	42
14	Schémas de mesure et stockage du volume de biogaz produit	44
15	Variation du pH en fonction du temps (Boue sans dilution)	46
16	Variation du pH en fonction du temps (Boue diluée à 50%)	47
17	Variation du pH en fonction du temps (Boue diluée à 80%)	47
18	Variation du pH en fonction du temps (Boue sans dilution), pH initial ajusté à 8,56	48
19	Variation de la matière sèche pendant la digestion pour les trois dilutions	49
20	Variation de la matière sèche pendant la digestion (boue sans dilution), pH initial 8,56	50
21	Variation de la quantité du biogaz en fonction du temps (Boue sans dilution)	50
22	Variation de la quantité du biogaz en fonction du temps (Boue diluée à 50%)	51
23	Variation de la quantité du biogaz en fonction du temps (Boue diluée à 80%)	51
24	Variation de la quantité du biogaz en fonction du temps (Boue sans dilution), pH initial ajusté à 8,56	52
25	L'évolution et la composition du biogaz pendant la digestion pour l'échantillon 1 (Boue sans dilution)	54
26	L'évolution et la composition du biogaz pendant la digestion pour l'échantillon 2 (Boue sans dilution) avec un pH=8,56	54

Sommaire

INTRODUCTION

I- Présentation de la région de Hassi R'mel	3
I-1-Géographique	3
I-2- Historique	3
I-3- Hydrogéologie	4
I-4-Climat	5
I-5- Zones industrielles	5
II- Présentation de la station d'épuration des eaux usées urbaines de Hassi R'mel	6
II-1- Données de base de la station d'épuration de Hassi R'mel	6
II-2- Procédé de traitement de la station de Hassi R'mel	8
II-3- Les étapes de traitement	8
II-3-1- Prétraitement	8
II-3-2- Traitement biologique	9
II-3-3- Désinfection des eaux	11
II-3-4- Filière de traitement des boues.....	11
II-4- Particularité de la station d'épuration de Hassi R'mel	12
II-5- Paramètres de mesures	13
II-5-1- Paramètres physico-chimiques.....	13
II-5-2- Les paramètres chimiques (indicateurs de pollution).....	15
II-5-3- Les paramètres biologiques.....	15
III- Origine, traitement et valorisation de la boue	17
III.1.1 Les boues primaires.....	17
III.1.2 Les boues secondaire.....	17
III.1.3 Les boues mixtes.....	17
III.2 Caractéristiques des boues	17
III.2.1 La matière organique.....	18
III.2.2 Les nutriments.....	19
III.2.3 Les microorganismes pathogènes	19
III.2.4 Les métaux lourds.....	19
III.2.5 Les composés organiques sous forme de traces	20
III.3 Le traitement des boues	20
III.3.1 Réduction de la teneur en eau des boues.....	21
III.3.2 Stabilisation des boues.....	23
III.3.3 Le traitement de stérilisation	26

III.4 Valorisation de la boue	26
III.4.1 La valorisation en agriculture des boues	27
III.4.2 La valorisation énergétique de la boue	27
III.4.2.1 la méthanisation	27
III.4.2.2 l'incération.....	27
III.4.2.3 la thermolyse	28
III.4.2.4 la gazéification	29
III.4.2.5 l'oxydation par voie humide (OVH)	30
IV- Biométhanisation « La digestion anaérobie »	32
IV.1 Définition de la biométhanisation	32
IV.2 Les étapes de la biométhanisation	33
IV.3 Les paramètres influençant la biométhanisation	35
IV.3.1. Le substrat	35
IV.3.2. La température	36
IV.3.3. Le pH et l'oxygène	36
IV.3.4. L'agitation	36
IV.3.5. La présence des inhibiteurs.....	37
IV.3.6. L'humidité	37
IV.4 Caractéristiques du biogaz :.....	37
IV.4.1. Les caractéristiques moyennes du biogaz :.....	37
IV.4.2. La composition moyenne du biogaz	38
IV.4.3 Les équivalences énergétiques du biogaz	38
IV.5 Les différents procédés possibles de la biométhanisation	39
IV.5.1 Les systèmes de digesteur.....	39
IV.5.1.1 Le procédé Batch (en discontinu).....	39
IV.5.1.2 Le système continu « infiniment mélangé ».....	39
IV.5.1.3 Le système continu avec accumulation de la biomasse active	39
IV.5.2 Le choix du type de matériaux	40
IV.5.3. Les systèmes de stockage	40
IV.5.4. Les systèmes de chauffage et d'agitation	40
IV.6 Les voies de valorisation du biogaz.....	40
V- Matériels et méthodes	42
V-1- Description du dispositif expérimental.....	42
V-2- Méthodes analytiques	44
V.2.1 Mesure du pH.....	44
V.2.2 Détermination de la matière sèche (MS)	44
V.2.3 Détermination des matières en suspensions (MES).....	44
V.2.5 Analyse spectroscopiques :.....	45

VI - Résultats et discussions	47
VI-1- Etude de l'évolution du pH :	47
VI-2- Variation de matière sèche pendant la digestion.....	50
VI-3- La production du biogaz	51
VI-3-1- Le bilan énergétique.....	53
VI-3-1-1- La quantité annuelle de boue	54
VI-3-1-2- La production du méthane	54
VI-3-1-3- L'énergie disponible annuellement.....	54
VI-4- caractérisation du biogaz obtenu.....	54
VI-4-1 Résultats des analyses par Chromatographie en Phase Gazeuse (CPG)	54
VI-5- Détermination des métaux lourds pour les quatres substrats après la digestion	57

CONCLUSION

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

INTRODUCTION

Actuellement, l'énergie est disponible en grande quantité, et reste relativement bon marché. Elle permet à de nombreuses populations de jouir de très hauts niveaux de confort, de productivité et de mobilité. L'accès à ces grandes quantités d'énergie et leur exploitation est cependant inégalement repartie entre les régions et les pays.

C'est le cas en Algérie, malgré les richesses en hydrocarbures, l'approvisionnement en combustible fossile (pétrole, gaz, naturel,...) reste l'un des problèmes majeurs des régions enclavées et plus particulièrement les régions montagneuses et celles du sud, ce qui a engendré une consommation accrue en bois, une dégradation poussée des forêts, une érosion des sols et une détérioration du climat et de l'environnement.

Pour répondre aux besoins en énergie de notre pays, afin d'assurer sa pérennité, réduire sensiblement la pollution locale et l'effet de serre, pour la préservation de l'environnement ; la prospection et le développement de nouvelles sources d'énergie ont été entrepris et notamment l'énergie issue de la biomasse et plus précisément le biogaz.

Cette forme d'énergie renouvelable largement disponible, peu coûteuse et non polluante est utilisée pour compléter l'énergie fossile non renouvelable.

La valorisation des déchets organiques et principalement les boues d'une station d'épuration des eaux usées urbaines pour la production du biogaz pourrait être considérée comme une solution économique, décentralisée et écologique, à travers une autonomie énergétique et un développement agricole durable des zones rurales [1]

De nombreuses stations d'épurations ont été réalisées en Algérie, mais rares sont celles encore fonctionnelles en raison des problèmes de suivi, d'entretien ou d'inadaptation. [2]

Les stations d'épurations urbaines ont pour rôle d'éliminer la pollution contenue dans les effluents domestiques et industriels avant leur rejet dans le milieu naturel. Si l'eau, en fin de traitement est épurée, la pollution initiale en revanche se trouve stockée et concentrée dans les boues issues des diverses étapes de traitement des eaux [2].

La production d'énergie à partir de la matière organique de diverses origines (matières végétales, déjections animales, sous-produits de l'industrie agro-alimentaire, boues des stations d'épuration, ordures ménagères,...) au moyen de procédés de fermentation anaérobie dans des digesteurs appropriés (biométhanisation), permettra une meilleure gestion des déchets, une préservation de l'environnement et un développement ainsi qu'une diversification des ressources énergétiques (énergies alternatives).

Par ailleurs cette matière organique, au niveau local, permettra de produire de l'énergie à moindre coût pour la cuisson, le chauffage et l'éclairage.

Le biogaz reste une énergie méconnue en Algérie et même si elle ne fait pas partie de nos traditions socioculturelles et économiques, elle doit représenter la meilleure solution pour les problèmes déjà évoqués [1].

Le travail exposé dans ce mémoire a pour objectif de contribuer à la production de biogaz à partir des boues de la station d'épuration des eaux usées domestiques de la ville de Hassi R'mel.

Cette étude a été développée en deux grandes parties :

- Une partie bibliographique, dans laquelle nous présentons :
 - La région d'étude,
 - La station d'épuration,
 - La biométhanisation ou « La digestion anaérobie ».

- Et une partie expérimentale, dans laquelle nous présentons :
 - Les méthodes d'analyse et le matériel utilisé
 - L'étude des conditions opératoires intervenant dans le processus de valorisation des boues activées. Leurs influences sur les paramètres choisis à savoir :
 - L'étude de l'évolution du pH ;
 - La variation de la matière sèche ;
 - La production du biogaz et sa caractérisation ;
 - La détermination des métaux lourds ;

I- Présentation de la région de Hassi R'mel

I-1-Géographique [3]

La zone d'étude (Hassi R'mel) est située dans la Wilaya de Laghouat au Sud de l'Algérie, à 525 Km au sud d'Alger, à environ 70 Km à l'ouest de Berriane, à 120 Km au nord-ouest de Ghardaïa et à 120 Km au sud-est de Laghouat. (Fig.1)

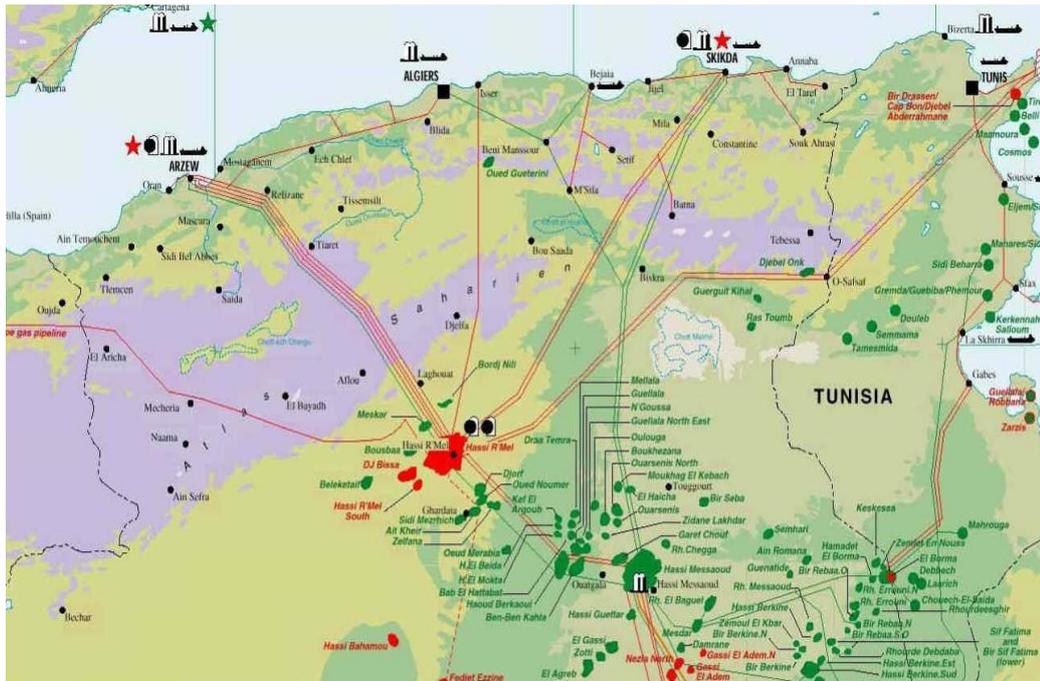


Figure 01 : Situation géographique de la zone d'étude " Hassi R'mel "[3].

I-2- Historique [3]

Le champ de gaz de Hassi R'mel est mis en valeur depuis les années 1960, il est exploité par SONATRACH seule. Il représente la plus grande installation de traitement de gaz en Algérie.

Le grand gisement de Hassi R'mel a été découvert en 1956, par le forage du puits HR-01, mettant en évidence un gisement de gaz humide à une profondeur de 2132 m. Depuis sa découverte, le champ de Hassi R'mel est passé par plusieurs phases et plans de développement :

- **1957** : Forage d'autres puits pour la reconnaissance de la structure,
- **1961** : Exploitation de 2 unités de traitements de gaz d'une capacité de 1,3 milliards m³/an,
- **1969** : Exploitation de 4 unités supplémentaires augmentant la capacité à 4 milliards m³/an,
- **1972-1974** : L'exploitation de 6 unités supplémentaires augmentant la capacité 14 milliards m³/an,
- **1975-1980** : Augmentation de la capacité jusqu'à 94 milliards m³/an, et récupération maximum du condensât et GPL,
- **1985** : Réalisation et mise en service d'une unité pour la récupération des gaz torchés,
- **1987** : Mise en service d'un centre de traitement de gaz (Djebel Bissa),
- **1999** : mise en service d'une station de récupération des gaz associés provenant des Centres du traitement d'huiles.
- **2000** : Mise en service d'un centre de traitement de gaz HR sud,
- **1980-2005** : Forage de puits additionnels,
- **2005** : Mise en service des unités de Boosting.

I-3- Hydrogéologie [3]

Il existe plusieurs complexes aquifères dans la séquence sédimentaire de la plate-forme saharienne. Les aquifères les plus importants se composent de séquences de calcaire et de grés du Mésozoïque.

Il existe d'autres couches aquifères dans des formations plus profondes mais elles sont moins importantes en raison de leurs faibles volumes de stockage (couches isolées et peu épaisse de grés ou de calcaires fracturés) ou de la médiocre qualité de l'eau (particulièrement au voisinage des dépôts d'évaporite). Plusieurs unités perméables contiendraient des eaux saumâtres, il s'agit pour la plupart d'eaux contenant du chlorure de sodium et du chlorure de calcium.

Au niveau du site Hassi R'mel, deux Aquifères sont exploités par SONATRACH : l'aquifère Turonien et l'aquifère Barrémien.

I-4-Climat [3]

Le climat est caractérisé par une faible pluviométrie, une humidité relative moyenne de 19% en été et de 34% en hiver, les températures varient généralement de -5°C en hiver à +45°C en été.

I-5- Zones industrielles [3]

Le champ de Hassi R'mel est réparti en 03 zones : Nord, Sud, et Centre. Cette dernière représente le chef lieu de la commune et de la daïra de Hassi R'mel. Les zones sont constituées de modules (centres de traitement de gaz), des stations de compression, des centres de traitement d'huile, d'unités de déshuilage des rejets industriels et d'une station d'épuration des eaux usées domestiques.

II- Présentation de la station d'épuration des eaux usées urbaines de Hassi R'mel

Dans le cadre de la mise en application de sa politique, la société nationale de transport et de commercialisation des hydrocarbures (SONATRACH) à travers la direction régionale de Hassi R'mel, a mis en œuvre un programme ambitieux visant à éliminer ou à réduire au maximum les nuisances causées par ses activités et services. Pour ce faire, une station d'épuration des eaux usées urbaines a été réalisée.

Cette station a été mise en service en 2001, conçue pour 15000 équivalant habitants et visant les objectifs suivants :

- Eviter la prolifération des maladies à transmission hydrique,
- Protéger les milieux récepteurs,
- Se conformer à la législation et réglementation en matière de protection de l'environnement,
- Valoriser les eaux épurées.

II-1- Données de base de la station d'épuration de Hassi R'mel [3]

La conception d'une station d'épuration d'eaux usées urbaines est fixée selon un calcul technique et économique comparatif en tenant compte de tous les aspects : ouvrages, appareils, installations, coûts économiques et procédés; ce dernier est choisi en relation avec le degré d'épuration voulu. Les données de base pour la conception de cette station d'épuration sont:

➤ **Nombre d'habitant**

Il est utilisé pour établir une relation d'équivalence entre les différentes sources de pollutions et le nombre d'habitant. Il est exprimé en équivalent habitant (Eqha).

L'équivalent habitant est défini comme étant la pollution générée par habitant et par jour [4]. Le nombre équivalent habitants est de 15.000

➤ **Consommation en eau potable**

C'est la quantité d'eau conventionnelle consommée, exprimée en mètre cube par jour, elle est estimée de 3750 m³/j.

➤ **Coefficient de rejet**

C'est le rapport de la consommation d'eau potable par rapport au débit moyen journalier fourni. Il est exprimé en pourcentage (%) et est estimé à 80%.

➤ **Débit moyen (journalier ou horaire) d'eaux usées**

C'est la quantité d'eaux usées produite en moyenne qui s'écoule en un point, exprimée en mètre cube en un temps donnée : elle est estimée à 125 m³/h, ou sur 24 heures (débit moyen journalier) à 3000 m³/j.

➤ **Pollution journalière en (DBO₅ ou MES)**

Elle est définie par la relation qui suit: $C_x = DBO_5 \times Q$ Ou, $C_y = MES \times Q$

Avec C_x : charge de pollution exprimée en Kilogramme de DBO₅ par jour et qui est de l'ordre 810 kg DBO₅/j au niveau de la station d'épuration de Hassi R'mel.

Ou encore C_y : charge de pollution exprimée en Kilogramme de MES par jour et qui est de 1,05kg/j.

Q : Débit moyen journalier des eaux usées est de 3000m³.

➤ **Concentration en DBO₅**

C'est la teneur en charge polluante déterminée par la demande biologique en oxygène pendant cinq jours exprimée en milligramme par litre, elle est estimée à 270 mg.L⁻¹

➤ **Concentration en MES**

C'est la teneur en charge polluante des matières en suspension exprimée en milligramme par litre, elle est estimée à 350 mg.L⁻¹

➤ **Charge massique**

C'est le rapport de la pollution apportée par unité de masse de boue. Elle est estimée à 0,1 kg DBO₅/kgMVS/J.

➤ **Charge volumique**

C'est le rapport de la pollution entrante par unité de volume du bassin, elle est de 0,351kg/DBO₅/m³/J.

II-2- Procédé de traitement de la station de Hassi R'mel

Le but du traitement est d'obtenir un effluent épuré pour lequel la pollution est limitée à un degré, tel que le rejet ne crée aucune nuisance à la faune ni à la flore du milieu récepteur [5].

La station d'épuration de Hassi R'mel, qui traite les eaux usées domestiques urbaines de la région centrale, est une station à traitement par boues activées à faible charge et aération prolongée. Ce n'est autre que la reproduction du phénomène d'autoépuration naturel des cours d'eau à l'échelle d'un bassin, qui consiste en la dégradation des charges organiques polluantes sous l'action des micro-organismes et qui exige une quantité d'oxygène, appelée DBO_5 et que l'on exprime en $mg\ d'O_2.L^{-1}$.

Les procédés par boues activées comportent essentiellement une phase de mise en contact de l'eau avec le floc bactérien en présence d' O_2 (aération), suivie par une phase de séparation de ce floc. Les eaux usées contiennent généralement une population microbienne naturelle variée.

II-3- Les étapes de traitement [3]

II-3-1- Prétraitement

On entend par (prétraitement physique) une série d'opérations qui ont pour but d'éliminer la fraction la plus grossière des particules entraînées et de retirer de l'effluent les matières susceptibles de gêner les traitements ultérieurs.

a) Arrivée des eaux brutes

Les eaux brutes sont expédiées à partir de deux stations de relevage principale (Hay-Ezouhour et OPGI), acheminées vers la STEP par deux collecteurs principaux et relevées à l'entrée de la station.

b) Dégrillage

De la station de relevage, les eaux brutes sont refoulées vers le dégrillage qui permet l'élimination des corps solides volumineux perturbant les traitements ultérieurs. Ce procédé est réalisé dans un canal de 5 m de largeur et comporte deux étapes :

- Dégrillage grossier (à nettoyage manuel) : assuré par une grille dont l'espacement entre deux barreaux est de 05cm.
- Dégrillage fin (à nettoyage automatique) : assuré par une grille automatique rotative de 1,5 mm de passage avec une capacité hydraulique de $430\ m^3.h^{-1}$, et actionnée par un moteur de 0,55 KW.

Les refus des grilles sont évacués manuellement et mis en décharge.

c) Dessablage-Déshuilage

Il est toujours à craindre une présence importante de sable, de matières minérales en suspension et d'huile pouvant gêner, voir freiner le fonctionnement de l'installation.

Cette phase de prétraitement est réalisée dans un canal ayant une configuration rectangulaire avec une hauteur de 3,61m, et un volume de 45,8 m³; la vitesse d'écoulement est maintenue à environ 0,3 m/s.

L'eau est aérée par insufflation permettant d'une part la séparation aisée du sable de l'eau qui se dépose au fond puis relevé jusqu'à la trémie et enfin vers les lits de séchage et d'autre part, favorisant l'accumulation des graisses et des huiles en surface, qui sont récupérées dans une zone de tranquillisation et sont déversées dans un puisard à graisses pour être acheminées par pompe aux lits de séchage.

II-3-2- Traitement biologique

Un grand nombre de micro-organismes est capable de métaboliser la matière organique et par conséquent, favoriser l'épuration des eaux usées chargées en matières organiques biodégradables.

On peut classer les micro-organismes en aérobies, facultatifs et anaérobies. La majorité des micro-organismes présents dans l'épuration biologique sont de types facultatifs (métabolisme aérobie en présence d'oxygène et anaérobie en absence d'oxygène).

Le traitement biologique permet la réduction de la pollution par l'action d'une masse bactérienne, il est réalisé dans un ensemble complet qui comprend :

- Le bassin d'aération,
- Le bassin de clarification,
- Le poste de recirculation.

a) Bassin d'aération

Les eaux prétraitées sont évacuées gravitairement vers la station de pompage des eaux usées ou elles seront relevées dans le bassin d'aération.

Le bassin d'aération est de forme circulaire de 28 m de diamètre, sa surface est de 615,44 m², la hauteur d'eau prévue est de 3,6 m, il est équipé de trois aérateurs de surface,

"turbine" à axe vertical reposant sur une passerelle métallique. Un oxymètre, « sonde à oxygène », permet de mesurer en continu la teneur en oxygène du mélange eaux usées-boues et donc la régulation de la vitesse des aérateurs. La concentration d'oxygène dans le bassin varie de 1 à 5 mg.L⁻¹, selon la saison.

L'élimination de la pollution est assurée au niveau de la station d'épuration des eaux polluées (STEP) dans ce bassin grâce au maintien d'une concentration élevée de micro-organismes et d'une aération prolongée au moyen des trois aérateurs à deux vitesses, assurant ainsi une teneur satisfaisante en oxygène pour les bactéries. La puissance d'un aérateur est de 35 kW et la performance des aérateurs est de 92%.

L'aérateur a pour rôle de fournir l'oxygène aux bactéries et de provoquer une intense turbulence qui permet d'une part le maintien en suspension des boues activées et d'autre part de renforcer le contact intime de l'eau brute et des bactéries.

b) Bassin de clarification

Les performances de l'épuration biologique résultent de l'action de l'aération et de la clarification qui sur le plan technique, forme une seule unité. L'ouvrage de décantation secondaire est de forme circulaire de 20,5 m de diamètre, sa surface est de 330 m² et son volume de 977 m³, la hauteur d'eau prévue est de 2,96 m.

La liqueur mixte maintenue en suspension dans le bassin d'aération passe dans un bassin de clarification pour y être clarifiée, l'alimentation se fait au moyen d'une conduite en siphon surmontée au centre du bassin, d'une jupe de réparation.

Le floc se sépare de l'eau interstitielle et se dépose sur le radier de l'ouvrage de clarification, tandis que l'eau clarifiée est évacuée par surverse dans une rigole périphérique.

c) Poste de recirculation et d'extraction des boues

Les boues reprises au centre du décanteur sont transférées par gravité vers le poste de recirculation et d'extraction des boues pour être recirculées ou dirigées vers le traitement des boues en fonction de la destination des boues produites.

❖ Boues de recirculation

L'efficacité des procédés de traitements biologiques par boues activées est basée sur une recirculation importante des boues provenant de la décantation secondaire, la

concentration nécessaire en boue activée dans le bassin d'aération est assurée par deux groupes d'électropompes d'un débit de 125 m³/h.

Le recyclage des boues permet de maintenir une concentration en micro-organismes nécessaire pour assurer le niveau d'épuration biologique, d'une part et d'autre part d'éviter le colmatage des boues au niveau du bassin de décantation.

❖ **Boues en excès**

Les boues en excès sont extraites du poste de pompage avec une teneur moyenne en matière sèche de 8 g/l par une pompe d'un débit de 125 m³/h, Un volume journalier de 96 m³/j.Elles sont évacuées vers la filière de traitement des boues.

II-3-3- Désinfection des eaux

L'utilisation ultérieure de l'effluent épuré nécessite une épuration plus poussée pour l'élimination des germes pathogènes et des mauvaises odeurs.

L'eau décantée est introduite dans un bassin de stérilisation où s'opère une désinfection par injection de l'hypochlorite de sodium à 47°, provenant d'une unité de chloration qui est constituée par un groupe de dosage comprenant deux pompes doseuses et des cuves de stockage placées dans un local séparé . La concentration en désinfectant est de 1,2 mg/l.

II-3-4- Filière de traitement des boues

Le traitement des boues permet de transformer la boue en un produit apte à être transporté ou séché sans nuisance pour l'environnement.

L'opération de traitement des boues au niveau de la STEP sert à réduire le volume des matières à manipuler en enlevant une partie de l'eau, à cet effet les étapes de la filière de traitement des boues sont comme suit :

a) Epaissement

C'est le premier stade, et le plus simple qui consiste à réduire le volume des boues sans dépense d'énergie notable.

L'épaississeur est destiné à concentrer les boues avant leur refoulement vers les lits de séchage [6].

La suspension boueuse est introduite dans un épaisseur équipé de racleur. Le temps de séjour est de 23 heures, de façon à provoquer le tassement des boues. Leur évacuation

se fait gravitairement par le fond vers les lits de séchage tandis que le liquide interstitiel est évacué par le haut d'où il retourne vers la station de pompage des eaux usées.

L'ouvrage se présente sous forme d'un cylindre à fond conique et à faible pente, de 5,5 m de diamètre, et d'une hauteur de 3,80 m, sa surface est de 32,75 m² et son volume de 91,7 m³.

b) Séchage naturel

Les boues épaissies (de concentration moyenne de 30 g.L⁻¹) sont extraites de l'épaississeur et évacuées vers les lits de séchage où elles seront épandues pour y être déshydratées naturellement, il existe 8 lits de séchage de surface unitaire de 160 m².

- Production annuelle des boues : 936 m³/An.
- Hauteur du lit de boues : 0,4 m
- Durée de séchage des boues : 20 jours.
- Nombre de rotation annuelle des lits de séchage : 18

La commande de la station d'épuration peut se faire à distance à partir de la salle de contrôle, équipé d'un PC muni d'un logiciel de commande à distance avec des paramètres de surveillance et de contrôle, ainsi que des schémas du procédé pour la bonne exploitation de la station d'épuration.

II-4- Particularité de la station d'épuration de Hassi R'mel

A l'instar des autres stations d'épuration existantes en Algérie et utilisant un procédé de traitement biologique par boues activées à faible charge, la station de Hassi R'mel, respecte les normes préconisées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Elle se distingue des autres stations à travers ses installations et ouvrages (modernisés), méthodes d'analyse ainsi que l'automatisation du procédé.

En effet, cette dernière est dotée d'un système de gestion (maintenance et exploitation) assisté par ordinateur, moyennant un automate programmable et un logiciel informatique. La figure N°2 représente schématiquement la station d'épuration des eaux usées de Hassi R'mel.

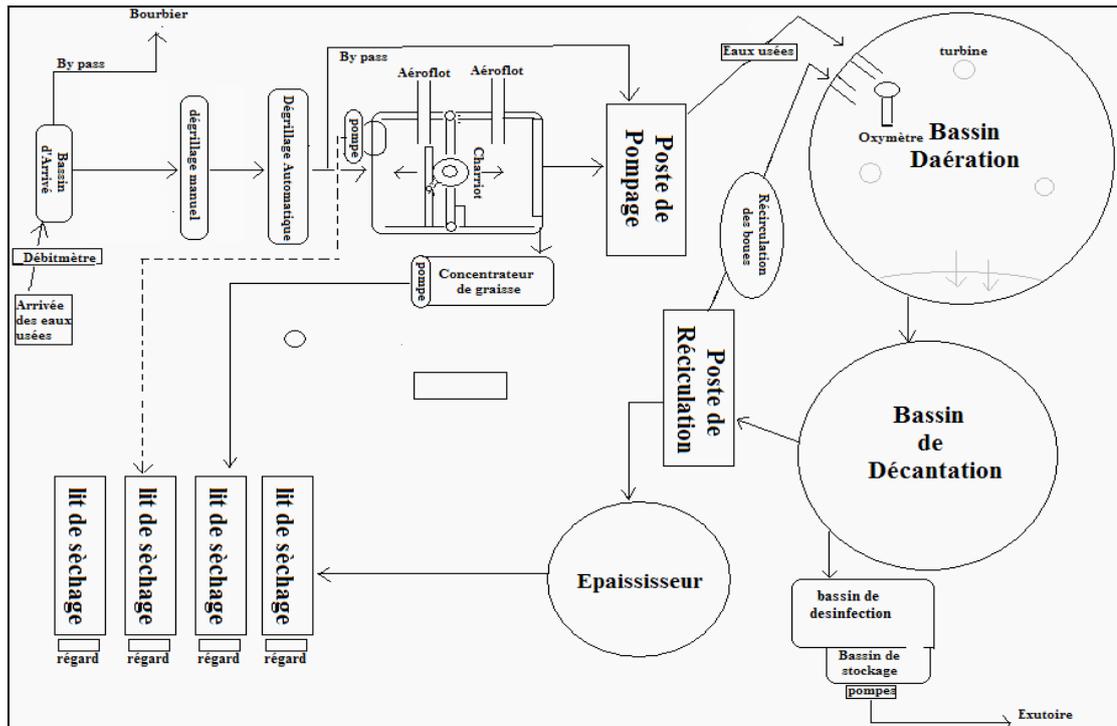


Figure 02 : représentation schématique de la station d'épuration des eaux usées de Hassi R'mel [3]

II-5- Paramètres de mesures

Pour une appréciation de la composition des eaux usées, les critères de pollution suivant ont été mesurés : la température de l'eau, le pH, la conductivité électrique, les matières en suspension (MES), la demande biologique en oxygène (DBO), la demande chimique en oxygène (DCO), l'azote, le phosphore et autres critères tels que les germes et les virus, la teneur en graisse, détergents et métaux lourds qui peuvent représenter une nuisance potentielle [7].

II-5-1- Paramètres physico-chimiques

a) Température :

C'est un paramètre souvent négligé dans les collecteurs urbains, mais qui devrait être plus souvent mesuré surtout dans le cas de rejets industriels. Le fonctionnement de certains ouvrages d'épuration est très sensible à la température, ainsi tout rejet doit être inférieur à 30°C [4].

b) PH :

C'est un paramètre qui permet d'exprimer le degré d'acidité des eaux usées, sa mesure est très importante pour juger du bon fonctionnement d'une étape de traitement.

c) Conductivité :

Elle donne une indication précise sur la concentration totale en sels dissous. Par comparaison avec la conductivité de l'eau potable, il est ainsi possible de juger rapidement si des apports importants, en particulier industriels, ont lieu dans le réseau d'assainissement [4].

d) Turbidité : C'est la propriété d'une eau d'être d'aspect trouble, sa mesure donne une indication sur la teneur en matières solides en suspension.

e) Les Matières en suspension (MES) : Elles représentent les matières qui ne sont ni à l'état soluble ni à l'état colloïdal, donc retenues par un filtre. Les MES, qui comportent des matières organiques et minérales, constituent un paramètre important qui marque bien le degré de pollution d'un effluent urbain ou même industriel.

f) Les Matières volatiles en suspension (MVS) : Elles représentent la fraction organique des matières en suspension, elles sont mesurées par calcination à 620 °C d'un échantillon, dont on connaît déjà la teneur en MES, elles constituent environ 70%-80% des MES [8].

g) Les matières minérales (MM) : Elles représentent le résultat d'une évaporation totale de l'eau, c'est à dire son "extrait sec», constitué à la fois par les matières minérales en suspension et les matières solubles (chlorures, phosphates, etc.)

h) La demande chimique en oxygène (DCO) :

C'est la quantité d'oxygène consommée par les matières existantes dans l'eau dans des conditions opératoires définies [9].

i) La demande biologique en oxygène (DBO) : Elle représente la quantité d'oxygène dépensée par les phénomènes d'oxydation chimique, d'une part, et d'autre part la dégradation des matières organiques par voie aérobie, nécessaire à la destruction des composés organiques. En effet, dans un effluent complexe, ces deux types d'oxydation se superposent, d'où le nom de "biochimique". Notons que dans les

eaux usées domestiques, ce sont les phénomènes biologiques qui prédominent. La mesure de la DBO reste le paramètre le plus utilisé dans le domaine de l'eau.

Le rapport entre DCO/DBO₅ renseigne sur la qualité de la biodégradation, un rapport DCO/DBO₅ inférieur à 2,5 indique une bonne biodégradabilité.

II-5-2- Les paramètres chimiques (indicateurs de pollution)

a) Azote : L'azote est mesuré sous différentes formes. Les types d'analyses dépendent des formes chimiques recherchées. On peut les diviser en deux grandes familles (pour ce qui concerne l'épuration) : l'azote réduit et l'azote oxydé.

Le premier correspond à l'azote organique que l'on trouve dans les eaux usées provenant notamment des déchets métaboliques (protéines, urée) d'origine humaine.

L'azote oxydé se retrouve de façon marginale dans les eaux usées, il s'agit des nitrites (NO₂⁻) et des nitrates (NO₃⁻), produits de la transformation chimique (oxydation) de l'azote réduit.

b) Phosphore :

peut se trouver sous formes minérale ou organique. Ces différents composés se trouvent soit à l'état dissous dans la phase liquide, soit fixé sur les matières en suspension et colloïdales [10].

Dans les eaux résiduaires urbaines le phosphore provient du métabolisme et des détergents, mais cette dernière origine tend à diminuer par la réduction des composés phosphorés dans les lessives [11].

II-5-3- Les paramètres biologiques

Dans la boue activée on trouve essentiellement de bactéries, de protozoaires, parfois de champignons, de rotifères et de nématodes.

a) Bactéries :

Constituent le groupement le plus important responsable principal de l'élimination de la pollution d'une part, et de la formation des flocons d'autre part.

De très nombreuses espèces de bactéries peuvent participer à la formation des boues activées. La nature des composés organiques qui constituent la pollution influent sur la nature du genre dominant ainsi que les conditions du milieu : pH, T°C, O₂ dissous, etc....

b) **Protozoaires** : Ce sont des métazoaires microscopiques très rencontrés dans le plancton des eaux douces.

c) **Nématodes** Ce sont des vers filiformes non segmentés, recouvert d'une couche chitineuse transparente

III- Origine, traitement et valorisation de la boue

III.1 origine

Les boues des stations d'épuration sont des produits résiduaire qui résultent du traitement des eaux usées dans les stations d'épuration. Les effluents urbains, comprenant les eaux résiduaire urbaine d'origine domestique et éventuellement industrielle et les eaux pluviales, subissent un traitement de dépollution avant leur rejet dans le milieu naturel. L'épuration consiste essentiellement à éliminer les pollutions organique et minérale des effluents et ce par le biais de divers prétraitements et traitements.

Au cours des ces prétraitements et traitement des boues sont produites. Elles sont classées en quatre grandes catégories qui diffèrent par une grande hétérogénéité de nature et de composition.

III.1.1 Les boues primaires

Elles sont obtenues au niveau du décanteur primaire, après séparation physique des matières en suspension par décantation. De nature fortement organique, les boues primaires sont très fermentescibles et présentent de forts risques de nuisances olfactives [12].

III.1.2 Les boues secondaire

Elles sont issues du traitement secondaire. Elles sont essentiellement composées par la biomasse présente en excès dans le système et par la matière réfractaire à l'épuration biologique. Elles sont récupérées après le décanteur secondaire (clarificateur), au niveau de la purge. Ce sont des boues fraîches, essentiellement constituées de bactéries. Leur pouvoir fermentescible dépend du temps de séjour dans le bassin d'aération (aussi appelé âge des boues) [13].

III.1.3 Les boues mixtes

Le mélange de boues primaires et secondaires conduit à l'obtention des boues mixtes. Leur composition est dépendante de la quantité de boues primaires et secondaires produites. Très fermentescibles, ces boues subissent ensuite le traitement de stabilisation.

III.2 Caractéristiques des boues

Les différents procédés de traitement des effluents produisent différentes quantités et qualités de boues. Dans une station d'épuration, les caractéristiques changent pendant l'année ou même pendant une journée à cause des variations de la composition de l'eau brute. Quelle que soit leur origine, les boues urbaine sont constituées de l'ensemble des

matières organiques et minérales qui s'accumulent au cours des étapes de traitement de l'eau et leur composition varie donc en fonction des effluents et des traitements effectués. Néanmoins, elles sont, en général, constituées de 95% d'eau et de 5% de matière sèche ce qui leur confère un pouvoir fermentescible très élevé. Le tableau 1, présente la composition des différents types de boues produites au cours du traitement des eaux usées. Les constituants les plus importants pour classer et déterminer la qualité des boues, leur traitement, et leur destination finale sont: la matière organique (matière volatile) ; les nutriments ;

Les microorganismes pathogènes ;les métaux ;les composés organiques sous forme de traces [12].

III.2.1 La matière organique

Elle est constituée de carbohydrates, de protéines et de graisses. La matière organique dans les boues s'exprime généralement par le pourcentage de matières sèches qui sont volatiles. La plupart des boues fraîches sont constituées de 75 à 85% de matière volatile. La matière volatile est importante puisqu'elle peut générer des odeurs désagréables. Elle peut être valorisée quand les boues sont utilisées comme fertilisant.

Tableau 01. Composition chimique typique des boues fraîches et digérées [12]

Caractéristiques	Boues primaires fraîches		Boues primaires digérées		Boues activées
	Intervalle	Valeur typique	Intervalle	Valeur typique	Intervalle
Matière Sèche (MS)%	2–8	5	6–12	10	0,83–1,16
Matière organique (%MS)	60–80	65	30–60	40	59–88
Graisses et huiles (%MS)	–	–	–	–	–
Solubles dans l'éther	6–30	–	5–20	18	–
Extrahibles à l'éther	7–35	–	–	–	5–12
Protéines (%MS)	20–30	25	15–20	18	32–41
Azote (N,%MS)	1,5–4	2,5	1,6–6	3	2,4–5
Phosphate (P ₂ O ₅ ,%MS)	0,8–2,8	1,6	1,5–4	2,5	2,8–11
Potasse (K ₂ O,%MS)	0–1	0,4	0–3	1	0,5–0,7
Cellulose (%MS)	8–15	10	8–15	10	–
Silicium (SiO ₂ ,%MS)	15–20	–	10–20	–	–
pH	5–8	6	6,5–7,5	7	6,5–8,0
Alcalinité (mg.L ⁻¹ éq CaCO ₃)	500–1500	600	2500–3500	3000	580–1100
Acides organiques (mg.L ⁻¹)	200–2000	500	100–600	200	1100–1700
Pouvoir calorifique (MJ/Kg)	23000–29000	25500	9000–13500	11500	18500–23000

III.2.2 Les nutriments

Les boues urbaines contiennent trois nutriments essentiels pour la croissance des plantes: l'azote, le phosphore et le potassium. Les concentrations typiques dans les boues sont plus faibles que celles d'un fertilisant commercial. Un nutriment peut être présent dans les boues sous des formes chimiques différentes. L'azote est sous formes organique, ammoniacal ou de nitrates et le phosphore sous forme de phosphates ou d'orthophosphates.

III.2.3 Les microorganismes pathogènes

Les boues résiduaires contiennent une grande quantité de microorganismes (virus, bactéries et parasites). Ils sont éliminés de l'eau avec les boues qui décantent. Une partie de ces microorganismes se trouve sous forme pathogène donc dangereuse. La charge de ces microorganismes pathogènes peut être réduite significativement par les procédés de traitement des boues, comme la digestion anaérobie, aérobie et le compostage [12].

III.2.4 Les métaux lourds

La concentration en métaux lourds dans les boues dépend du type d'eau résiduaire traitée. Le cadmium, chrome, cuivre, plomb, nickel, mercure, argent et zinc peuvent être présents. Le Tableau 02 présente la concentration des métaux dans les boues.

Tableau 02. Valeurs de la teneur en métaux lourds des boues résiduaires [12]

Boues sèches mg.Kg⁻¹		
Métaux	Intervalle	Moyenne
Arsenic	1,1–230	10
Cadmium	1–35	10
Chrome	10–99000	500
Cobalt	1,3–2490	30
Cuivre	84–17000	800
Fer	1000–154000	17000
Plomb	13–26000	500
Manganèse	32–9870	260
Mercure	0,6–56	6
Molybdène	0,1–214	4
Nickel	2–5300	80
Sélénium	1,7–17,2	5
Zinc	101–49000	1700

III.2.5 Les composés organiques sous forme de traces

Il s'agit de composés organiques généralement présents en faible quantité dans les déchets, de l'ordre du $\mu\text{g/L}$. Il peut toutefois s'agir de composés à risque pour l'environnement et/ou inhibiteurs de l'activité bactérienne lors de la fermentation. De manière générale, les composés organiques sous forme de traces ne sont pas solubles dans l'eau. Ils ont une grande affinité pour les matières organiques des boues et des sols et sont peu biodégradables. Ces substances lipophiles peu dégradables prennent de l'ampleur avec l'augmentation du poids moléculaire. Les composés sont ainsi concentrés au niveau des boues d'épuration et pourront s'accumuler progressivement au niveau du sol.

III.3 Le traitement des boues

La quasi-totalité des procédés d'épuration appliqués aux eaux usées domestiques, qu'ils soient biologiques ou physico-chimiques, conduisent à la concentration des polluants sous la forme de suspensions aqueuses ou de boues représentant des déchets volumineux. Il s'avère de plus en plus difficile de trouver une solution au problème des boues. Ces derniers représentent une phase difficile et très délicate en raison de la raréfaction des terrains ou cavités disponibles pour l'épandage ou le dépôt des boues, les nécessités et exigences de l'environnement et de l'hygiène publique, et l'importance économique compte tenu aussi bien des coûts d'investissement que d'exploitation d'une installation de traitement de boues.

Les objectifs principaux d'une filière boue sont la réduction des volumes et des nuisances. En effet, telles qu'elles ont été évacuées de la filière eau, les boues sont constituées à 99% d'eau, ce qui engendre des volumes de stockage conséquents. De plus, elles sont très fermentescibles donc dégagent rapidement des odeurs désagréables, en partie, responsables du refus psychologique de les utiliser en agriculture.

Les procédés de traitement des boues peuvent varier suivant leurs natures et la taille de la station d'épuration. Trois grands types de traitement sont à distinguer:

- Des traitements de réduction de la teneur en eau des boues (l'épaississement, déshydratation, séchage), visant à diminuer le volume de boues à stocker ou à épandre et/ou à améliorer leurs caractéristiques physiques (tenue en tas notamment) ;
- Des traitements de stabilisation, dont l'objectif est de réduire le pouvoir fermentescible des boues afin de limiter ou d'annuler les nuisances olfactives ;

- Des traitements de stérilisation qui visent à éliminer la charge en micro-organismes pathogènes.

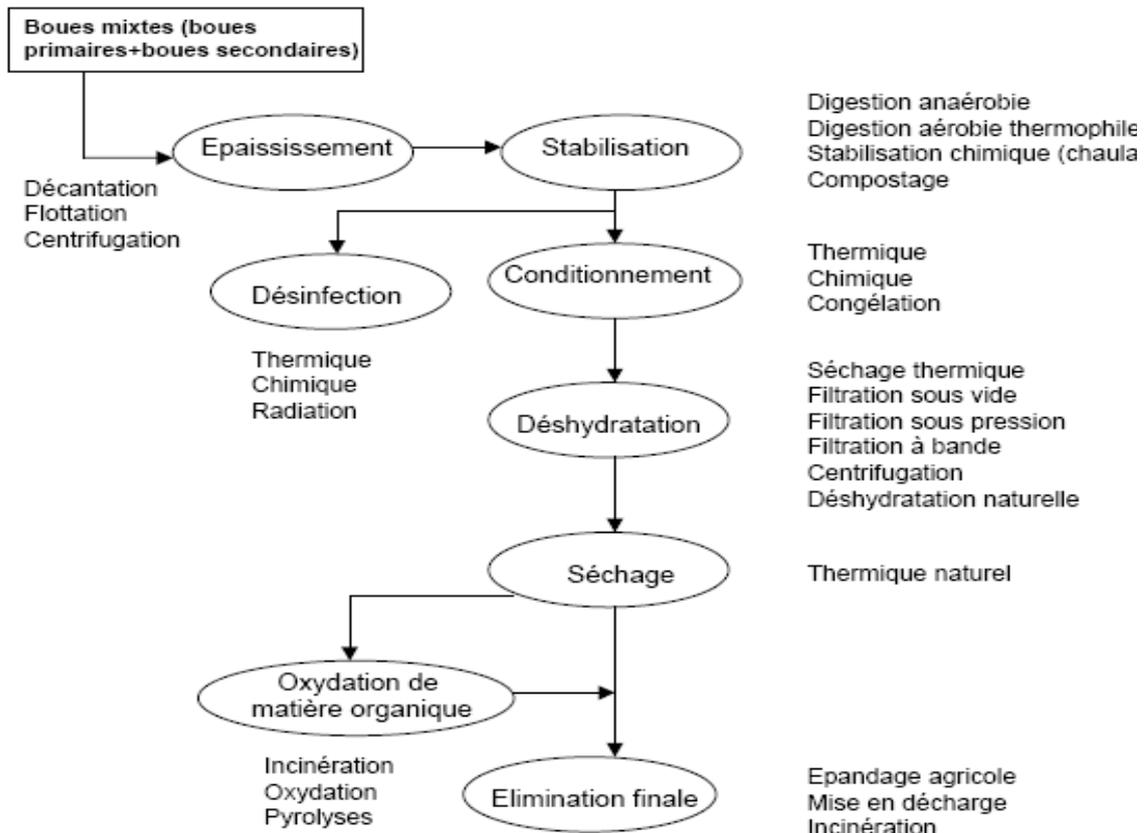


Figure 03. Options et classification des procédés pour le traitement des boues.

III.3.1 Réduction de la teneur en eau des boues

Pour réduire le volume des boues, différents procédés sont mis en œuvre, comprenant par ordre croissant d'efficacité et de coût, l'épaississement, la déshydratation et le séchage.

III.3.1.1 l'épaississement

C'est la première étape du traitement. A l'entrée de la filière, la boue étant extrêmement liquide, pour réduire les volumes à traiter, on élimine l'eau libre. L'épaississement peut être statique, gravitaire ou dynamique par flottation, selon le type de boue à traiter. Ainsi, pour une boue activée, on préfère l'épaississement dynamique par flottation car les particules en suspension sont de gros diamètre et de faible densité.

Par contre, pour les boues primaires, l'épaississement gravitaire permet de concentrer la boue de deux à huit fois, en l'amenant de quelques grammes par litre à quelques dizaines de grammes par litre. IL existe une troisième méthode, plus performante, mais qui nécessite l'emploi de polymères. C'est l'épaississement dynamique sur table d'égouttage: la boue est floculée avec le polymère, puis circule sur une toile filtrante où l'eau est éliminée.



Figure 04. Epaisseur [14].

III.3.1.2 la déshydratation

La déshydratation est la deuxième étape de la réduction de volume des boues. Elle conduit à l'élimination d'environ 40-50% de la phase liquide. Elle est réalisée:

- par centrifugation,
- par filtration (filtre à plateaux, sacs filtrants, tamis d'égouttage),
- par séchage (lits de séchage naturel, séchoirs thermiques directs ou indirects) [13].



Figure 05. Déshydratation mécanique [13]

III.3.1.3 le séchage

Le séchage élimine l'eau en grande partie ou en totalité par évaporation, soit par voie naturelle (lits de séchage), soit par voie thermique. La technique des lits de séchage se réalise à l'air libre sur des boues liquides et combine évaporation naturelle et drainage de l'eau libre à travers une couche filtrante de sable et de graviers. Le séchage thermique permet une élimination de la quasi-totalité de l'eau (siccité d'environ 95%) [13].

III.3.2 Stabilisation des boues

Cette étape permet de réduire le pouvoir fermentescible des boues, ainsi que les nuisances olfactives. Il existe trois grands types de stabilisation: la stabilisation biologique (digestion aérobie ou anaérobie, compostage), la stabilisation chimique (chaulage) et la stabilisation physique (séchage poussé). Les procédés biologiques permettent de dégrader les matières organiques, et conduisent à une réduction de la matière. En revanche, les procédés chimiques et physiques bloquent l'action des microorganismes par inhibition de leur métabolisme, la quantité de matière reste la même ou augmente suite à l'ajout de produits chimiques (ajout de chaux, par exemple). Certains de ces traitements permettent aussi de réduire les risques sanitaires.

III.3.2.1 la stabilisation biologique aérobie

Tous les procédés biologiques sont basés sur les activités métaboliques naturelles des organismes impliqués. Lorsqu'un substrat métabolisable est disponible dans le milieu, (substrat exogène), les cellules l'utilisent comme source de matière organique pour leurs activités cataboliques et anaboliques. C'est ce processus qui prédomine dans les procédés où le milieu à traiter est riche en matière organique, comme par exemple les processus de boues activées ou de digestion aérobie.

Le principe de la stabilisation aérobie est identique à celui évoqué pour les boues activées, exception faite du temps de séjour des solides biologiques qui est plus long. C'est une transformation de la matière organique par oxydation en milieu aérobie, avec dégagement de chaleur et production de dioxyde de carbone.

III.3.2.2 la stabilisation biologique anaérobie

La stabilisation anaérobie des boues permet de fermenter une partie des matières organiques en dioxyde de carbone et méthane, avec une production relativement faible de biomasse cellulaire. Le processus implique plusieurs populations microbiennes distinctes qui sont continuellement en interactions, et dont la majorité ne produit pas directement du méthane. Le processus microbiologique de la digestion peut se séparer en quatre étapes, qui regroupent les principales réactions anaérobiques.

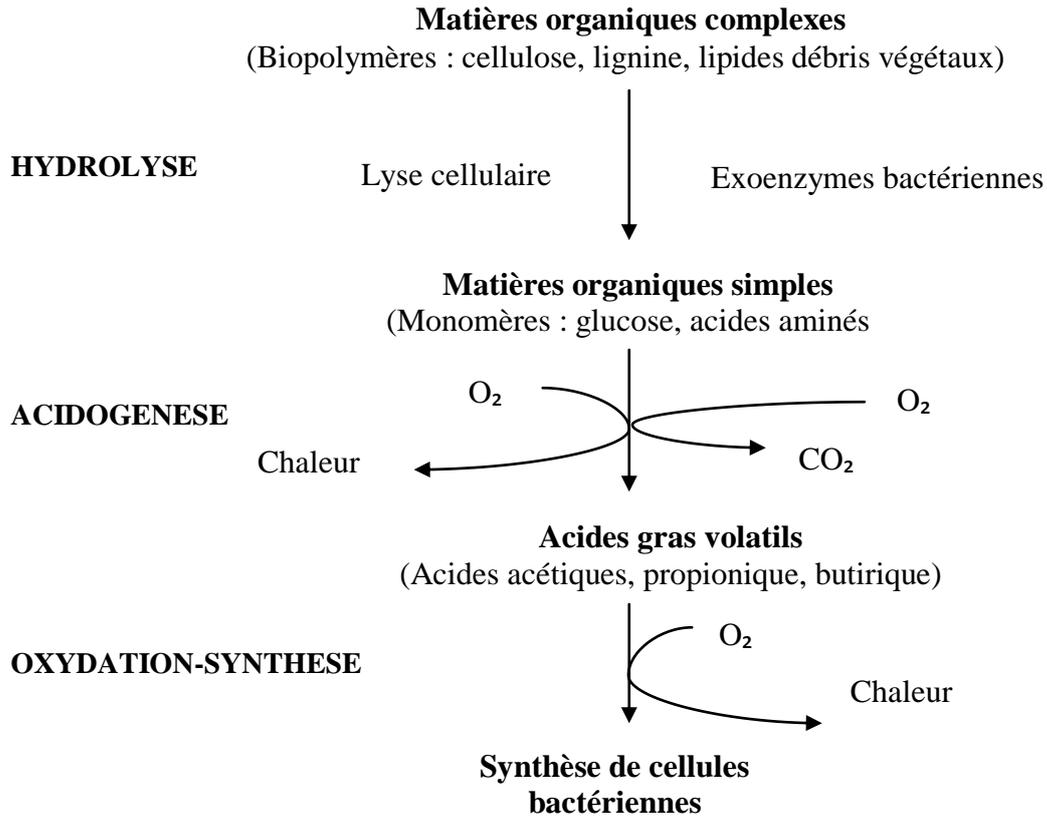


Figure 06. Etapes de la digestion aérobie [15]

III.3.2.3 le compostage

Le compostage est un traitement biologique des boues ou des déchets organiques. C'est un processus de dégradation de la matière organique en présence d'oxygène. Ce procédé aérobie contrôlé, conduit à l'obtention d'une stabilisée, hygiénique et riche en humus. Des dizaines d'espèces de micro-organismes et de macro organismes se développent par millions sur les déchets organiques et se nourrissent de sucres, de protéines, de cellulose et d'autres constituants des matières organiques [16, 17]. Il permet d'atteindre les objectifs suivants :

- Stabilisation du déchet pour réduire les pollutions ou nuisances associées à son évolution biologique ;
- Réduction de la masse de déchets ;
- Production d'un compost valorisable comme amendement organique pour les sols.

III.3.2.4 la stabilisation chimique (le chaulage)

Cette technique ne modifie donc pas la quantité de la matière organique biodégradable contenue dans la boue; une reprise de la fermentation est possible si l'évolution ultérieure des conditions du milieu le permet. La chaux, du fait de son coût réduit, de son alcalinité et de son effet favorable à un renforcement de la structure physique de la boue, est le réactif le plus utilisé [18].

III.3.2.5 la stabilisation physique (séchage poussé)

Le séchage est une opération du traitement des boues consistant à évaporer l'eau libre et liée. En effet, le coût énergétique du séchage ramené à la tonne d'eau évaporée est plusieurs centaines de fois supérieure à celui de la déshydratation mécanique, de telle sorte qu'il est économiquement aberrant de sécher des boues non déshydratées.

III.3.3 Le traitement de stérilisation

Elle n'est pas, à proprement parler, un procédé de stabilisation. Elle a pour but d'obtenir une désinfection de la boue. L'inactivation totale des agents pathogènes peut être recherchée, par exemple, dans le cas d'épandage des boues sur des pâturages en exploitation. Un critère de l'hygiénisation est l'absence d'entérobactéries sur un échantillon de 10 grammes. Il est sûrement atteint si toutes les particules de la suspension boueuse sont maintenues à 70 °C pendant 30 min [18]. Certains traitements déjà évoqués, détruisent les germes pathogènes contenus dans les boues : le chaulage en élevant le pH au dessus de 12. Le compostage peut détruire les germes pathogènes par les températures élevées (jusqu'à 70°C) atteintes lors du compostage et la sélection de microorganismes saprophytes.

III.4 Valorisation de la boue

Les boues des stations d'épuration sont des résidus issus de l'assainissement des eaux usées domestiques ou industrielles. L'épandage agricole est la principale voie de valorisation de ces déchets. Lorsque leurs recyclages s'avèrent impossible en agriculture vis-à-vis de la législation, les boues constituent un déchet humide difficile à gérer. La valorisation énergétique peut être une voie complémentaire ou alternative à la valorisation agricole.

III.4.1 La valorisation en agriculture des boues

L'épandage de la boue est la voie la plus répandue en agriculture. Elle existe depuis plus de 30 ans et offre la possibilité d'augmenter la fertilisation des sols.

Cette pratique courante ne concerne pas que les boues d'épuration, mais plusieurs centaines de millions de tonnes ou de mètres cubes de matières diverses. Ces matières entretiennent la fertilité des sols quand elles sont correctement appliquées, diminuant alors les besoins d'engrais commerciaux. En agriculture, les boues sont utilisées comme engrais, c'est-à-dire comme produit capable de fournir aux cultures des éléments nutritifs nécessaires à leur croissance et à leur développement. Compte tenu des multiples procédés épuratoires utilisés dans les différentes stations, les boues sont susceptibles de présenter une diversité de composition selon le type de traitement utilisé, le type d'effluent entrant ou encore la taille de la station.

III.4.2 La valorisation énergétique de la boue

La valorisation énergétique des boues des stations d'épuration se réalise selon cinq procédés:

III.4.2.1 la méthanisation

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.

Conduite dans des enceintes confinées appelées digesteurs, à l'intérieur desquels les réactions de fermentation sont optimisées et contrôlées, elle produit du biogaz composé essentiellement de méthane, tout en réduisant de moitié le taux de matières organiques. Le résidu de la digestion (ou digestat) est stable, désodorisé, débarrassé en grande partie des germes pathogènes [19].

III.4.2.2 l'incération

Ce traitement fait appel à des réactions de combustion qui mettent en œuvre des phénomènes d'oxydation. Les boues doivent être injectées dans une chambre maintenue à une température 1200 °C. Une combustion efficace nécessite un temps de séjour contrôlé, une température optimale et uniforme, ainsi qu'une turbulence élevée. Pour être incinérées, les boues doivent présenter une siccité minimale de 25 à 35% [20].

III.4.2.3 la thermolyse

La thermolyse consiste en un traitement thermique à température modérée (450 à 750 °C) en absence d'air dans un four ou un thermolyseur (figure 07) au cours duquel les matières organiques sont décomposées sans être brûlées :

- En un composant combustible solide (coke) qui, s'il est séparé des matières inertes et des métaux, est assimilable à du charbon de faible qualité. Il peut être ensuite lavé, refroidi et déchloré.

En une phase gazeuse. Cette phase gazeuse contient une fraction de non condensables (hydrogène (H₂), méthane (CH₄), oxydes de carbone (CO), hydrocarbures, etc.) et une fraction de condensables constituée essentiellement d'eau et d'huiles plus ou moins lourdes. Toutes les conditions sont réunies pour détruire les organochlorées et les dioxines éventuellement présents dans les déchets. Les matières minérales conservent leurs intégrités physique et chimique du fait des conditions de fonctionnement des fours (ni oxydation, ni formation de conglomerats) [21].

- **Le gaz de thermolyse** est caractérisé par un pouvoir calorifique inférieur (PCI) de l'ordre de 13 MJ/kg, soit environ 5.000 MJ par tonne de déchets entrant. Compte tenu de sa composition, ce gaz doit être brûlé sur place dans des conditions satisfaisantes en ce qui concerne les émissions.
- **Le solide de thermolyse** contient de 60 à 65% de cendres, le solide étant des matières minérales. Après lavage et déchloration éventuels, puis criblage, tamisage et séparation physique des verres et métaux, on obtient un "**combustible solide de thermolyse (CST)**" à 30 - 40 % de cendres. Ce CST s'apparente à un charbon de qualité médiocre (de 18 à 20 MJ/kg), avec un potentiel énergétique de l'ordre de 4.000 MJ par tonnes de déchets [22]. (Figure 08)

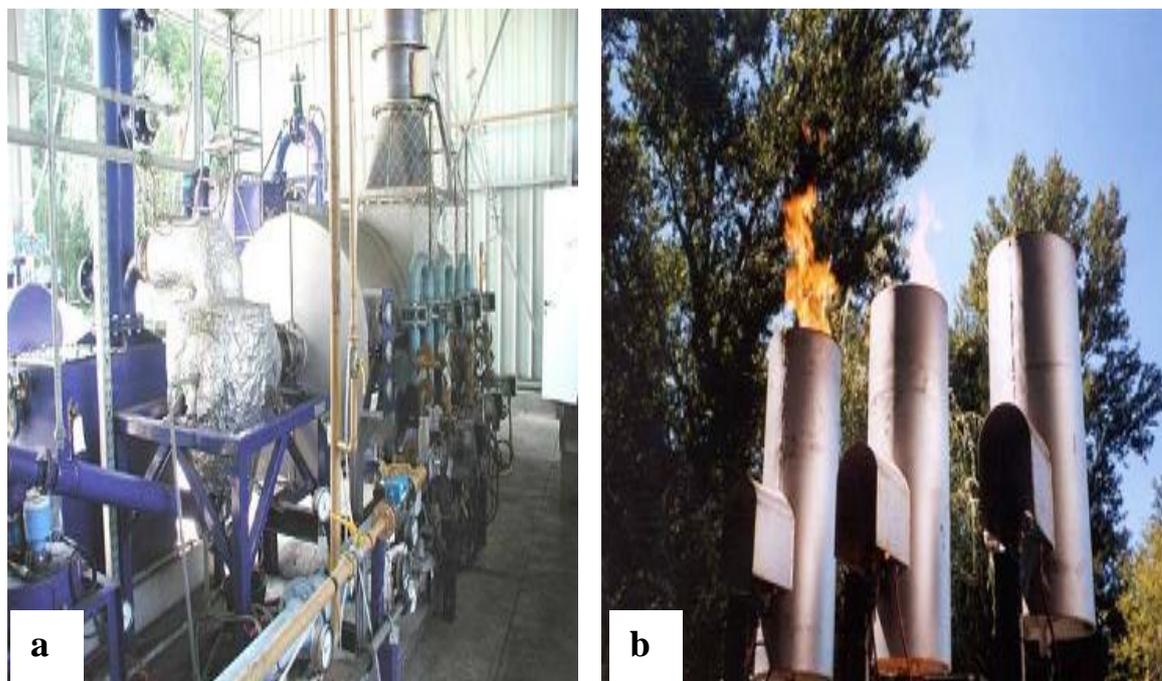


Figure 07. (a) Four de la thermolyse [21], (b) Combustion du gaz de la thermolyse [22].



Figure 08. Résidu solide de la thermolyse.[22]

III.4.2.4 la gazéification

La gazéification des boues résulte d'un processus thermo-chimique en deux étapes: une étape de thermolyse suivie d'une étape de gazéification. Ces deux étapes peuvent être réalisées dans la même enceinte thermique ou dans deux réacteurs séparés. L'étape de thermolyse, produit des matières volatiles sous forme d'hydrocarbures gazeux (goudrons) et du coke, essentiellement constituées de carbone fixe. Les hydrocarbures et le carbone fixe sont convertis en gaz combustible (CO , H_2), dans la seconde étape, dite de gazéification,

par réactions thermochimiques, en présence d'un agent gazeux de gazéification (air, O₂, H₂O).

Les procédés actuels de gazéification des boues visent essentiellement, non pas la production de gaz de synthèse, considérés comme matière première pour l'industrie chimique, mais la destruction thermique de ces déchets, avec valorisation du contenu énergétique des gaz combustibles produits [23].

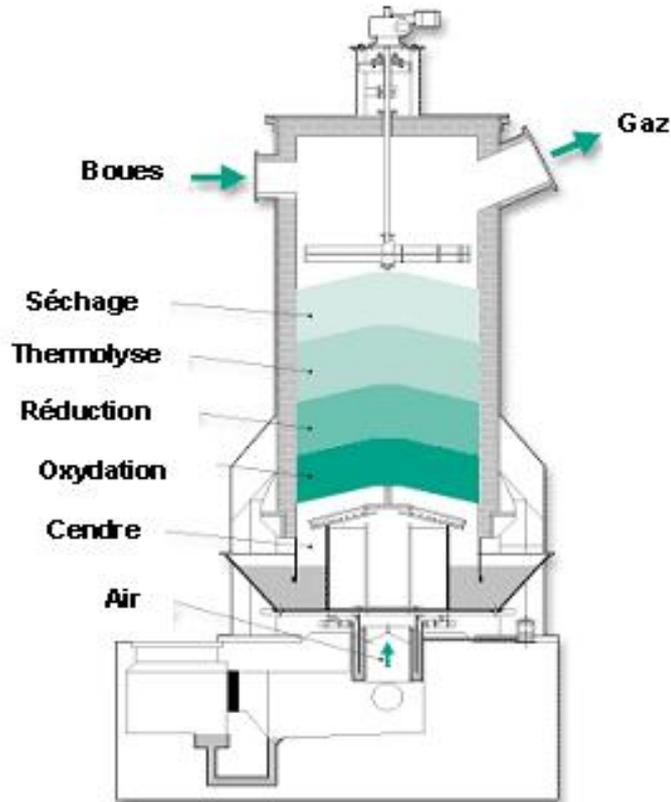


Figure 09. Schéma de l'enceinte de gazéification [23]

III.4.2.5 l'oxydation par voie humide (OVH)

L'OVH est un procédé technologique qui permet l'oxydation poussée des boues de station d'épuration jusqu'au stade ultime de destruction de la matière organique. Cette oxydation est réalisée en milieu aqueux à haute pression et haute température sans flamme et sans émission de fumée. Le produit final issu de ce procédé, totalement inerte, ne contient que la fraction minérale des boues, et son volume après déshydratation ne représente plus que 20 à 25% de la masse de boue initiale. Ce procédé est une alternative à l'incinération

conventionnelle des boues. Il ne produit pas de fumées et sa consommation énergétique est faible, compte tenu du caractère exothermique des réactions d'oxydation [22].

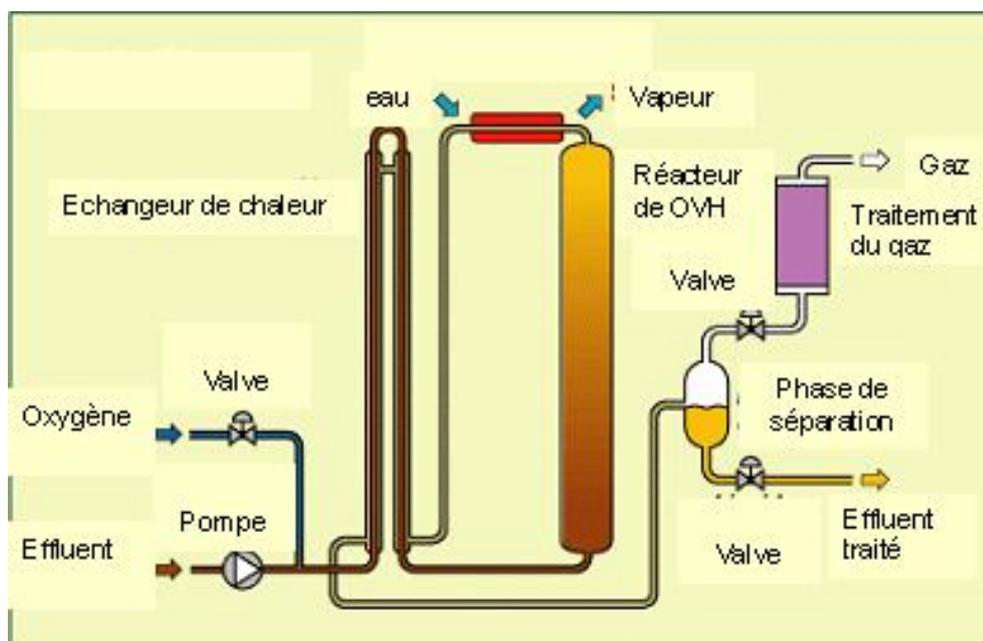


Figure 10. Schéma d'une unité d'oxydation par voie humide (OVH) [22]

IV- Biométhanisation « La digestion anaérobie »

IV.1 Définition de la biométhanisation [12]

La biométhanisation consiste en une série d'opérations de dégradations biologiques des matières organiques qui se produisent en l'absence d'oxygène (de façon anaérobie). Les produits résultants de la dégradation peuvent être classés en deux catégories, le biogaz et le digestat.

Le biogaz est un mélange gazeux composé essentiellement de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2), issu de la fermentation anaérobie de la matière organique contenue dans les déchets. Les proportions relatives de ces gaz dépendent de la nature du substrat fermenté et des conditions de fermentation. Le biogaz peut être produit spontanément, dans des conditions naturelles (marais, décharges d'ordures ménagères.....) ou bien dans des installations spécifiques appelées digesteurs. La digestion est une technique de dépollution et de conditionnement des déchets, qu'ils soient liquides ou solides.

- Les déchets solides :
 - ❖ Les déchets d'ordures ménagères : le biogaz est produit par méthanisation naturelle « passive » dans les décharges, ou par traitement dans un digesteur.
 - ❖ Les déchets organiques non ménagères : industries agro-alimentaires, restauration collective.....
 - ❖ Les déjections animales.
 - ❖ Les boues de station d'épuration, stabilisées puis conditionnées.

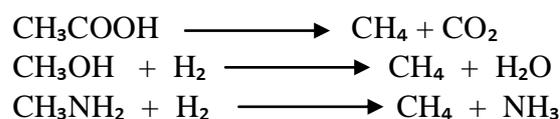
- Les déchets liquides :
 - ❖ Les effluents domestiques.
 - ❖ Les effluents industriels traités par fermentation anaérobie : industries agro-alimentaires, papeteries et certaines industries chimiques.

Le digestat est le résidu liquide contenant les matières non dégradées, il peut être utilisé comme engrais à haut potentiel fertilisant (boues stabilisées) pour les terres agricoles.

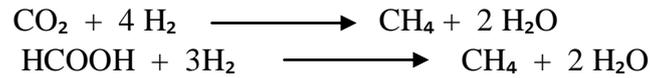
IV.2 Les étapes de la biométhanisation [24]

La biométhanisation se réalise en absence d'oxygène, ce qui permet de stabiliser les matières organiques en les transformant le plus complètement possible en méthane et en dioxyde de carbone. C'est le résultat d'une activité microbienne complexe qui se divise en quatre étapes principales :

- **L'hydrolyse**, par laquelle les macromolécules organiques se trouvent décomposées en éléments plus simples ; le déchet solide est ainsi liquéfié et hydrolysé en petites molécules solubles, à l'origine du jus de fermentation ; on parle de « solubilisation » des matières organiques : par exemple, la cellulose est transformée en sucres solubles tels que le glucose ou le cellobiose.
- **L'acidogénèse** : elle transforme les molécules simples par l'action des bactéries en acides de faibles poids moléculaire, tel l'acide lactique ou des acides gras volatils de 2 à 5 atomes de carbone (acétate, propionate, butyrate) ; parallèlement, sont produits des alcools de faibles poids moléculaires, tel que l'éthanol, du bicarbonate (HCO_3^-) et de l'hydrogène moléculaire (H_2)
- **L'acétogénèse** : Tous les produits résultants de l'étape de liquéfaction/fermentation autre que l'acétate (CH_3COO^-), le bicarbonate (HCO_3^-) et l'hydrogène moléculaire (H_2) nécessitent une transformation supplémentaire avant de pouvoir effectivement produire du méthane. C'est ici qu'interviennent des bactéries réductrices acétogènes et des bactéries sulfato-réductrices, productrices d'hydrogène, et d'hydrogène sulfuré (H_2S).
- **La méthanogénèse** : c'est la phase, au cours de laquelle deux types de bactéries méthanogènes prennent le relais : les premières, acétogènes, réduisent l'acétate (CH_3COO^-) en méthane (CH_4) et en bicarbonate (HCO_3^-). Les secondes, hydrogénotrophiques, réduisent le bicarbonate (HCO_3^-) en méthane (CH_4).
- Les acétogènes, productrices de méthane à partir d'acide acétique, de méthanol et de méthylamines :



- Les hydrogénotrophiques, spéciales dans la réduction du CO_2 par l' H_2 et production de méthane à partir d'acide formique :



- Ces réactions sont lentes et peu exothermiques. Elle génèrent néanmoins 70 % du méthane produit [24]. Il résulte que le biogaz produit est généralement composé :

-De moitié aux trois quarts de méthane (CH₄)

De un quart à la moitié de dioxyde de carbone (CO₂)

La figure 11, schématise globalement les différentes étapes du processus de dégradation anaérobie des matières organiques au cours de la biométhanisation.

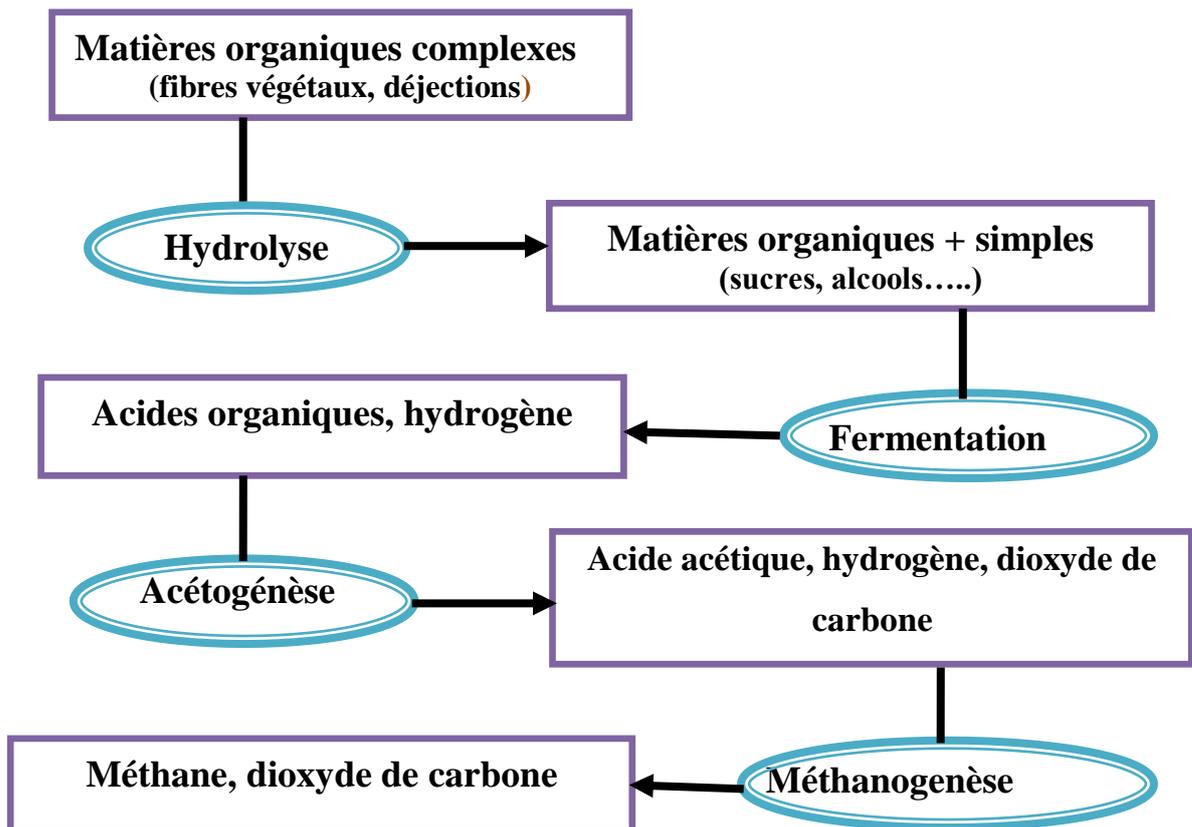


Figure N°11 : représentation schématique des différentes étapes du processus de dégradation anaérobie des matières organiques [24]

IV.3 Les paramètres influençant la biométhanisation [25], [26]

La méthanisation est un phénomène naturel où les réactions sont connues et peuvent être contrôlées. Toutefois, la production de gaz, ses caractéristiques et l'efficacité de la fermentation nécessitent certaines conditions et peuvent varier selon plusieurs facteurs.

IV.3.1. Le substrat [27]

Il a une influence sur la composition du biogaz et sur le rendement de la réaction. Un lisier de

Porc ou un effluent de volaille donnera un gaz beaucoup plus riche en méthane qu'un fumier moins riche en azote obtenu à partir d'un élevage de bovins. Ainsi le rapport C/N caractéristique de chaque substrat est un facteur de la composition du biogaz obtenu. Plus celui-ci est petit et plus le gaz résultant est riche en méthane.

Or, la proportion de méthane exerce une grande influence sur le pouvoir calorifique du biogaz. En effet, celui-ci augmente quand cette proportion est plus importante.

Tableau 03 : pouvoir calorifique du biogaz en fonction de la proportion de méthane [27]

(%) en CH ₄	PCS (KWh*/Nm ³)	PCI (KWh*/Nm ³)
50	4,80	4,30
60	5,75	5,25
70	6,70	6,20
80	7,65	7,15
90	8,60	8,10
100	9,55	9,05

(*) KWh \approx 860 kcal

- **pouvoir calorifique supérieur (PCS)** : C'est l'énergie thermique libérée par la réaction de combustion d'un kilogramme de combustible. Cette énergie comprend la chaleur sensible, mais aussi la chaleur latente de vaporisation de l'eau, généralement produite par la combustion. Cette énergie peut être entièrement récupérée si la vapeur d'eau émise est condensée, c'est-à-dire si toute l'eau vaporisée se retrouve finalement sous forme liquide.
- **pouvoir calorifique inférieur (PCI)** : C'est l'énergie thermique libérée par la réaction de combustion d'un kilogramme de combustible sous forme de chaleur sensible, à l'exclusion de l'énergie de vaporisation (chaleur latente) de l'eau présente en fin de réaction.

En outre, selon la qualité du substrat, le gaz obtenu sera plus ou moins riche en hydrogène sulfuré (H_2S) qui, mélangé à l'eau et au dioxyde de carbone, rend le biogaz beaucoup plus corrosif, nécessitant un système de traitement et d'épuration du gaz.

Les caractéristiques du substrat utilisé pour la méthanisation s'avèrent donc être des paramètres importants de la valorisation énergétique de celui-ci. Il ne faut pas non plus oublier que les caractères physiques du substrat (état, température, viscositéEtc) jouent beaucoup dans l'élaboration du procédé. Il faudra ainsi tenir compte de ces considérations pour le choix du système et adapter celui-ci aux différents paramètres du substrat valorisé.

IV.3.2. La température

La fermentation anaérobie peut s'effectuer selon trois gammes de températures adaptées à trois flores microbiennes différentes :

- Psychrophile : 15-25°C
- Mésophiles : 25-55°C
- Thermophiles : 55-75°C

La plupart des fermenteurs sont des digesteurs mésophiles et la fermentation thermophile est surtout utilisée pour les grosses unités de méthanisation.

L'intensité de l'activité des micro-organismes est très étroitement liée à la température. Celle-ci est quasiment nulle entre 0 et 15°C , commence à partir de cette valeur et grandit de façon proportionnelle pour atteindre un optimum vers les 37-40°C (valeur plus haute pour les réactions thermophiles). La température est un facteur prépondérant pour le rendement énergétique d'où la nécessité de placer un thermomètre dans le système d'installation.

IV.3.3. Le pH et l'oxygène

La stricte anaérobiose est indispensable au développement de la flore responsable de la méthanisation, car la présence d'oxygène conduit à la production des gaz indésirable (H_2S , NH_3 , H_2) et le pH optimal doit être proche de 7.

IV.3.4. L'agitation

Une bonne agitation permet de maintenir les matières solides en suspension, d'éviter la formation de mousse et de croûte, d'accroître la surface d'échange, d'assurer le transfert de chaleur et de faciliter le dégagement des bulles de biogaz.

IV.3.5. La présence des inhibiteurs

La fermentation anaérobie peut parfois être ralentie par la présence d'inhibiteurs. Ces phénomènes sont généralement connus et évitables et sont souvent liés aux élevages ou l'utilisation d'antibiotiques et de désinfectants est massive.

Par exemple l'ammoniac peut parfois devenir un élément toxique pour l'activité bactérienne au-delà d'une dose de 3g.L^{-1} .

IV.3.6. L'humidité [28]

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

IV.4 Caractéristiques du biogaz :

IV.4.1. Les caractéristiques moyennes du biogaz :

Dans les conditions normales de pression et de température (0°C ; 1 Atm), les caractéristiques moyennes du biogaz sont exprimées dans le tableau 04 ci-après

Tableau 04 : caractéristiques moyenne du biogaz [27]

Caractéristiques	Valeurs moyennes	Unités
PCI	9,94	kWh/m^3
Poids spécifique	0,68	kg/m^3
Densité par rapport à l'air	0,55	-
Limite d'inflammabilité dans l'air	7 à 14	%
Vitesse de déflagration	0,38	m/s
Température de liquéfaction	-161,60	$^{\circ}\text{C}$

IV.4.2. La composition moyenne du biogaz

La composition moyenne du biogaz varie selon les conditions physiques, biologiques, mais également selon les substrats utilisés lors de la biométhanisation. Le tableau 05 donne la composition moyenne du biogaz issu de la fermentation méthanique.

Tableau 05 : composition moyenne du biogaz [29]

Constituants	% molaire
Méthane (CH ₄)	60
Dioxyde de carbone (CO ₂)	35
Azote moléculaire (N ₂)	2
Gaz divers : H ₂ O, NH ₄ , C _n H _{2n} ,	2
Hydrogène (H ₂)	0,9
Oxygène (O ₂)	0,1

IV.4.3 Les équivalences énergétiques du biogaz [28], [24]

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) d'un Nm³ de biogaz brut qui a une composition moyenne contenant 60% en méthane (CH₄) vaut environ 5,75 kWh et est semblable à celui de :

- 0,4 litre de gaz butane.
- 0,6 litre de gasoil.
- 2 kilogrammes de charbon.
- 5 kilogrammes de bois de chauffe.

Après sa purification (élimination en grande partie du CO₂ et du gaz corrosif H₂S), son pouvoir calorifique supérieur (PCS) peut atteindre les 9,55 kWh/Nm³ ce qui représente l'équivalence de :

- 1,1 litres d'essence.
- 1 litre de gasoil.
- 0,93 litre de gaz butane.

IV.5 Les différents procédés possibles de la biométhanisation

IV.5.1 Les systèmes de digesteur

IV.5.1.1 Le procédé Batch (en discontinu)

Le système Batch est le plus simple et le plus vieux procédé élaboré. C'est un système à digestion discontinue surtout utilisée pour les déchets solides de type fumier. Les déchets à traiter sont placés dans une enceinte close pendant une durée comprise entre 8 semaines et 5 mois avec ou sans système d'agitation. La production de biogaz est irrégulière (rapide au début de la fermentation, beaucoup plus lente vers la fin). Ce système nécessite d'autre part beaucoup de main d'œuvre pour le transport de la biomasse et aussi d'entretien [25], [30].

IV.5.1.2 Le système continu « infiniment mélangé »

Ce système est le procédé le plus utilisé. L'agitation permet de conserver une vitesse de production de gaz permanente. La biomasse fraîche est apportée en continu et le résidu liquide de la digestion est éliminé régulièrement.

Ce système est néanmoins soumis à quelques contraintes, ce procédé ne peut, en effet, accepter des substrats dont la matière sèche est supérieure à 100 g par kg de biomasse apportée car au-delà de cette limite, les déchets ne sont plus pompables. Ce type de système convient mieux aux lisiers de porc.

D'autre part, ce système ne permet pas le maintien de la biomasse active, car la grande majorité de celle-ci est évacuée à chaque élimination, vu que l'activité bactérienne a une influence sur le rendement de la production en biogaz. Elle est généralement constante mais jamais optimale. Une amélioration dans le système peut être apportée en utilisant une agitation partielle (système continu partiellement mélangé). [25, 30]

IV.5.1.3 Le système continu avec accumulation de la biomasse active

Ce procédé concerne les réacteurs de seconde génération. Il consiste à fixer la matière active à l'intérieur du digesteur afin de la redistribuer à la biomasse fraîche. Celle-ci est donc dès son arrivée dégradée par une flore méthanogène active. La production de biogaz est ainsi améliorée et le temps de séjour de la biomasse écourté.

L'effluent sorti du digesteur est placé dans un décanteur pour séparer la matière active du reste des résidus. Cette matière est ensuite redistribuée au substrat qui est directement dégradé [25, 30].

IV.5.2 Le choix du type de matériaux

En ce qui concerne le choix du type de matériaux pour la fabrication du digesteur, les trois matières utilisées sont le béton, l'acier et les constituants polymériques. L'acier et le béton sont néanmoins largement et plus couramment utilisés [25].

IV.5.3. Les systèmes de stockage

Le stockage est indispensable à l'installation. Il doit être bien étanche et d'une distance pas trop éloignée du réacteur. Il existe deux systèmes de stockage : le premier à pression variable et à volume constant et le deuxième à volume variable et pression constante. C'est le second qui est généralement le plus utilisé. On observe le plus souvent sur les installations, des ballons (gazomètre) ou bien, des cloches à gaz. L'enceinte de stockage peut parfois se retrouver à l'intérieur du digesteur.

Le stockage peut se faire à plusieurs gammes de pression (entre 4 et 200 bar) mais le stockage du gaz à haute pression n'est que très rarement utilisé [31].

IV.5.4. Les systèmes de chauffage et d'agitation

Les systèmes de chauffage des digesteurs sont généralement des systèmes simples qui ne posent pas véritablement de problèmes. Le chauffage du réacteur est assuré soit par une circulation d'eau chaude, soit par une paroi chauffante ou bien grâce à un serpentin chauffant immergé dans le digesteur.

Pour ce qui concerne le brassage, il peut soit être mécanique, soit être assuré par un bullage à gaz. Les deux procédés donnent tous les deux de bons résultats. Toutefois, le bullage à gaz est plus efficace pour les lisiers de porcs et le brassage mécanique par pompe donne plus de réussite pour les fumiers de bovins [31].

IV.6 Les voies de valorisation du biogaz

Une fois le biogaz capté ou produit, autant le valoriser le plus efficacement possible. Différentes voies sont envisageables : chaleur seule, électricité seule, cogénération, carburant automobile, injection dans le réseau de gaz naturel.

Les productions de chaleur et d'électricité sont désormais des techniques éprouvées, les deux autres sont encore en phase d'expérimentation et de développement. Le choix entre ces diverses solutions dépend de nombreux critères à la fois techniques et économiques, dans lesquels la nature et la localisation du site de production interviennent pour beaucoup.

Le site peut avoir des besoins internes d'énergie (chaleur pour chauffer le digesteur et des locaux, électricité pour alimenter des machines tournantes) ; s'il n'en a pas, il peut se trouver à proximité d'utilisateurs potentiels de cette énergie (serre, usines, réseau de chaleur, réseau de transport de gaz, flotte de transport) ; il se peut aussi qu'il soit totalement isolé – c'est souvent le cas des décharges- auquel cas, la seule valorisation possible sera la production et la vente d'électricité [32].

V- Matériels et méthodes

IV-1- Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué de deux parties principales

- ❖ **Le bioréacteur** de type batch est constitué d'une bouteille en verre d'une capacité de deux (02) litres. Sur son bouchon nous avons confectionné deux sorties. La première sert pour le prélèvement des échantillons à l'aide d'une seringue et la deuxième pour permettre au biogaz produit de s'échapper. Cette sortie est reliée au dispositif de mesure de volume du biogaz. Le bioréacteur est hermétiquement fermé, pour assurer une anaérobiose totale.



Figure 12 Photo du dispositif expérimental

On a utilisé quatre bouteilles en verre pour différentes concentrations étudiées
Les bioréacteurs sont maintenus, à une température de 37°C dans un incubateur et agités manuellement chaque jour.



Figure 13 : les bioréacteurs dans l'incubateur à 37°C



Le substrat

Le substrat utilisé est constitué essentiellement de la boue de la station d'épuration de Hassi R'mel. Cette boue de consistance liquide est recueillie le jour même du lancement de la réaction pour éviter toute dégradation de la matière organique avant utilisation.

La boue est introduite dans les réacteurs avec des taux de dilutions différents :

- 20%, 50% et 100% de matière sèche avec un pH initial de 7,21
- 100% de matière sèche avec un pH initial de 8,56

L'eau utilisée pour la dilution est l'eau distillée.

V-2- Méthodes analytiques

V.2.1 Mesure du pH

Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH mètre (Crison GLP 22, avec une sonde CAT 52-02)

V.2.2 Détermination de la matière sèche (MS)

Un volume de 10 ml de boue est séché à (100 - 105°C), jusqu'à poids constant.

La masse de la matière sèche est donnée par :

$$MS = mf - mi \quad \text{En mg.L}^{-1}$$

mf : masse finale du bécher après le séchage de l'échantillon

mi : masse initiale du bécher vide

V.2.3 Détermination des matières en suspensions (MES)

C'est le résultat d'une filtration sous vide et suivie d'un séchage à 100 - 105°C, le poids des matières retenues est déterminé par différence de pesée.

Le taux des matières en suspension est donné par la relation suivante.

Il est exprimé en milligramme par litre (mg/l) :

$$MES = \frac{P_2 - P_1}{V} \cdot 1000$$

P_1 : le poids en milligramme du papier filtre.

P_2 : le poids en en milligramme du papier filtre plus le filtrat.

V_e : le volume de prise d'essai en ml.

V.2.4 Détermination du volume de biogaz

Le volume de biogaz produit dans le bioréacteur va transiter dans une colonne graduée (en cm³) remplie d'eau, La variation de niveau d'eau produit par la production du biogaz, indique le volume de gaz produit. Ce système est facile à mettre en œuvre. Cette méthode a été éprouvée au niveau du laboratoire de bioconversion à l'unité de recherche en énergie renouvelables en milieu saharien à Adrar (URER.MS Adrar) Le dispositif conçu pour mesurer le volume du biogaz est présenté ci-après :

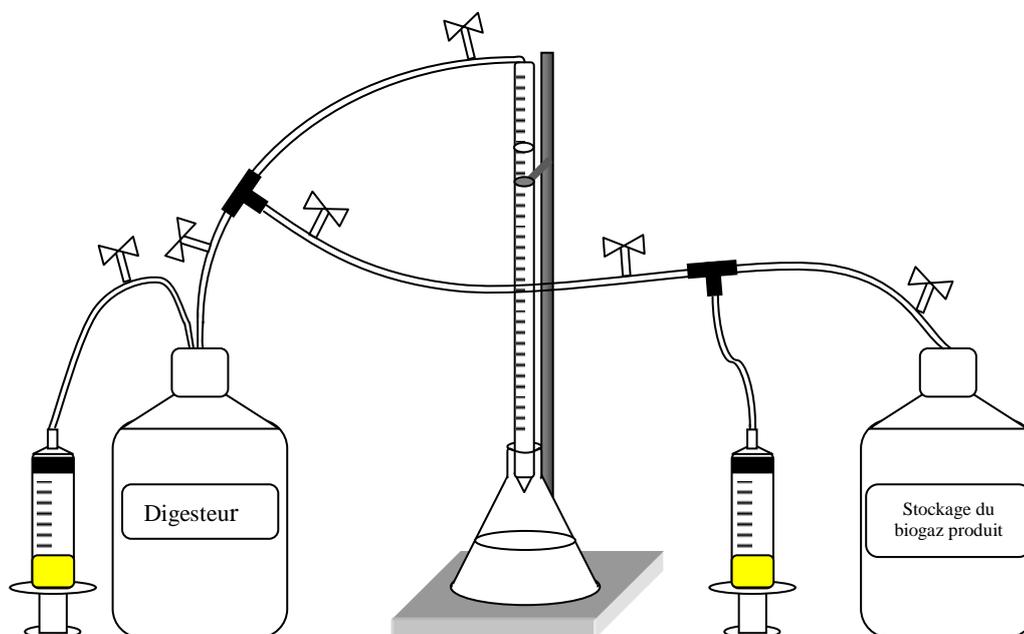


Figure 14 : schémas de mesure et stockage du volume de biogaz produit

V.2.5 Analyse spectroscopiques :

Chromatographie en phase gazeuse (CPG) :

Cette technique a été utilisée en vue de caractériser le gaz produit.

Un chromatographe de marque (HITACHI) Référence : 163

Conditions opératoires : Le volume injecté est 1cc à une température de 130°C. Le gaz vecteur utilisé est l'hélium.

Spectrométrie d'absorption atomique (SAA) :

A été utilisée pour détecter et quantifier la teneur en éléments métalliques dans les échantillons de boues pour cela un spectromètre de marque Solaar Thermo Elemental a utilisé;

L'étalonnage du spectre est effectué à l'aide d'une série de solutions étalon obtenues par dissolution d'une solution mère de 1g.L^{-1} . Les solutions utilisées sont des solutions standard de (Zn Cl_2 , Fe Cl_2 , $\text{Pb (NO}_3)_2$, $\text{Cd (NO}_3)_2$, Ca Cl_2). Pour chaque élément dosé, on a utilisé une lampe à cathode creuse appropriée.

Les gammes de concentrations pour chaque série de solutions étalon sont données dans le tableau N°06

Tableau 06 : Gammes de concentrations des solutions étalons.

Type de solution	Gamme de concentration (mg/l)
Zn Cl_2	[0,1-1]
Fe Cl_2	[0,1-5]
$\text{Pb (NO}_3)_2$	[0,1-2]
$\text{Cd (NO}_3)_2$	[0,01-1]
Ca Cl_2	[0,2-20]

VI - Résultats et discussions

La digestion de la boue de la station d'épuration de la ville de Hassi R'mel a duré soixante (60) jours et les caractéristiques initiales de la boue, sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 07 : Les caractéristiques initiales de la boue à traitée

Paramètres	Concentration de la boue à traiter	Concentration moyenne de la boue en 2007
Matière Organique (g.L ⁻¹)	18,40	26,46
Matière Sèche (g.L ⁻¹)	25 ,64	34,33
Matière minérale (g.L ⁻¹)	5,84	7,71
pH	7,21	7,38

VI-1- Etude de l'évolution du pH :

L'évolution du pH en fonction du temps est représentée dans les figures suivantes :

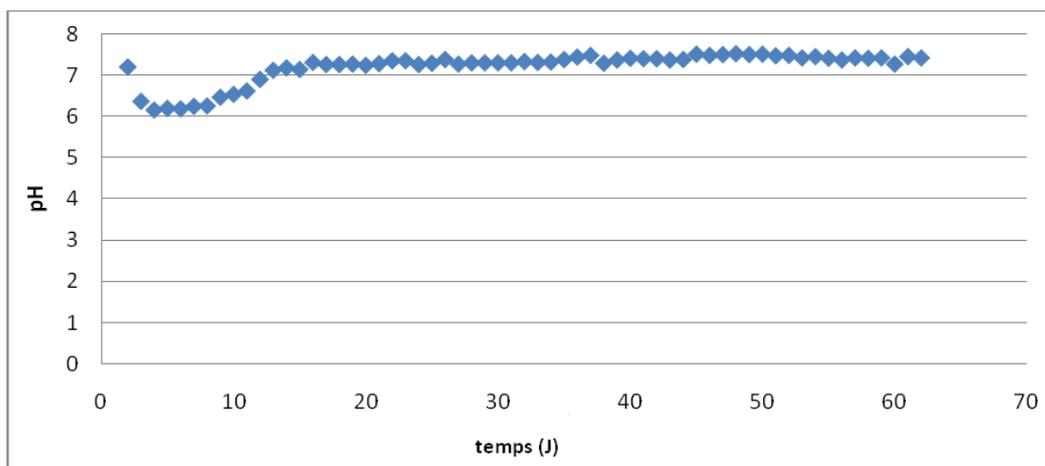


Figure15 : Variation du pH en fonction du temps (Boue sans dilution)

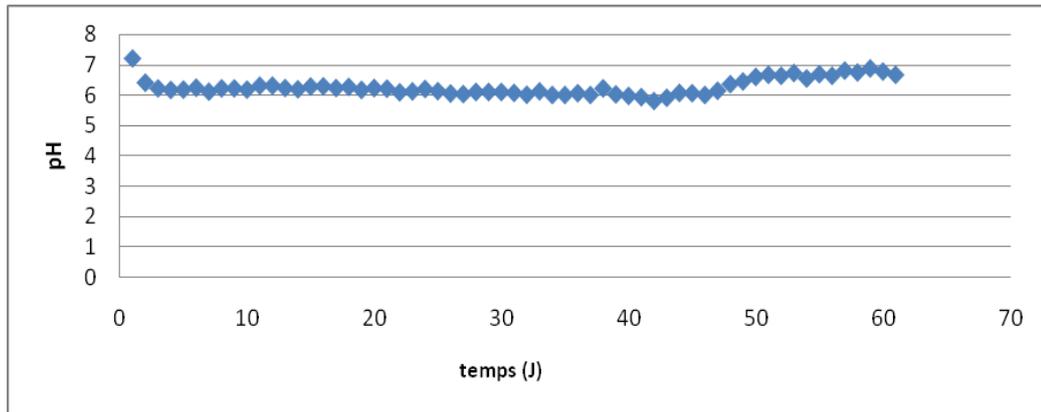


Figure16 : Variation du pH en fonction du temps (Boue diluée à 50%)

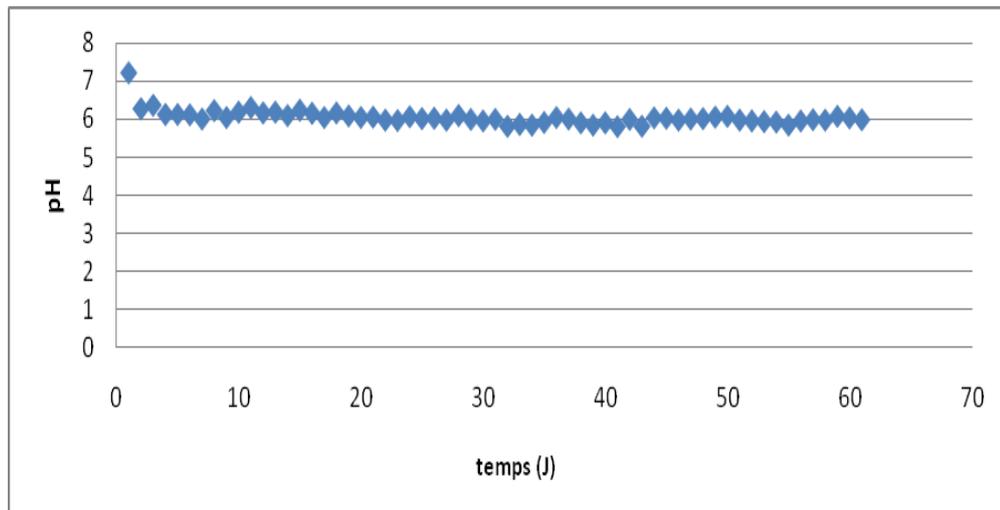


Figure 17 : Variation du pH en fonction du temps (Boue diluée à 80%)

Pendant la durée de la digestion, nous observons une chute de pH de 7,21 jusqu'à une valeur de 6 pendant les six premiers jours et ce pour les trois concentrations, cela est dû à la décomposition de la matière organique et la formation des acides gras volatils dans l'enceinte réactionnelle. Nous notons une augmentation de la valeur du pH et ce pour la boue sans dilution à pH=7,21.

Une stabilisation autour du pH 6 est enregistrée pour la concentration de 80% de dilution jusqu'à la fin de notre expérience. Et pour la boue à 50% de dilution on remarque une stabilisation pendant les 45 premiers jours puis une augmentation pour les jours qui suivent. Ces mêmes observations ont été rapportées par Raposo et al [33] et Yacob et al [34] dans leurs travaux qui ont concerné la stabilisation des boues des stations d'épuration urbaines.

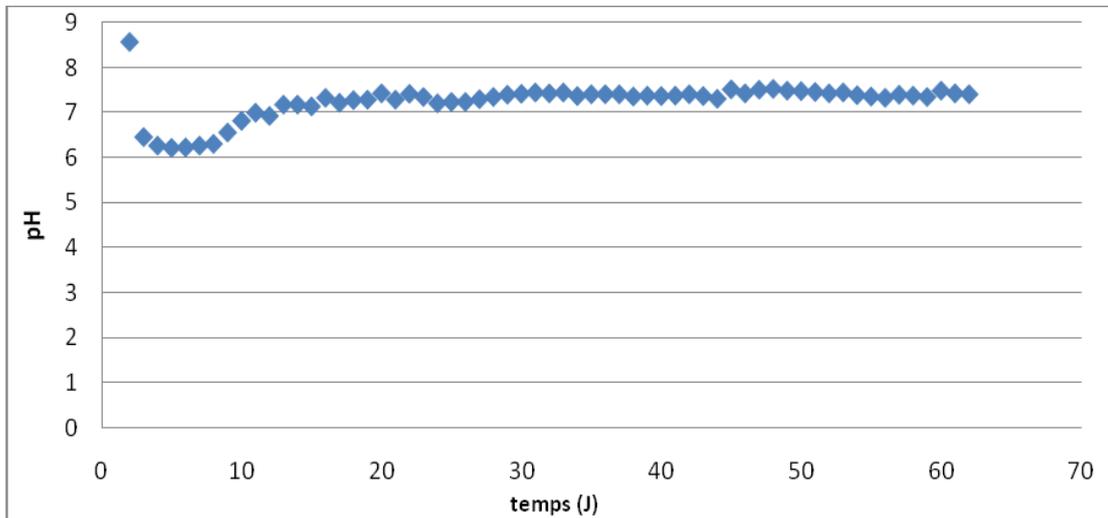


Figure 18 : Variation du pH en fonction du temps (Boue sans dilution) avec un pH initial ajusté à 8,56

Dans ce cas de figure on a utilisé une boue sans dilution mais avec un pH initial ajusté à 8,56, on constate que une chute de pH jusqu'à une valeur de 6,45 pendant les six premiers jours, puis une augmentation jusqu'à 7,50 et ce pendant les jours qui suivent. Une stabilisation autour de cette dernière valeur est enregistrée jusqu'à la fin de notre expérience qui a duré 60 jours.

VI-2- Variation de matière sèche pendant la digestion

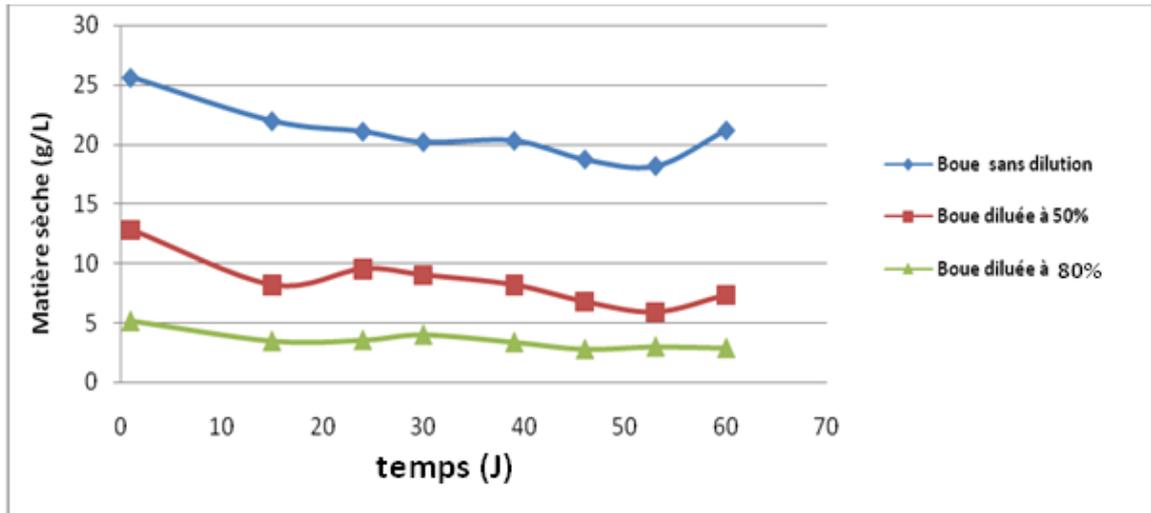


Figure 19 : Variation de matière sèche pendant la digestion pour les trois dilutions

Le suivi de l'évolution de la matière sèche pendant la digestion nous permet d'évaluer le rendement de l'abattement de ce paramètre.

D'après la figure 19, nous constatons une réduction de la matière sèche pendant la digestion, pour les trois concentrations, avec un rendement de 26,83% pour l'échantillon de boue sans dilution. Ce rendement est du même ordre de grandeur que ceux cotés dans plusieurs travaux de recherche, notamment les travaux de Raposo et al [33], Hutnan et al [35] et linke [36].

Et pour les deux autres concentrations de boue diluée à 50% et 80%, nous notons un rendement de 54%, 45% respectivement.

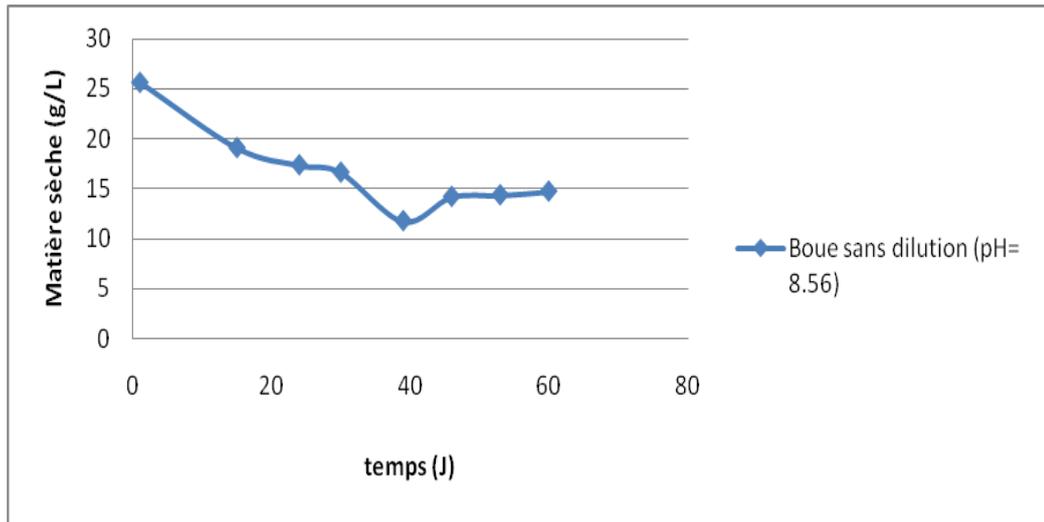


Figure 20 : Variation de matière sèche pendant la digestion pour une boue sans dilution avec un pH initial ajusté à 8,56

Dans cette figure on remarque aussi une diminution de la matière organique dans le milieu réactionnel et ce, durant la fermentation avec un rendement de 54% environ.

VI-3- La production du biogaz

La production du biogaz a été suivie par la mesure de volume du biogaz produit pendant la durée de la digestion

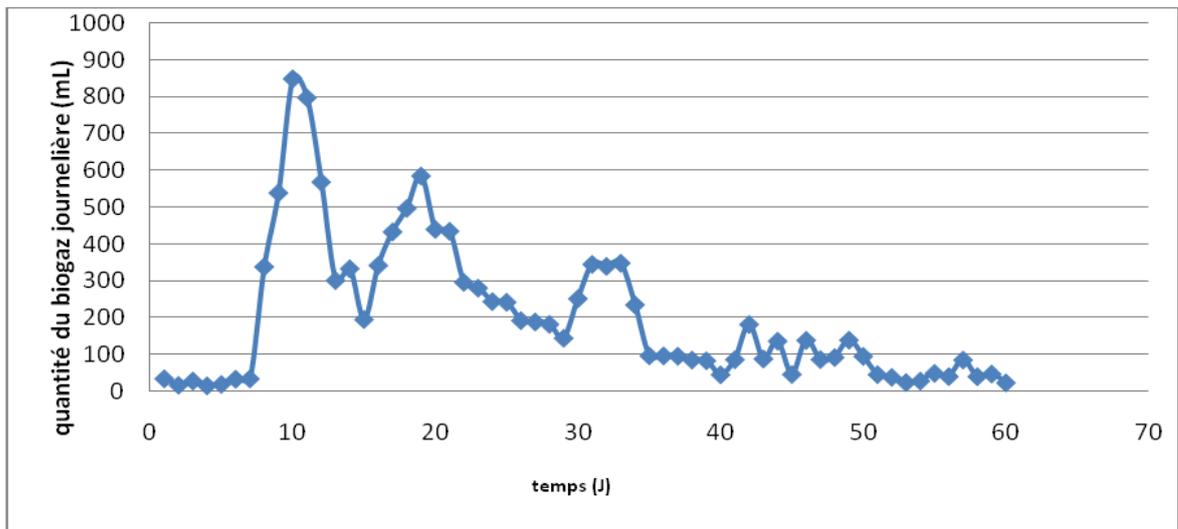


Figure 21 : Variation de quantité du biogaz en fonction du temps (Boue sans dilution)

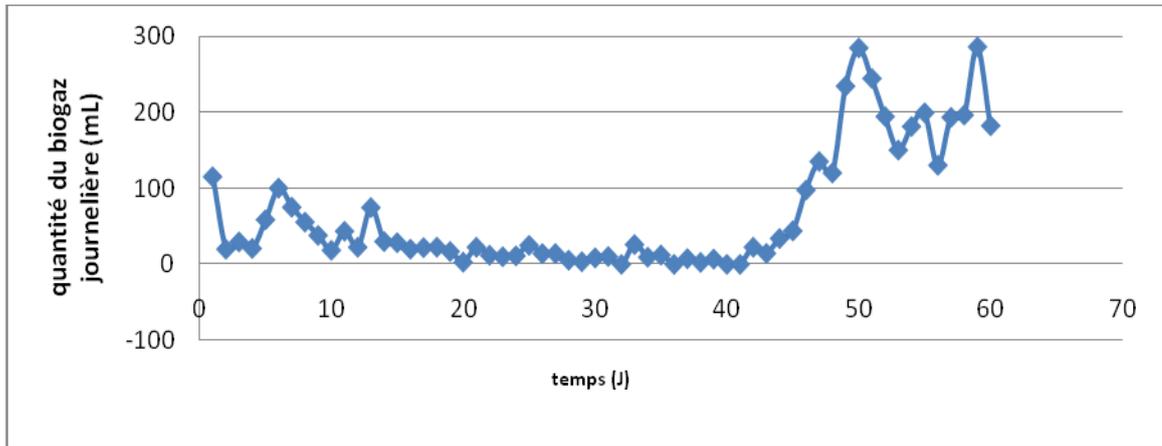


Figure 22 : Variation de quantité du biogaz en fonction du temps (Boue diluée à 50%)

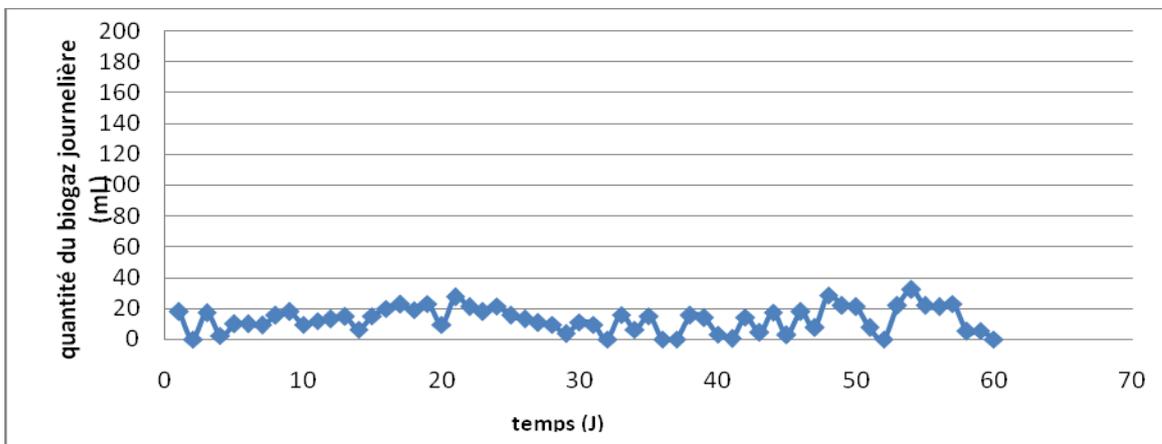


Figure 23 : Variation de quantité du biogaz en fonction du temps (Boue diluée à 80%)

La figure 21 montre une augmentation du volume du biogaz en fonction du temps. Cette augmentation du volume est accentuée dès le dixième jour pour l'échantillon à boue sans dilution. Cela nous permet de dire que la phase méthanogène est atteinte à partir de ces jours. La production a duré jusqu'au 37^{ème} jour, puis elle devient de plus en plus faible jusqu'au dernier jour (60^{ème} jours). Car le milieu devient totalement pauvre et déséquilibré.

Nous remarquons pour les deux autres concentrations (50% et 80% de dilution) que l'augmentation dans la production du biogaz est accentuée dès le 43^{ème} jour pour 50% de dilution et le 53^{ème} jour pour 80% de dilution. Cela est dû au faible apport en matière organique pour les deux concentrations.

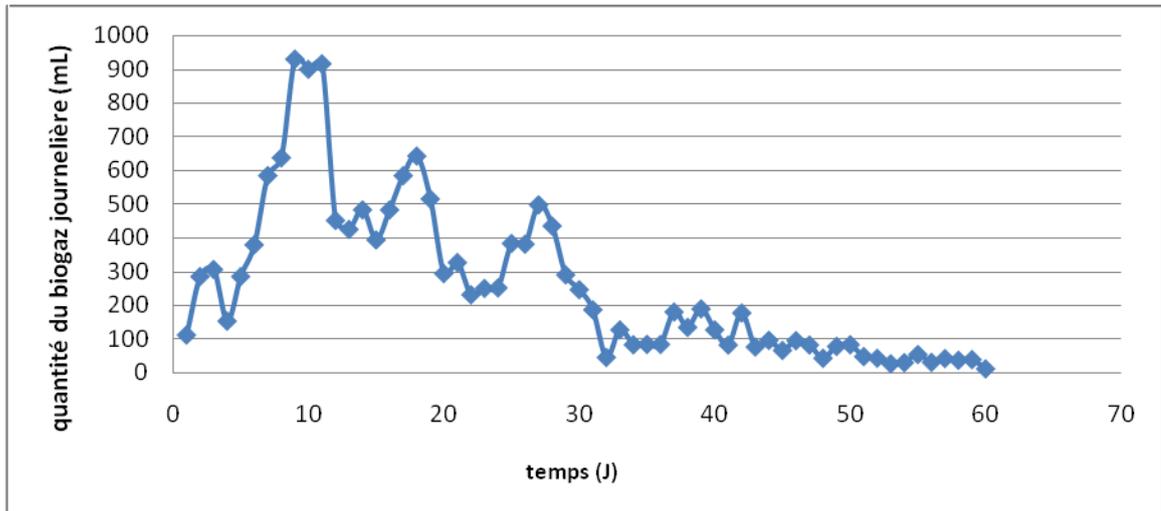


Figure 24 : Variation de quantité du biogaz en fonction du temps (Boue sans dilution) avec un pH initial ajusté à 8,56

, Nous remarquons une augmentation dans la quantité du biogaz produit et ce, à partir du 4^{ème} jour. Cela nous permet de dire qu'il y'a une accélération dans les trois premiers phases pour atteindre la phase méthanogénèse à partir de ce jour. Et cette production a duré jusqu'au 35^{ème} jour, puis elle devient de plus en plus faible jusqu'au dernier jour (60^{ème} jours).

VI-3-1- Le bilan énergétique

On utilise pour les calculs, les résultats expérimentaux obtenus pour l'échantillon à boues sans dilution (figures 21 et 25) l'une donnant le volume de biogaz produit (V_B) et la seconde, la proportion de méthane dans le biogaz produit (y_{CH_4}). L'objectif c'est de calculer le volume du méthane produit après soixante jours de fermentation méthanique

Le volume de méthane cumulé produit est donné par la relation

$$V_{CH_4} = V_B \cdot y_{CH_4} \text{ (voir tableau des résultats en annexe 1)}$$

Volume moyen cumulé de CH_4 dans le mélange gazeux est de 1,09 L et le pourcentage moyen en CH_4 dans le biogaz produit (2,5L) à partir de deux litres (02L) de boues pendant soixante jours de digestion est de 43%

VI-3-1-1- La quantité annuelle de boue

D'après les hydrauliciens de la station d'épuration des eaux usées en question, le volume de boue évacuée chaque jour est de 08 m³, ou encore annuellement de 2920 m³

VI-3-1-2- La production du méthane

En nous basons sur que le taux de méthane dans le biogaz produit qui est de 43 %, La production annuelle du méthane est égale :

$$V_{\text{CH}_4} = (2920/6) \cdot (2,5/2) \cdot 0,43 = 261,6 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$$

261,6 m³ de CH₄ pour approximativement 3000 m³ de boues produites par an, n'est une quantité très importante mais néanmoins la valorisation des boues permis de :

- 1) Préserver l'environnement des gaz à effet de serre (CH₄, CO₂ qui pourrait être piégé par barbotage dans une solution de soude).
- 2) Le digestat obtenu est adéquat pour l'amendement des sols surtout au sud
- 3) Récupération du méthane pour divers utilités.

VI-3-1-3- L'énergie disponible annuellement

Connaissant le pouvoir calorifique inférieur PCI du méthane qui est 9,04 KWh [27]

$$E = PM * PCI$$

$$E = 261,6 * 9,04 = 2364,86 \text{ KWh /an}$$

VI-4- caractérisation du biogaz obtenu

Une caractérisation du biogaz obtenu a été faite par chromatographie en phase gazeuse (CPG).

VI-4-1 Résultats des analyses par Chromatographie en Phase Gazeuse (CPG)

Pour chaque échantillon nous effectuons plusieurs analyses, pour des prélèvements à différents temps.

On obtient les résultats présentés dans les figures 25 et 26 pour les deux concentrations à boue sans dilution avec un pH=7,21 et un pH ajusté à 8,56, et dans les tableaux 8 et 9 pour les concentrations de 50%, 80% de dilution

❖ Composition du biogaz pour l'échantillon à boue sans dilution

La composition en méthane du biogaz a atteint une valeur moyenne de 50% au bout de 20 jours. Elle a augmenté de 8% durant les 13 jours suivants atteignant 58%. Et après 53 jours de fermentation méthanique la composition en méthane augmente avec une valeur égale à 62%. (figure 25)

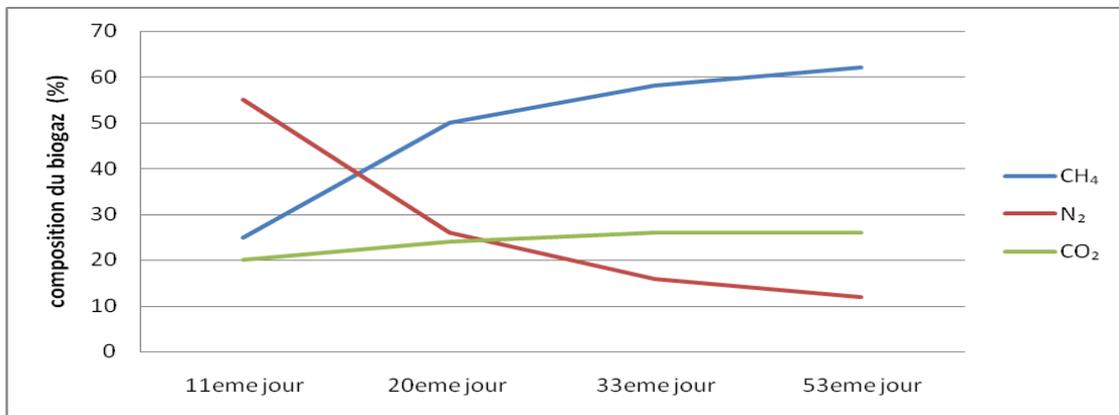


Figure 25 : L'évolution et la composition du biogaz pendant la digestion pour l'échantillon à (Boue sans dilution)

❖ Composition du biogaz pour l'échantillon à (Boue sans dilution) avec un pH initial égal à 8.56

Pour cet échantillon qui est caractérisé par un pH ajusté à 8,56. La composition de son biogaz en méthane a atteint la valeur de 37% après 11 jours de la digestion. Elle a augmenté de 16% durant les 9 jours suivants, et il a continué à augmenter pendant la digestion jusqu'à il atteint sa valeur maximum entre le 20^{ème} et le 41^{ème} jour, avec un pourcentage en méthane avoisinant les 66%. (Figure 26)

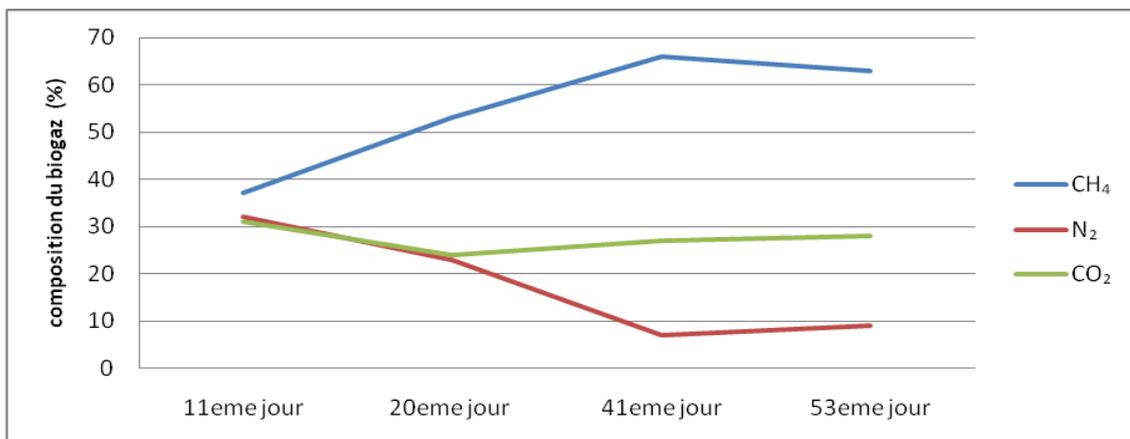


Figure 26 : L'évolution et la composition du biogaz pendant la digestion pour l'échantillon à (Boue sans dilution) avec un pH=8.56

❖ Composition du biogaz pour l'échantillon à 50% de dilution

Tableau 08 : Composition du biogaz pour l'échantillon à 50% de dilution

(%)	prélèvement		
	11eme jour	41eme jour	53eme jour
CH₄	0	0	30
N₂	94	93	51
CO₂	6	7	19

❖ Composition du biogaz pour l'échantillon à 80% de dilution

Tableau 09 : Composition du biogaz pour l'échantillon à 80% de dilution

(%)	prélèvement		
	11eme jour	41eme jour	53eme jour
CH₄	0	0	0
N₂	98	92	90
CO₂	2	8	10

Dans ces concentrations, nous notons qu'après l'analyse par CPG le biogaz produit ne contient pas du méthane, sauf pour la concentration à 50% de dilution la composition en méthane du biogaz a atteint une valeur moyenne de 30% après 53 jours de la digestion. Cela nous permet de dire que le milieu est totalement pauvre en matière organique.

VI-5- Détermination des métaux lourds pour les quatres substrats après la digestion

Tableau 10 : Détermination des métaux lourds

Métaux lourds (ppm)	Fe	Cu	Zn	Mn	Cd	Pb
Substrat avant digestion	0,19	0,20	10,2	0,32	ND	ND
Substrat après digestion						
Substrat (Boue sans dilution)	0,17	0,35	6,54	0,54	ND	ND
Substrat (Boue sans dilution) à pH=8,56	0,18	0,25	13,3	0,32	ND	ND
Substrat à 50% de dilution	0,17	0,14	13,38	ND	ND	ND
Substrat à 80% de dilution	0,19	0,07	10,69	ND	ND	ND

L'analyse des métaux lourds par Spectrométrie d'absorption atomique (SAA), a permis de déterminer les concentrations en métaux lourds pour les quatres échantillons après la digestion. Pour l'échantillon sans digestion, et on n'a pas remarqué un grand changement dans la concentration des métaux avant et après digestion.

Les concentrations décelées sont très faibles, ce qui rend le digestat obtenu très approprié pour l'épandage en arboriculture ou autres.

Conclusion

Le but de notre travail est de valoriser la biomasse par digestion anaérobie.

On a utilisé comme matière première de la boue de la station d'épuration des eaux usées urbaines de la ville de Hassi R'mel

On a préparé quatre échantillons de boue comme suit ; le premier est une boue brute correspond à 25,64 grammes de matière sèche par litre, deux échantillons avec un taux de dilution de 50% et 80% correspondent à 12,82 et 5,12 g.L⁻¹ de matière sèche respectivement et le dernier c'est une boue brute (25,64 g.L⁻¹) avec un ajustement du pH à 8,56. Les quatre échantillons sont mis à fermenter dans des digesteurs dans des conditions d'anaérobiose pendant 60 jours.

La cinétique de production de biogaz suit intimement les phases rapportées dans la littérature. En effet, la variation du pH liée à la libération des acides gras volatils, pour les deux échantillons a boue brute à pH initial et à pH ajusté, nous a permis de déterminer la durée de chaque phase : l'hydrolyse-acidogénèse dure 6 jours, l'acétogénèse 4 jours et la méthanisation qui se déclenche à partir du 10^{ème} jours.

La digestion de la boue a permis d'avoir un abattement de la matière sèche, pour les deux échantillons a boue brute à pH initial et à pH ajusté de l'ordre de 26,83 et 54,1% respectivement. Et pour les deux autres concentrations de boue diluée à 50% et 80%, nous notons un rendement de 54, 45% respectivement.

La production du biogaz n'est effective qu'à partir du dixième jour. Par la suite, il y a une augmentation constante de la production de biogaz jusqu'au 37^{ème} jours, puis elle devient de plus en plus faible jusqu'au dernier jour (60^{ème} jours)

Pour les deux autres concentrations (50% et 80% de dilution) l'augmentation de la production du biogaz est accentuée dès le 43^{ème} jour pour 50% de dilution et le 53^{ème} jour pour 80% de dilution.

La production dépend de plusieurs paramètres parmi lesquels nous pouvons citer la nature du substrat initial, sa quantité, la dilution et le pH.

L'analyse du biogaz produit détermine la composition molaire approximative, pour les deux échantillons à boue brute à pH initial et à pH ajusté, qui est de 62 et 63% de méthane respectivement après 53 jours de digestion.

Cette étude, a permis de démontrer clairement la possibilité de produire une énergie à partir d'un déchet indésirable qui est la boue des stations d'épuration des eaux usées urbaines.

La généralisation de construction des stations d'épurations fait que la valorisation des boues doit être impérative.

Ce travail reste à approfondir pour l'augmentation du rendement de production de biogaz à travers l'optimisation de la température, du temps de séjour, du type et de la structure de digesteur. Et enfin de proposer un système de récupération et d'épuration du biogaz produit et son éventuelle utilisation.

Références Bibliographiques

- [1] **A. BAOUCHI.** « Contribution à la purification du biogaz issu des déjection bovines », Mémoire PFE, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2003
- [2] **S. KALLOUM.** « La digestion anaérobie des boues de la station d'épuration de la ville d'Adrar : une opportunité environnementale et énergétique », Mémoire de Magister, Ecole Normale Supérieure de L'Enseignement Technique D'Oran, Octobre 2006
- [3] **D. ZERIRI.** « Réutilisation des eaux usées traitées de la station d'épuration de Hassi R'mel »; Mémoire de post graduation spécialité; UNIVERSITE de MOSTAGANEM; Sep 2007
- [4] **S. Zekri, L. Ghezal, T. Aloui, K. Djebbi.** « Les externalités négatives de l'utilisation des eaux usées traitées en agriculture », Séminaires Méditerranéen. (2002)
- [5] **J-P. BECHAC, P. BOUTIN.** « Traitement des eaux usées » Paris, Eyrolles, 1984
- [6] **DEGREMONT.** «Mémento technique de l'eau». 9^{ème} édition Lavoisier, paris, 1989.
- [7] **A. Gaid.** « Épuration biologique des eaux usées Urbaines », tome1, 1984
- [8] **J. RODIER.** «L'analyse de l'eau, les eaux résiduaires, eau de mer», DUNOD ,8^{ème} édition, PARIS ,1996
- [9] **J. Brissaud et A. Faby.** « L'utilisation des eaux usées épurées en agriculture ». Office nationale de l'eau de Montpellier, 1997.
- [10] **M. SATIN, B. SELMI, B. REGIS.** « Guide technique de l'assainissement »2^{ème} édition, paris, 1999.
- [11] **B Shuval. H.fatal., P yekutiél** «State of the art review: an epidemiologica et approach to the health effects of wastewater reuse. proceedings form international» .1985.
- [12] **P. Mouchet,** « traitement des eaux avant utilisation. Matières particulaires ». 2004, technique d'ingénieur G1270.P4,P9.

[13] **J-C. BOUDEZ.** « Rhéologie et physico-chimie des boues résiduaire pâteuses pour l'étude du stockage et de l'épandage ». 2001. Thèse de Doctorat. écoles nationale de génie rural, des eaux et des forets .

[14] **S. AMIR.** « Contribution à la valorisation de boues de station d'épuration. Par compostage : Devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compostage ». 2005. Thèse de Doctorat, l'institut national polytechnique de Toulouse. P12-16

[15] **E. JARDIE.** « Composition oraganique de boues résiduaire de stations d'épuration lorraines : caractérisation moléculaire et effets de la biodégradation ». 2002. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I P10 ; 11 ; P13 ;P16.

[16] **A. BERNAL-MATINEZ.** « Elimination des hydrocarbures aromatiques polycycliques présents dans les boues d'épuration par couplage ozonation digestion anaérobie ». 2005. Thèse de Doctorat. Université Montpellier II sciences et techniques du Languedoc. P22 ;P24 ;P26.

[17] **C. BOUGRIER.** « Optimisation du procédé de méthanisation par mise en place d'un co-traitement physico-chimique : Application au gisement de biogaz représenté par les boues d'épuration des eaux usées ». 2005. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II sciences et techniques du Languedoc. P28

[18] **JO** de la R.A.D.P N° 77 du 12 décembre 2001

[19] **S. Santos.** « Unité de compostage des déchets verts, installation classée pour la protection de l'environnement ». 2002. Mémoire, Ecole supérieure des géométries et topographes.

[20] **R. Molett, F. Cansell.** « Méthanisation des déchets organique, étude bibliographique ». 2003, Rapport, RE.CO.R.D

[21] **C. Couturier, S. Berger, I Meiffren.** « La digestion anéarobie des boues urbaines, état des lieux, état de l'art ». 2001 SOLAGRO. P6

[22] **Wallon des Déchets.** Analyse des plans Stratégiques des Intercommunales et de la gestion des déchets Ménagers et assimilés et des DIB en région Wallonne. 2001 Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement Office P3

[23] **H. Prévot.** « La récupération de l'énergie issue du traitement des déchets ». 2000. Rapport. Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie France. P20

[24] **L. ANGELIQUE.** « Biométhanisation », Séminaire sur les métiers de l'énergie, Université de Liège- Haute Ecole Charlemagne- Hemes, avril 2002.

[25] **M.PIDOUX.** « Agriculture et effet de serre : Adaptation des pratiques agricoles, -Alternatives énergétiques » , Edition D .A. Environnement, ANGERS 2000

[26] **J.F. MAILARD. Ph. LONCHAMPT.** « Valorisation énergétique des déchets végétaux : Fermentation méthanique » : Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N°129, janv-févr 1984

[27] **B. De La FARGE.** «Le biogaz : Procédés de fermentation méthanique » , Edition Masson, Toulouse 1995.

[28] **I.TOU, S. IGOUD et A. TOUZI.** « Production du biométhane à partir des déjections animales », Revue des énergies renouvelables, Publication du CDER, juin 2001

[29] **B. LAGRANGE.** « Biométhane : principes, techniques, et utilisations », Tome 02, Edition Edisud, Energies Alimentaires, 1979

[30] **M. DEMUYNCK et E-J. NYNS.** « Installation de biogaz en Europe, un guide pratique de la commission des Communautés Européennes », Paris 1987.

[31] **J.L. Böhm.** « Cours sur la méthanisation », Ecole Supérieure d'Agriculture, ANGERS 1995.

[32] «Biogaz : les voies de valorisation » ; Revue Energie Plus, Edition ATEE, N° 213 , du 15 Octobre 1998.

[33] **F. Raposo, C.J Banks, I. Siegert, S. Heaven, R. Borja.** Influence of inoculums to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests". Process Biochemistry. 2006 (41) 1444-1450

[34] **Y.Shahrakbah, S.Yoshihito, M. Ali Hassan, M. Wakisaka, S.Sunderaj.** "Start-up operation of semi-commercial closed anaerobic digester for palm oil mill effluent treatment". Process Biochemistry. 2006 (41) 962-964

[35] **M. Hutnan, M. Drtil, A. Kalina.** "Anaerobic stabilization of sludge produced during municipal wastewater treatment by electrocoagulation". Journal of Hazardous Materials 2006 (B131) 163-169

[36] **B. Linke.** "Kinetic study of thermophilic anaerobic digestion of solid wastes from potato processing." Biomass and Bioenergy October 2006, 892-896.

[37] **J. Wang, S.Dongsheng, X. Yanhua.** “Effect of acidification percentage and volatile organic acids on the anaerobic biological process in simulated landfill bioreactors”. *Process Biochemistry*. 2006(41) 1677- 1681

ANNEXE 1

Tableau : Le volume de méthane cumulé produit

Jours	Volume biogaz produit en mL(V_B)	CH ₄ analysé en % (y_{CH_4})	V _{CH₄} en mL
5	20	10	2
11	798,5	25	199,6
15	196	37	72,5
20	441	50	220
25	243	53	128,8
30	252	54	136,4
33	349	58	202,4
40	46	59	27,1
45	47	59	27,7
50	96	60	57,6
53	25	62	15,5
Total	2514		1090,1

$$V_{CH_4} = V_B \cdot y_{CH_4}$$