

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad Dahlab Blida
Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER EN GENIE DES PROCEDES
Spécialité : Génie de l'Environnement

Intitulé du mémoire :

Intégration de la digestion anaérobie dans la filière de traitement des eaux usées de BENI MERED : station d'épuration à énergie positive

Présenté par :

- BOUHOUFI ADEL
- ZERROUK MUSTAPHA ZOHEIR

Encadré par :

Dr. Mme A. SAKRI

REMERCIEMENTS

Nous remercions Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de nous avoir donné la santé et tout dont nous nécessitions pour l'accomplissement de cette mémoire.

Nous tenons à remercier Madame A.SAKRI notre promotrice et monsieur M. W. NACEUR pour leurs conseils au cours de la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons à remercier tous les membres de familles pour la patience, les encouragements, la gentillesse et le soutien qu'ils ont donnée tous au long de ce travail.

Nous remercions aussi le chef de laboratoire, les ingénieurs et tous les techniciens de la station d'épuration de BENI MERED pour les conseils éclairés et des informations qu'ils nous ont donnés, ainsi que pour la correction de ce mémoire.

Nous remercions nos amies & nos camarades pour la patience, les encouragements, la gentillesse, et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Enfin, nous remercions très chaleureusement nos parents pour leurs aides précieuses ; ils nous ont beaucoup aidés; sans eux nous ne pouvons rien faire.

ملخص

الهدف الأساسي من هذا العمل هو تحديد حجم تركيب الميثان من الحمأة لمحطة بني مراد. لذلك فهو عبارة عن تكامل للهضم اللاهوائي في محطة معالجة مياه الصرف الصحي وفقاً للبيانات المحددة لكميات ونوعية الحمأة المنتجة في محطة معالجة مياه الصرف الصحي. لهذا السبب ، فإن الأمر يتعلق بتطوير مفهوم محطة الطاقة الإيجابية من خلال تحديد حجم الهاضم اللاهوائي الذي يجعل من الممكن إنتاج غاز حيوي يجب أن يلبي احتياجات الطاقة لمحطة بني مراد.

تم اقتراح هضمين لهما نفس الخصائص الهندسية. تمت عملية الهضم تحت ظروف التشغيل العادية لضغط ودرجة حرارة بين 32-35 °C ، مما جعل من الممكن إنتاج كمية 4318.15 م³ / يوم من الغاز الحيوي من هضم واحد مع عائد تكنولوجي بنسبة 56%. أظهرت نتائج موازين الطاقة لكل جهاز هضم أن إجمالي الطاقة المنتجة حوالي 18131.93 كيلو واط / يوم ، و 17225.33 كيلو واط / يوم طاقة قابلة للاسترداد ، و 5741.78 كيلو واط / يوم هي الطاقة المستخدمة لتسخين جهاز الهضم لتشغيله ، و 11483.55 كيلو واط / يوم. اليوم هو الطاقة المتبقية التي يمكن استخدامها لتشغيل أعمال محطة بني مراد.

الكلمات المفتاحية: معالجة مياه الصرف الصحي ، الحمأة ، الهضم اللاهوائي ، الغاز الحيوي ، الطاقة الإيجابية.

Résumé

L'objectif premier de ce travail consiste au dimensionnement d'une installation de biométhanisation des boues de la STEP de BENI MERED. Il s'agit donc d'une intégration de la digestion anaérobie dans la STEP en fonction des données spécifiques des quantités et de la qualité des boues produites dans la STEP. A ce juste titre, il s'agit de développer le concept de la station à énergie positive en dimensionnant un digesteur anaérobie qui permet de produire un biogaz qui devrait répondre aux besoins énergétiques de la STEP de BENIMERED.

Deux digesteurs de mêmes caractéristiques géométriques ont été proposée. Le processus de la digestion s'est déroulé sous des conditions opératoires normales de pression et de température entre 32-35°C, cela a permis de produire une quantité de 4318.15 m³/jour de biogaz à partir d'un seul digesteur avec un rendement technologique de 56%. Les résultats

des bilans énergétiques de chaque digesteur ont montré que l'énergie totale produite est environ 18131.93 kW/jour, 17225.33 kW/jour est une énergie valorisable, 5741.78 kW/jour est l'énergie utilisée pour chauffer le digesteur pour son fonctionnement, et 11483.55 kW/jour est une énergie restante qui peut être utilisée pour le fonctionnement des ouvrages de la STEP de Beni Mered.

Mots-clés : STEP, boues, digestion anaérobie, biogaz, énergie positive

Abstract

The main objective of this work is the dimensioning of a bio-methanization installation for the sludge of the BENI MERED waste water treatment plant (WWTP). Therefore, a suggestion of integrating anaerobic digestion into the WWTP according to the specific data of the quantities and quality of sludge produced in the WWTP. For this reason, the concept of the positive energy plant has to be developed by dimensioning an anaerobic digester which allows the production of a biogas that should meet the energy needs of the BENI MERED WWTP.

Two digesters with the same geometrical characteristics were proposed. The digestion process took place under normal operating conditions of pressure and temperature between 32-35°C, this allowed to produce a quantity of 4318.15 m³/day of biogas from a single digester with a technological efficiency of 56%. The results of the energy balances of each digester showed that the total energy produced is about 18131.93 kW/day, 17225.33 kW/day is a recoverable energy, 5741.78 kW/day is the energy used to heat the digester for its operation, and 11483.55 kW/day is a remaining energy that can be used for the operation of the BENI MERED WWTP.

Key words: WWTP, Sludge, anaerobic digestion, biogas, positive energy

Table de matière

REMERCIEMENTS	
Résumé	
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1. Généralité sur les eaux usées	3
I.1.1. Définition des eaux usées	3
I.1.2. Origine des eaux usées	3
I.1.3. Caractéristiques des eaux usées	3
I.1.3.1 Les paramètres physiques	3
I.1.3.2. Les paramètres chimiques	4
I.1.4. Traitement des eaux usées	4
I.1.5. Les différents procédés d'épuration	5
I.2 Généralités sur les boues	5
I.2.1. Définition des boues	5
I.2.2. Différents types des boues	6
I.2.3. Caractéristiques des boues	7
I.2.3.1. Caractéristiques physico-chimiques	7
I.2.3.2. Caractéristiques biologiques	8
I.2.3.3. Caractéristiques physiques	8
I.2.4. Traitement des boues	9
I.2.5. Filière d'élimination des boues	11
I.2.6. Valorisation des boues	12
I.3. Généralité sur la digestion anaérobie	13
I.3.1. Définition de la digestion anaérobie	13
I.3.2. But de la méthanisation	13
I.3.3. Etapes de la digestion anaérobie	13
I.3.4. Paramètres permettant de contrôler la digestion anaérobie des	15
I.3.5. Définition d'un digesteur	17
I.3.6. Les différents systèmes de digesteurs	17
I.3.6.1. Mode d'alimentation	18
I.3.6.2. Type de substrats	19
I.3.7. Formes du digesteur	19
CHAPITRE II PARTIE EXPERIMENTALE	

II.1. Présentation de STATION D'EPURATION DE BENI MERED	21
II.3. Dimensionnement d'une installation de production de biogaz pour la STEP de BENI MERED (biodigesteur)	22
II.3.1 Dimensionnement du digesteur	22
II.3.1.1 Choix du digesteur	22
II.3.1.2 Choix du procédé de digestion anaérobie.....	24
II.3.1.2.1 Caractérisation du substrat	24
II.3.1.2.2 Choix du procédé	25
II.3.1.2.3 Conditions opératoires	26
II.3.1.3 Calcul du volume nécessaire des boues	27
II.3.1.4 Géométrie du digesteur [27]	27
II.3.2. BILAN ENERGETIQUE	28
II.3.2.1 Production de méthane (P_{CH_4})	28
II.3.2.2 Energie totale E_t disponible annuellement	28
II.3.2.3. Energie valorisable E_v annuellement.....	28
II.3.2.4 Energie nécessaire au chauffage E_{chauff} du digesteur.....	29
II.3.2.5 Energie restante E_{rest} disponible	29
II.3.2.6 Production journalière de biogaz (G).....	29
II.3.2.7 Rendement technologique.....	29
II.4 Stockage et valorisation du biogaz (Gazomètre)	30
CHAPITRE III RESULTATS ET DISCUSSION
III. Dimensionnement de l'installation	32
III.1 Dimensionnement du digesteur	32
III.1.1 Calcul du volume nécessaire des boues.....	32
III.1.2 Géométrie du digesteur	32
III.2 Bilan énergétique	34
III.2.1 Production de méthane	34
III.2.2 Energie totale E_t disponible annuellement	34
III.2.3 Energie valorisable E_v annuellement	34
III.2.4 Energie nécessaire au chauffage E_{chauff} du digesteur.....	35
III.2.5 Energie restante E_{rest} disponible	35
III.2.6 Production journalière de biogaz	35
III.2.7 Rendement technologique.....	35
III.3 Résultats de calcul du dimensionnement d'un digesteur	36
CONCLUSION	38
Références bibliographiques.....

Liste des figures

Figure I.1 : Chaine des traitements des eaux usées (STEP de BENI MERED).....	5
Figure I.2 : Différents types de boues dans un procédé de traitement par boues activées.....	7
Figure I.3 : Les étapes de traitement des boues.....	9
Figure I.4: L étapes de la digestion anaérobie.....	15
Figure I.5 : les déférentes formes de digesteur.....	19
Figure II.1 : Station d'épuration de BENI MERED.....	21
Figure II.2 : Schéma présente la partie de la digestion anaérobie dans la chaine de traitement des eaux usées.....	23
Figure II.3 L'épaississeur de la STEP de BENI MERED.....	25
Figure II.4 : Gazomètre.....	30
Figure III.1 : La géométrie de digesteur.....	33
Figure III.2 : Relation entre la température et le temps de séjour.....	37

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Données de base de la STEP de BENI MERED.....	22
Tableau II. 2 : Donnés des boues et de l'épaisseur de STEP BENI MERED.....	24
Tableau II.3 : Dimensionnement d'un digesteur.....	27
Tableau III.1 : Les résultats de dimensionnement de digesteur.....	33
Tableau III.2 : Présente les résultats de calcul des différents paramètres.....	36

INTRODUCTION

Les eaux usées sont des milieux extrêmement complexes, altérées par les activités anthropiques à la suite d'un usage domestique, industriel, artisanal, agricole ou autres. Elles sont considérées comme polluées et doivent être, donc, traitées avant toute réutilisation ou injection dans les milieux naturels récepteurs. C'est pourquoi dans un souci de respect de ces différents milieux naturels terrestres et aquatiques récepteurs, des traitements d'abattement ou d'élimination de ces polluants sont effectués sur tous les effluents urbains ou industriels. Ces traitements peuvent être réalisés, de manière collective dans une station d'épuration ou de manière individuelle, également, par des procédés intensifs.

En Algérie, peu d'importance est accordée à la couverture des services d'assainissement, comparée à la couverture des services d'approvisionnement en eau et encore moins d'importance est accordée à l'épuration. En effet, pour un taux de couverture du réseau d'assainissement de l'ordre de 85 %, seules 20 % des eaux usées collectées en Algérie sont traitées. Le volume annuel des eaux usées est estimé à 600 millions de m³, dont quelques 550 millions de m³ correspondent aux agglomérations de taille supérieure à 50000 habitants.

La dépollution des eaux usées urbaines nécessite une succession d'étapes faisant appel à des traitements physiques, physico-chimiques et biologiques. En dehors des plus gros déchets présents dans les eaux usées, l'épuration doit permettre, au minimum, d'éliminer la majeure partie des composés organiques et biodégradables.

La caractéristique fondamentale du traitement secondaire est son caractère biologique. Il est le cœur de la chaîne de traitement des eaux usées. Il permet de réduire de plus de 90 % de la DBO₅ des effluents issus du traitement primaire. Il a pour cible principale la dégradation des matières organiques en reproduisant les phénomènes d'autoépuration existant dans la nature par utilisation d'une flore microbienne riche. Le traitement secondaire peut être réalisé à l'aide de plusieurs procédés biologiques : soit à culture libre comme le lagunage et les boues activées soit à culture fixée comme les lits bactériens, les biofiltres et les disques biologiques (biodisques).

Dans ce travail nous essayons étudier des biodigesteurs et d'après cette étude on va faire le dimensionnement d'un biodigester anaérobie et on va déterminer le biodigester le plus adéquat pour les boues de la station d'épuration de BENI MERED.

L'objectif principal de l'étude du dimensionnement d'un digesteur anaérobie est d'optimiser le traitement des déchets organiques et/ou la production de méthane. Le niveau de réduction de la matière organique est une fonction de l'utilisation finale des déchets, en accord aux objectifs de la chaîne de traitement. Parallèlement, la production de méthane peut être considérée comme une source d'énergie alternative ou un moyen par lequel de l'énergie peut être récupérée à partir d'une installation de digestion anaérobie.

Ce mémoire est constitué de trois chapitres. Le premier chapitre présente un état des connaissances sur les procédés de traitement des eaux usées, les boues de STEP et leurs traitements, la digestion anaérobie et les différents types de digesteurs.

Le deuxième chapitre présente la partie expérimentale dont laquelle la station d'épuration de BENI MERED est présentée, et les caractéristiques des boues issus de traitement. D'autre part, un dimensionnement d'une installation de digestion anaérobie des boues de STEP a été réalisé.

Le troisième chapitre présente les principaux résultats de dimensionnement et de production de biogaz obtenus, et enfin une conclusion.

CHAPITRE I
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Généralité sur les eaux usées

I.1.1. Définition des eaux usées

Les eaux usées sont toutes les eaux qui parviennent dans les canalisations d'eaux usées et dont les propriétés naturelles ont été transformées par les utilisations domestiques, les entreprises industrielles, agricoles et autres. On englobe, aussi, les eaux de pluie qui s'écoulent dans ces canalisations. Elles contiennent de nombreux éléments polluants et nécessitent d'être traitées avant leur évacuation dans le milieu récepteur [1].

I.1.2. Origine des eaux usées

Il existe quatre sources principales des eaux usées :

- Les eaux usées domestiques : les activités humaines de toutes les jours (Les eaux vannes « WC », les eaux ménagères « lavabos, douches, baignoires ») [2].
- Les eaux usées industrielles : dépendent du type de l'industrie (Fumées industrielles, huiles de vidange, carburants, résidus de pneus, métaux lourds,) [2].
- Les eaux de pluie et de ruissellement dans les villes [2].
- Le ruissellement dans les zones agricoles (Les engrais, les pesticides) [2].

I.1.3. Caractéristiques des eaux usées

On distingue les paramètres physiques, chimiques, et toxiques.

I.1.3.1 Les paramètres physiques

- **Les matières en suspensions (MES)**

Représentent les matières qui ne sont ni à l'état soluble ni à l'état colloïdal, donc retenu par un filtre. Les MES qui comportent des matières organiques est minérale constituent un paramètre important qui marque bien le degré de pollution d'un effluent urbain ou même industriel. Les techniques d'analyse font appel à la séparation directe par filtration ou par centrifugation [3].

- **Les matières volatiles en suspensions (MVS)**

Représentent la fraction organique des MES et sont obtenues par calcination de ces MES à 525°C pendant 2h. La différence de poids entre MES à 105°C et MES à 525°C donne la « perte au feu » et correspond à la teneur en MVS (en mg.l-1) d'une eau [3].

- **Les matières organiques (MO)**

Les matières organiques proviennent des êtres vivants (matières végétales ou Animales excréments, urines...) ou des produits fabriqués à partir de ces êtres vivants (papier, tissus). On retiendra que les matières organiques sont principalement composées par (de l'hydrogène, de l'oxygène, du carbone, de l'azote, du phosphore, du soufre) [3].

- **Les matières minérales**

Représentent le résultat d'une évaporation total de l'eau, c'est-à-dire « extrait sec ». Constitué à la fois par les matières minérales en suspensions et la matière solubles (chlorures, phosphates) [3].

- **Les matières décantables**

Sont composées des matières en suspensions qui sédimentent en 2 heures dans une éprouvette [3].

I.1.3.2. Les paramètres chimiques

- **La demande biochimique en oxygène (DBO₅)**

La mesure de la DBO₅ est effectuée généralement après 05 jours (DBO₅) qui est exprimée en mg d'oxygène consommée par litre. Elle se déterminer de façon courante par la méthode dite de dilution qui consiste à diluer l'eau à analyser dans un certain rapport avec une eau propre et saturé en oxygène dissous[3].

- **La demande chimique en oxygène (DCO)**

La DCO exprime la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder la matière organique (biodégradable ou non) d'une eau à l'aide de bichromate de potassium. Ce paramètre offre une représentation plus ou moins complète des matières oxydables [3].

I. 1.4.Traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées est l'ensemble des procédés visant à dépolluer l'eau usée avant son retour dans le milieu naturel ou sa réutilisation. Les eaux usées sont les

eaux qui à la suite de leur utilisation domestique, commerciale ou industrielle sont de nature à polluer les milieux dans lesquels elles seraient déversées. C'est pourquoi, dans un souci de protection des milieux récepteurs, des traitements sont réalisés sur ces effluents collectés par le réseau d'assainissement urbain ou privé [3].

I.1.5. Les différents procédés d'épuration

- Prétraitement (dégrillage grossier, dessablage, dégraissage, dégrillage fin) [3].
- Décantation primaire [3].
- Traitement biologique des pollutions dissoutes carbonées et azotées [3].
- Clarification (séparation des boues de micro-organismes) [3].

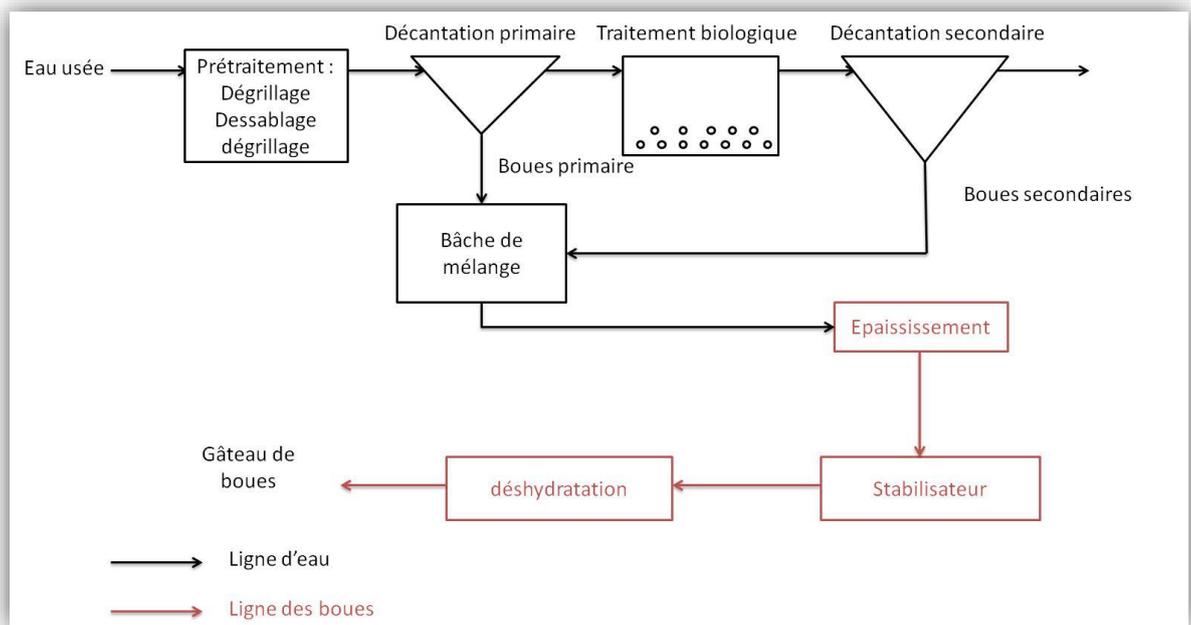


Figure I.1 : chaîne des traitements des eaux usées (STEP de BENI MERED).

I.2 Généralités sur les boues

I.2.1. Définition des boues

Les boues sont définies par le Comité Européen de Normalisation (CEN) comme «Un mélange d'eau et de matières solides, séparé par des procédés naturels ou artificiels des divers types d'eau qui le contiennent». Les eaux usées domestiques ou industrielles sont collectées puis acheminées vers les stations d'épuration (step) ou elle sont traitées. En fin de traitement, à la sortie de la station, l'eau épurée est rejetée vers le milieu naturel et il

reste les boues résiduairees qui sont composées d'eau et de matières sèches contenant des substances minérales et organiques [4].

I.2.2. Différents types des boues

- Les boues primaires

Récupération par simple décantation des eaux usées n'ayant par subit par de traitement. Elles sont très hétérogènes riches en matière minérale et contiennent 65% à 70% de matière organique, elles sont riches en eau environ 90 à 95% [4].

- Les boues secondaires

Ce sont les boues issues du traitement biologique qui sont constituées essentiellement des bactéries [4].

- Les boues tertiaires

Variante des boues primaires sont obtenues par adjonction réactifs (sel de fer d'aluminium) visant à coaguler la fraction colloïdale de matière contenues dans les eaux usées [4].

- Les boues physico-chimiques

Sont générées par l'ajout d'un réactif injecté soit en tête de traitement, soit en traitement de finition, en tertiaire on retrouve souvent dans ces boues des hydroxydes, voire d'autres métaux dans le cas des industries de traitement de surface. Ces boues peuvent donc présenter certaines similitudes avec des boues d'eau potable [4].

- Les boues mixtes

C'est le mélange des boues biologiques et des boues primaires. Elles existent au niveau des STEP (station de traitement des eaux polluées) dotées d'une filière de traitement complète [4].

- Les boues d'aération prolongée

Ces boues existent au niveau des STEP sans décantation primaire. Elles sont moins organiques et donc produisent moins de nuisances ultérieures [4].

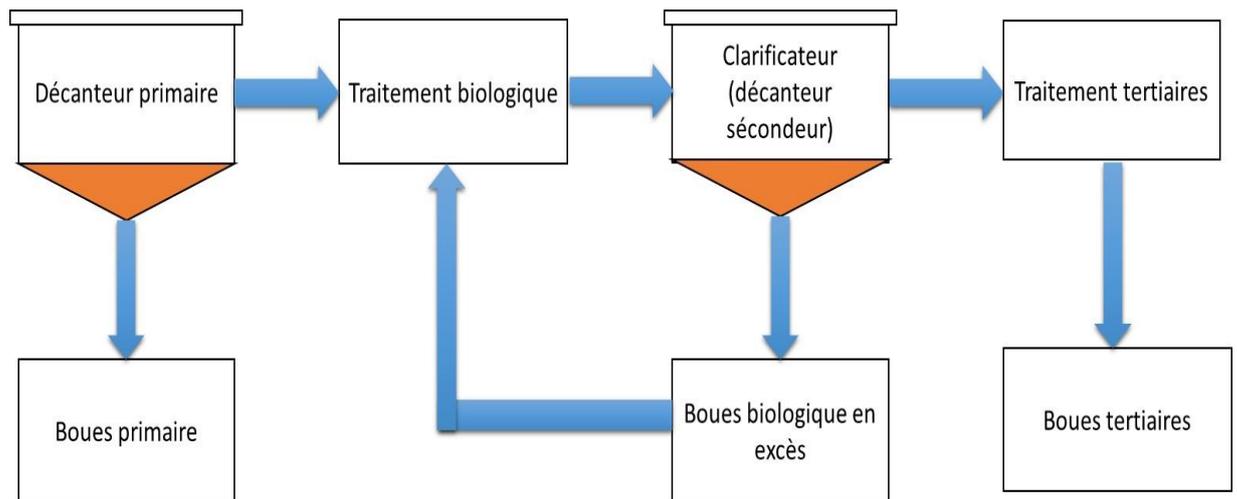


Figure I. 2: Différents types de boues dans un procédé de traitement par boues activées [4]

I.2.3. Caractéristiques des boues

I.2.3.1. Caractéristiques physico-chimiques

- Matière sèche MS et siccité S

C'est le paramètre principal de la définition de filière et surtout un des plus faciles à mesurer. MS est exprimée en g/L. Rapporté à la masse totale de boue, on l'exprimera en fraction massique S qui correspond à la siccité. Il permet de connaître la quantité de boue à traiter, quel que soit son niveau de concentration dans la filière de traitement [5].

- Matières en suspension MES

Si les MS sont faciles à déterminer sur les phases concentrées, il n'en va pas de même sur les phases clarifiées où la procédure de mesure des MES par filtration sur membrane est plus appropriée.

Afin d'écrire un bilan matière rigoureux soit en MS, soit en MES sur une opération de séparation de phase (qui ne sépare que les MES), on reliera les deux paramètres par la relation expérimentale suivante :

$$\text{MES} = \text{MS} - [\text{substances organiques et minérales dissoutes}] \text{ [6].}$$

- Fraction volatile FV (en % des MS)

C'est le rapport des matières volatiles MV (en g/L) sur les matières sèches MS (en g/L). Elle donne une précieuse indication sur le degré de stabilisation de la boue, et son aptitude à divers traitements (déshydratation, incinération...) [7].

- **Indice de boue SVI (Sludge Volume Index)**

Il caractérise l'aptitude à la décantation, et donc ultérieurement à l'épaississement puis à la déshydratation d'une boue issue d'un traitement biologique. Il est à relier indirectement aux MS et MV [8].

I.2.3.2. Caractéristiques biologiques

- **Matières organiques**

La connaissance de la composition élémentaire de la boue en terme de C, H, O, N, S permet de déterminer l'aptitude d'une boue à être dégradée biologiquement (digestion anaérobie avec production de biogaz) ou thermiquement (incinération) par écriture de la stœchiométrie de dégradation. Elle est exprimée par rapport aux MV, voire par rapport aux MV dégradables uniquement si l'on s'intéresse à la stabilisation biologique. $C_5H_7O_2N$ est souvent pris comme « formule brute » d'une boue

Biologique [9].

- **Matières minérales**

Silice, alumines, carbonates et phosphates constituent les éléments les plus couramment rencontrés, à l'exception des boues minérales d'industries spécifiques. Carbonates et phosphates ont ainsi leur importance pour préciser la qualité agricole d'une boue épandue ; la silice est un élément défavorable en centrifugation.

Par ailleurs les chlorures, essentiellement solubles, sont peu appréciés en cas d'utilisation des cendres de boues incinérées en valorisation dans le béton [10].

- **Les micropolluants**

Ils doivent être caractérisés en cas d'épandage agricole comme en cas d'incinération, car ils peuvent alors se retrouver dans les fumées. Les législations se sont longtemps tenues aux seuls micropolluants minéraux en limitant les rejets des métaux lourds suivants : plomb, chrome, cuivre, manganèse, nickel, arsenic, cadmium et mercure [11].

I.2.3.3. Caractéristiques physiques

Afin de concentrer, chauffer, convoier et stocker la boue, il est indispensable de préciser ses propriétés physiques.

- **Aptitude au convoyage et au stockage**

La boue peut présenter différents états liés à sa rhéologie dont il est important de connaître les limites afin de dimensionner les capacités de pompage, convoyage et stockage [12].

- **Masse volumique**

Elle permet de calculer le volume de boue à convoier. En l'absence de mesure, pour une boue liquide ou pâteuse [13].

- **Viscosité**

Les boues fraîches, dont la concentration déasse rarement 10 à 15 g/L, ont un comportement newtonien. Leur viscosité est alors de l'ordre de quelques mPas. Quand la teneur en MS prend des valeurs plus importantes [14].

- **Granulométrie**

Idéalement, la valeur du diamètre particulaire permettrait de connaître, d'après la loi de Stokes, l'aptitude d'une boue à épaissir. La distribution granulométrique d'une boue est Cependant difficile et longue à mesurer. Les rares mesures effectuées montrent en outre une forte dispersion autour du diamètre moyen. Par ailleurs, si la taille est généralement un critère favorable, des particules de taille importante peuvent entraîner des problèmes de convoyage (dépôts) ou d'abrasion (silice), notamment en cas de centrifugation [15].

I.2.4. Traitement des boues

Les boues issues de décanteur primaire, et les boues biologiques sont mélangées, épaissies et déshydratées. un système de tuyauterie est créé avec un maillage par vannes pour passer au bassin de stabilisation des boues. Ensuite, les boues sont collectées dans une bache en sortie de stabilisateur puis envoyées vers l'atelier de déshydratation [3].

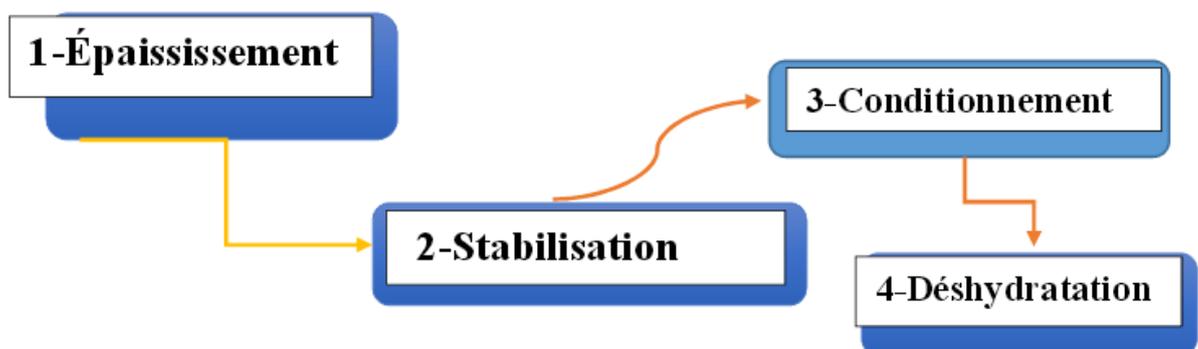


Figure I. 3: Les étapes de traitement des boues [3]

Épaississement des boues

L'épaississement des boues se fait gravitairement au niveau de l'épaississeur, ce procédé permet de concentrer les boues en consommant peu d'énergie. Ce dernier est alimenté actuellement depuis la bêche de mélange qui comprend les boues primaires, les boues en excès et le poste colature. La figure ci-dessous représente les différents types de boues [17].

Stabilisation des boues

La stabilisation aérobie des boues a pour but la réduction de matières organiques dans la masse globale des matières à un taux voisin de 60%. Cette réduction s'effectue par une aération de la boue sans apport de substrat carboné, ceci favorisant une auto-synthèse de la masse cellulaire, donc une dégradation de la masse organique. La période de traitement des boues lors d'une stabilisation aérobie est de 15 jours en moyenne et 14 jours en pointe à 12 °C. La stabilisation sera effectuée dans deux bassins similaires ayant un volume de 3559 m³. L'aération des boues est assurée par huit turbines verticales dont le rendement d'oxygénation retenu est de 1,9 kg O₄ en conditions standards. La concentration en matières sèches des boues stabilisées doit être supérieure (> 22 g/L) et le rendement de la réduction des MVS doit être supérieur (> 43 %). La stabilisation n'est pas encore fonctionnelle à 100 dans la présente station [18].

Conditionnement chimique

Avant l'étape de déshydratation proprement dite, un conditionnement de la suspension de boue par l'ajout d'un ou de plusieurs réactifs chimiques est nécessaire. Il a pour but de rompre la stabilité colloïdale de la boue et ainsi de faciliter la séparation de la suspension en deux phases : liquide et solide.

Le conditionnement chimique utilise des réactifs minéraux et/ou des poly électrolytes de synthèse (floculant) dont l'ajout contrôle provoquent la coagulation et/ou la floculation de la suspension. Plus exactement, le conditionnement de la suspension de boue peut être effectuée dans des bacs agités en série : le premier servant pour le sel métallique et le second pour le floculant. Quelques fois (plusieurs fois), l'usage de polymère combinant les propriétés de coagulant et de floculant est utilisé. Dans ce cas, le conditionnement de la boue est réalisé dans un unique bac d'agitation. Les temps de séjour sont de l'ordre de 3 à 5 minutes, ce qui est suffisant pour permettre le grossissement des bio-substances. Il en

résulte une agglomération des particules sous la forme d'un réseau tridimensionnel : les floccs. La structure de ces floccs est tributaire du type de/ou des réactifs utilisés. Les réactifs minéraux (sels de fer, sels d'aluminium, chaux...) engendrent des floccs relativement fins et stables tandis que les polymères organiques (de type poly électrolytes) conduisent à des floccs volumineux [19].

Déshydratation des boues

L'atelier de déshydratation a été dimensionné pour un fonctionnement de 16 h par jour, 6 jours par semaine pour une concentration moyenne des boues de 21g/L. La déshydratation des boues est assurée par 4 combinés tables d'égouttage et filtres à bandes presseuses. Les boues aspirées dans les ouvrages de stabilisation sont refoulées vers l'atelier de déshydratation. Elles sont flocculées par injection d'un polymère en tête de chaque machine, ce qui permet d'améliorer la formation des floccs. La déshydratation doit assurer une siccité supérieure à 20% [4].

I.2.5. Filière d'élimination des boues

Il existe de nombreux traitements en amont pour réduire le volume, les nuisances, la nocivité des boues. Actuellement 3 filières sont utilisées pour évacuer les boues, selon que l'on privilégie un mode de digestion basé sur l'élimination ou sur le recyclage. Il s'agit de :

La mise en décharge contrôlée

La mise en décharge de boues pures ou en mélange correspond à une concentration maximale de tous les déchets. Le carbone part dans l'atmosphère sous forme de méthane. Restent l'azote et le phosphore (non récupérable). Le lieu de stockage doit être confiné et on ignore quel peut être le devenir à long terme, ni la durée du confinement malgré toutes les précautions [20].

Les boues doivent être préalablement stabilisées et déshydratées (humidité maximale de 70%). Cette solution a perdu progressivement de son intérêt et se retrouve actuellement interdite pour des raisons financières (procédure de fermeture ...) et pour des problèmes environnementaux tels que les odeurs nauséabondes, pullulation de moustiques, entraînement d'éléments fertilisants (nitrates, phosphates) et de produits toxiques par les eaux superficielles et contamination des nappes d'eaux souterraines [21].

L'incinération

Elle réalise la destruction de la matière organique des déchets par combustion à haute température (+ de 500 °C) produisant des fumées et des matières minérales résiduelles nommées cendres. Dans l'objectif d'une valorisation énergétique des déchets, la chaleur produite est récupérée sous forme de vapeur ou d'électricité pour le fonctionnement du four lui-même, pour le chauffage urbain ou industriel.

Les résidus de l'incinération (Mâchefer) sont utilisables pour les travaux publics. Les boues seules ne sont pas auto combustibles, elles nécessitent des fours spéciaux et un mélange avec d'autres déchets tels les déchets ménagers. L'élimination des cendres et des mâchefers exigent une décharge contrôlée de classe 1 ou une unité d'in étage. Cette technique reste aussi néfaste de point de vue écologique et environnemental puisqu'elle contribue en plus du gaspillage de matières organiques utiles pour le sol à la diffusion de gaz très toxiques (NO, CO, SO, dioxine, etc.) qui ont fait l'objet de réglementations spécifiques [21].

Epandage direct sur le sol

A l'heure actuelle, l'épandage agricole des boues reste en Europe la principale filière d'élimination, ce dernier est pratiqué que si celles-ci respectent le principe "d'intérêt agronomique" et soient exemptes de grandes teneurs en polluants inorganiques ou organiques .Ce mode de recyclage est le plus adapté pour rééquilibrer les cycles biogéochimique (C, N, P), pour la protection de l'environnement et d'un très grand intérêt économique. Elle vise à ménager les ressources naturelles et à éviter tout gaspillage de matière organique dû à l'incinération ou à l'enfouissement dans les décharges. Les boues résiduares peuvent ainsi remplacer ou réduire l'utilisation excessive d'engrais coûte [21].

I.2.6. Valorisation des boues

La valorisation agricole des boues résiduares peut être considérée comme le mode de recyclage le plus adapté pour rééquilibrer les cycles biogéochimique (C, N, P), pour la protection de l'environnement et d'un très grand intérêt économique. Elle vise à ménager les ressources naturelles et à éviter tout gaspillage de matière organique dû à l'incinération ou à l'enfouissement dans les décharges. Les boues résiduares peuvent ainsi remplacer ou réduire l'utilisation excessive d'engrais coûteux. D'autre part, les boues des STEP peuvent être utilisées pour la production d'énergie par digestion anaérobie [21]

I.3. Généralité sur la digestion anaérobie

I.3.1. Définition de la digestion anaérobie

La digestion anaérobie ou méthanisation est la transformation de la matière organique en biogaz (est un processus de dégradation de la matière organique) composé principalement de méthane et de gaz carbonique. Elle est réalisée en anaérobiose par une communauté microbienne complexe [22].

I.3.2. But de la méthanisation

Le procédé de méthanisation appliqué aux boues d'épuration comme procédé de dépollution présente des intérêts majeurs qui sont :

- un degré de réduction intéressant de la matière organique est atteint à partir d'une faible augmentation de la biomasse anaérobie contrairement aux procédés de digestion aérobie,
- la production du biogaz peut être utilisée comme sources d'énergies renouvelables pour générer trois types d'énergie : chaleur, électricité ou biocarburant,
- de faibles impacts environnementaux (stabilisation de la matière organique, réduction des nuisances olfactives, réduction des émissions de gaz à effet de serre...).

I.3.3. Etapes de la digestion anaérobie

La digestion anaérobie implique 4 étapes majeures (hydrolyse, acidogènes, a cétogenèse et méthanogènes) dont les microorganismes associés ont des caractéristiques de croissance et des constantes de cinétiques de réaction différentes et spécifiques suivant les conditions opératoires telles que la température, le temps de séjour, le substrat.

Hydrolyse

Les grosses molécules complexes (protéines, polysaccharides, lipides, cellulose) sont dépolymérisées en composés plus simples (acides aminés, sucres simples, acides gras, glycérol, ...) par des bactéries hydrolytiques [23].

Acidogenèse

Les molécules carbonées créées par l'étape précédente sont métabolisées par les bactéries acidogènes et fermentatives. Elle conduit à la formation d'un mélange de composés : acides organiques, acides gras volatils, alcools, hydrogène, dioxyde de carbone, ammonium...L'hydrolyse constitue le facteur limitant de ces deux premières étapes.

L'optimum de croissance des bactéries acidogènes se situe dans un pH de 5,5 à 6 et une température de 37°C. Mais il existe également une zone thermophile entre 55 et 60°C [23].

Acétogénèse

Les matières organiques simples sont transformées par les bactéries acétogènes en acétates, CO₂ et hydrogène. Ces micro-organismes sont inhibés par de fortes concentrations en hydrogène, et par la présence de bactéries hydrogénéophiles [23].

Méthanogénèse

L'acétate, l'hydrogène et le dioxyde de carbone sont transformés en biogaz par des bactéries acétoclastes et hydrogénotrophes. Il existe deux grandes voies de synthèse, faisant appel à des archaées anaérobies strictes [23].

Les méthanogènes acétoclastes : $\text{acétates} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{CH}_4$ [23].

Les méthanogènes hydrogénotrophes : $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \longrightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4$ [23].

Environ 70% du méthane est produit par la dégradation des acétates.

La digestion ne peut être réalisée que sous certaines conditions :

- L'absence d'oxygène, de nitrates ou de sulfates [23].
- Un pH proche de la neutralité [23].
- Une concentration en acides gras volatils inférieure à 2 – 3 g.L⁻¹ [23].
- Une pression partielle en hydrogène très faible : 10 – 20 Pa au maximum [23].
- Un potentiel d'oxydo-réduction inférieur à -300 mV [23].
- L'absence d'éléments inhibiteurs : agents chlorés, antibiotiques... [23].
- Une température stable optimale pour les micro-organismes épurateurs [23].

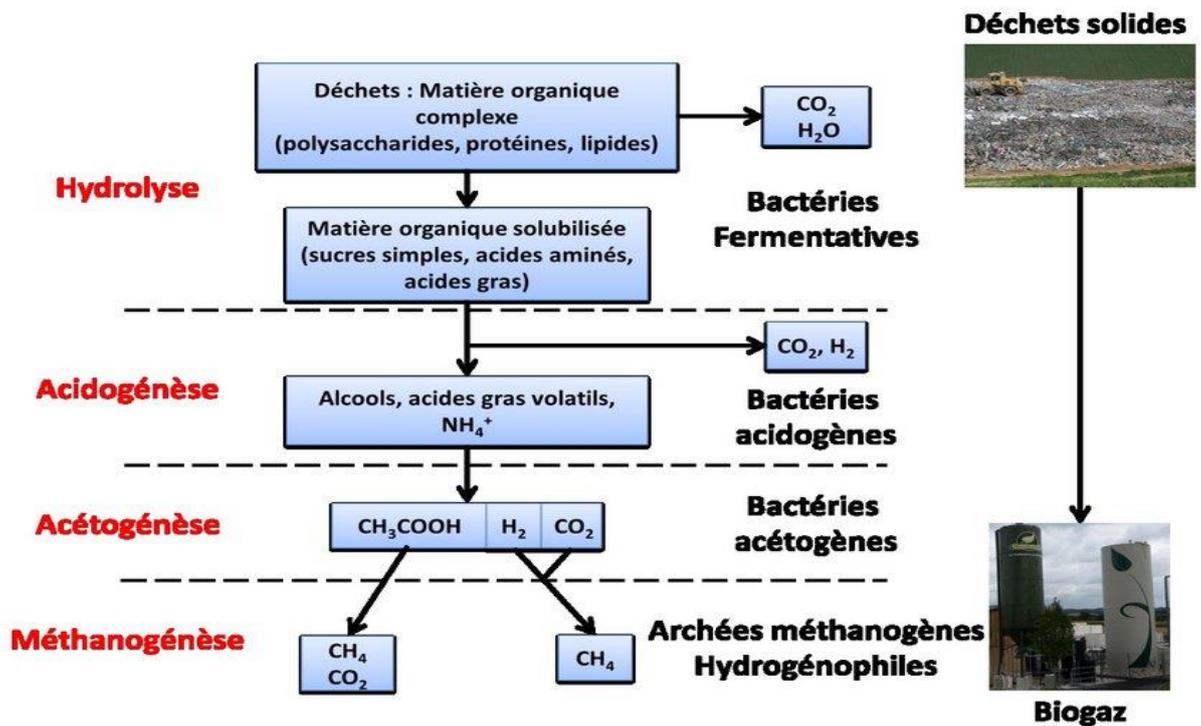


Figure I. 4: Les étapes de la digestion anaérobie [23]

I.3.4. Paramètres permettant de contrôler la digestion anaérobie des boues

Il existe plusieurs paramètres physico-chimiques qui affectent les performances de dégradation des boues d'épuration. Les paramètres principaux sont :

- **Le pH**

Les bactéries sont fortement sensibles aux variations de pH, l'optimum se situant entre 6,5 et 7,5. Afin de maintenir le pH dans la zone optimale, celui-ci est régulé par l'ajout dans le réacteur de soude ou de bicarbonate de sodium. Le pH est principalement lié à la présence d'acides gras volatils. Lors du bon fonctionnement du digesteur, le pH est tamponné par la présence des bicarbonates produits par les méthanogènes, cependant lors d'un stress ce pouvoir tampon peut diminuer [22].

Des variations peuvent être observées :

- au démarrage du digesteur [22].
- lors d'une surcharge de l'ouvrage entraînant une accumulation en acides gras volatils, des valeurs de pH inférieures à 5, et une inhibition de la méthanisation [22].

- lors de l'accumulation d'ammoniac induisant une inhibition de l'activité microbienne, ainsi que des risques de précipitation des composés minéraux et donc de prise en masse à l'intérieur du réacteur biologique [22].

- **La température**

Il existe trois types de digestion anaérobie :

- la digestion psychrophile (6 - 15°C) [22].
- la digestion mésophile (30 -35°C) [22].
- la digestion thermophile (> 45°C) [22].

- **Le temps de séjour hydraulique**

Il doit être suffisamment long pour éviter le lessivage des micro-organismes épurateurs. Ainsi il est nécessaire que le temps de séjour soit supérieur au temps de génération des nouveaux microorganismes, en particulier des méthanogènes. En culture libre, le temps de séjour est équivalent au temps de rétention des micro-organismes et peut être fixé entre 10 et 60 jours (25 à 35 jours en général) [22].

- **Le brassage**

La qualité du brassage est essentielle pour optimiser les réactions et la limitation du volume des réacteurs. Le système d'agitation doit être suffisamment performant pour assurer le contact entre la biomasse épuratrice et le substrat, pour maintenir une température homogène et pour libérer le biogaz formé [22].

- **La régularité de l'alimentation**

Elle maintient la stabilité du ratio matières organiques/micro-organismes en évitant des problèmes de surcharge pouvant freiner ou bloquer l'acétogénèse [22].

- **Limiter les facteurs d'inhibition**

Certains composés peuvent inhiber la digestion (oxygène, ammoniac, chlorure de sodium, cuivre, chrome, nickel...) [22].

- **La composition des boues à traiter**

La teneur en matières organiques de la boue à traiter, ainsi que la nature et l'organisation de ces matières organiques, influent sur les rendements d'élimination de la méthanisation. Ainsi, les boues primaires et les boues de type forte charge entraînent des rendements d'élimination compris entre 40 et 55 %. Revanche, pour des boues de type aération prolongée, les rendements s'abaissent à 25-35 % [22].

- **La pression partielle en hydrogène**

L'hydrogène est une molécule clé dans le processus de la digestion anaérobie. Il est produit lors de l'acétogénèse à partir des produits de l'acidogénèse (AGV). La thermodynamique des réactions de production d'hydrogène est défavorable dans les conditions standards ($\Delta G^\circ > 0$). Cette faible pression partielle est assurée par les bactéries homoacétogènes et hydrogénophiles qui consomment H_2 au fur et à mesure de sa production [22].

I.3.5. Définition d'un digesteur

Un digesteur, aussi appelé réacteur à biogaz ou méthaniseur, désigne une cuve utilisée dans le processus de méthanisation qui produit du biogaz grâce à un procédé de digestion anaérobie des matières organiques de diverses provenances. Il existe différentes formes et tailles de digesteurs. Dans une des techniques rudimentaires utilisées dans les débuts, le digesteur se présente sous la forme d'une fosse hermétique, dans laquelle sont déversées des eaux usées, des boues, et des composés organiques supplémentaires permettant de faciliter la digestion. Le gaz se forme dans les boues et remonte à la surface, mélangeant les boues par ce processus. Les boues digérées, appelées digestat, peuvent être vidangées et utilisées comme engrais [25].

I.3.6. Les différents systèmes de digesteurs

Le digesteur, encore appelé fermenteur ou bioréacteur - anaérobie est généralement constitué d'une cuve fermée, étanche à l'air et de préférence isolée thermiquement de l'extérieur dans laquelle différents microorganismes se cotoient pour dégrader chimiquement et biologiquement les déchets et effluents organiques et produire du biogaz. Le choix du digesteur varie en fonction du type de déchets à traiter et de l'application visée

.On peut classer les digesteurs selon :

- le mode d'alimentation : batch, continu ou semi-continu [24].
- le type de substrats : solide, semi-solide ou liquide [22].
- le nombre d'étapes : mono- ou bi-étape selon que la méthanogénèse et l'acidogénèse se déroulent dans le même réacteur ou dans deux cuves séparées [23].

I.3.6.1. Mode d'alimentation

- **Le digesteur batch ou discontinu**

Il a l'avantage d'être d'une construction simple. Le mode opératoire consiste à remplir le digesteur avec les substances organiques et laisser digérer, le temps de rétention étant fonction de la température et d'autres facteurs. A la fin de la digestion, le digestat est évacué et le processus peut recommencer. Ces systèmes, rustiques et d'une grande simplicité technique, sont avantageux pour traiter les déchets solides comme les fumiers, les résidus agricoles ou les ordures ménagères. La production de biogaz n'est pas régulière : au début du cycle, la fermentation du substrat ne venant que de commencer, la production de biogaz est lente. Elle s'accélère, et atteint un taux maximal au milieu du processus de dégradation et chute en fin de cycle lorsque seuls les éléments difficilement digestibles restent dans le digesteur [24].

- **Digesteur continu**

Le substrat introduit de manière continue est digéré et déplacé soit mécaniquement, soit sous la pression des nouveaux intrants vers la sortie sous forme de digestat. Le fonctionnement en continu, est bien adapté aux installations de grande taille. Il existe trois principaux types de digesteurs continus : système à cuve verticale, système à cuve horizontale et système à « cuves multiples» [24].

- **Digesteur semi-continu**

Fonctionne avec une combinaison des propriétés des deux précédents afin de tirer profit des avantages des deux extrêmes [24].

I.3.6.2. Type de substrats

Cette classification des digesteurs est fonction de la teneur en matière sèche des matières organiques qui affecte leur consistance.

- Solide : teneur en matière sèche $> 15\%$ [22].
- Semi-solide ou pâteux : teneur en matière sèche comprise entre 5 et 15 % [22].
- Liquide : teneur en matière sèche inférieure à 5 % [22].

I.3.7. Formes du digesteur

Il existe trois formes de digesteurs

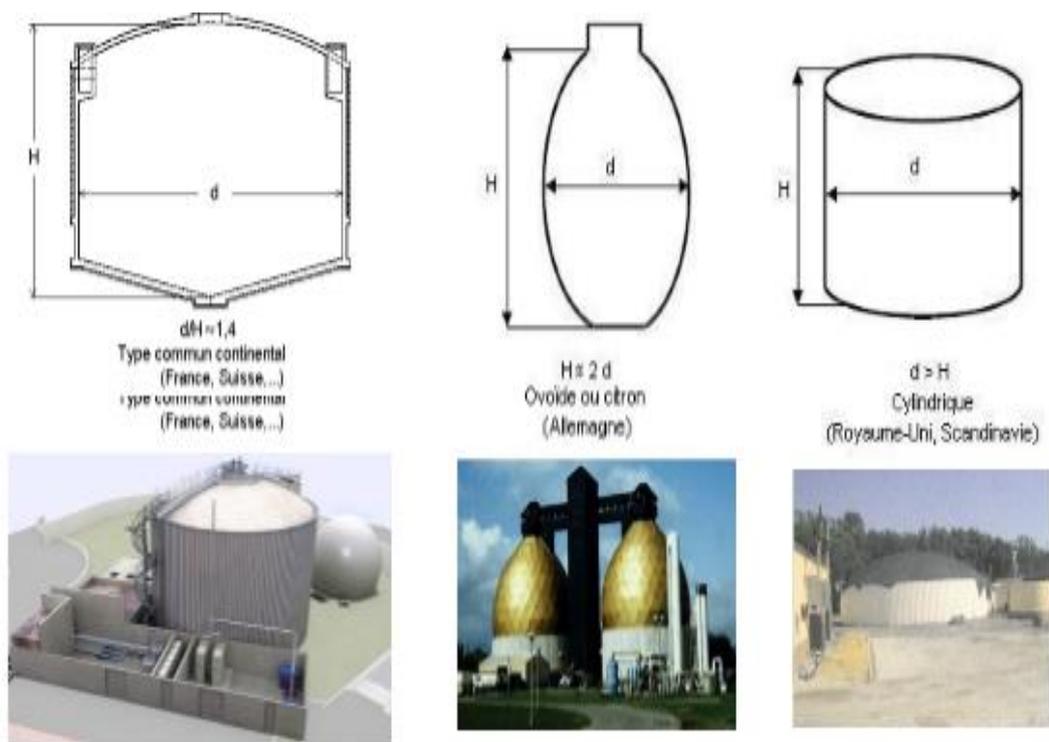


Figure I.5 les différentes formes de digesteur [25]

Les digesteurs cylindriques semblent plus fréquents (67%), mais ce, uniquement d'après les résultats des enquêtes.

Les réacteurs de type anglo-américain sont principalement rencontrés au Royaume-Uni ou dans les pays Scandinaves.

La digestion anaérobie dans des digesteurs ovoïdes est une des méthodes les plus efficaces et les plus rentables. La clé de ce système réside dans la forme optimale du digesteur combinée à un mélange effectif des boues afin d'accroître les performances. La double incurvation favorise le brassage des boues tout en réduisant les problèmes de moussage et d'ensablement et donc les arrêts intempestifs du digesteur pour son entretien. Ces digesteurs sont principalement rencontrés en Allemagne, au Royaume-Uni, en Amérique du Nord, bien que la croissance y soit moins rapide qu'en Allemagne.

En France, aucun digesteur de cette forme ne semble être commercialisé. Il serait intéressant de mener une étude auprès des industriels afin d'en connaître les raisons [25].

CHAPITRE II
PARTIE EXPERIMENTALE

II.1. Présentation de STATION D'EPURATION DE BENI MERED

La station d'épuration (STEP) de BENI MERED est à boue activée Figure (II.1). Elle est située à l'Est de la route nationale N° 1 à proximité de l'oued Béni Azza et fait partie des installations de protection des cours d'eau de la wilaya de Blida contre la pollution.

Cette station construite sur six hectares, traite les eaux usées domestiques et industriels issues de la ville de Blida. Sa capacité nominale depuis 2015 est de 383000 EH pour un débit de pointe de 51 560 m³/j.



Figure II.1 : Station d'épuration de BENI MERED

La station épuration de BENI MERED est alimentée par deux postes de refoulement (PR) (Tableau II.1) :

- Le PR 18 avec un débit de 4000 m³/h depuis 2015 et 6200 m³/j à l'horizon 2030.
- Le PR 22 avec un débit nominal de 800 m³/h depuis 2015 et 1000 m³/j à l'horizon 2030.

Les différents procédés et étapes d'assainissement sont plus détaillés en annexe n° I [26].

Tableau II.1. Données de base de la STEP de BENI MERED [26]

Capacité nominale	383 000 EH
Débit journalier	39 500 m ³ /j
Débit horaire moyen	1 647 m ³ /h
Débit horaire pointe temps sec	3 310 m ³ /h

II.3. Dimensionnement d'une installation de production de biogaz pour la STEP de BENI MERED (digesteur)

Le dimensionnement d'un digesteur anaérobie est généralement lié aux principaux objectifs poursuivis par la digestion anaérobie, en relation avec les ressources matérielles, technologiques et économiques disponibles, ainsi que la législation en vigueur. L'objectif principal de l'étude du dimensionnement d'un digesteur anaérobie est d'optimiser le traitement des déchets organiques (boues de la STEP) et/ou la production de méthane.

II.3.1 Dimensionnement du digesteur

II.3.1.1 Choix du digesteur

Il s'agit d'un système de production de biogaz et de fertilisant à partir des déchets organiques, il est composé d'un digesteur de type continue mésophile de forme cylindrique équipée d'un système d'agitation automatique, avec un dispositif de stockage de biogaz (gazomètre).

Le but est de contribuer à la résolution du problème environnementale des déchets organiques et en particulier les boues de la STEP de BENI MERED par la digestion anaérobie des boues.

Pour faire fonctionner le système on commence par l'introduction des boues dans le digesteur avec un débit, temps de séjour et une température bien déterminée. Les boues sont transformées en biogaz (gaz riche en méthane) par l'action de bactéries spécifiques.

L'impact de ce processus permet d'offrir une source d'énergie locale renouvelable.

L'influence de la température est déterminante sur le bon fonctionnement d'une digestion ; rapidité de démarrage, stabilité de la fermentation, et production de gaz. La fermentation mésophile, au voisinage de 35°C est généralement mise en œuvre.

La digestion anaérobie en une phase est une excellente solution pour assurer une hydrolyse rapide de la matière organique. Donc une installation de digestion de boue de type mésophile comprend deux digesteurs en parallèle suivis généralement d'un stockeur de boues digérées permettant de s'adapter au rythme de la déshydratation [25].

- **Caractéristiques**

- La digestion se fait à une température comprise entre 35 et 37°C [25].
- Le temps de séjour dans le digesteur est de 16 à 23 jours [25].
- Les boues doivent être pré-épaissies [25].

- **Avantage**

- Exploitation facilité [25].
- Procédé le plus répandu (plus de 90% des installations existante) [25].
- Homogénéisation [25].
- Plus de biogaz disponible [25].

Deux digesteurs cylindriques mésophiles ont été proposés d'un volume total V_d .

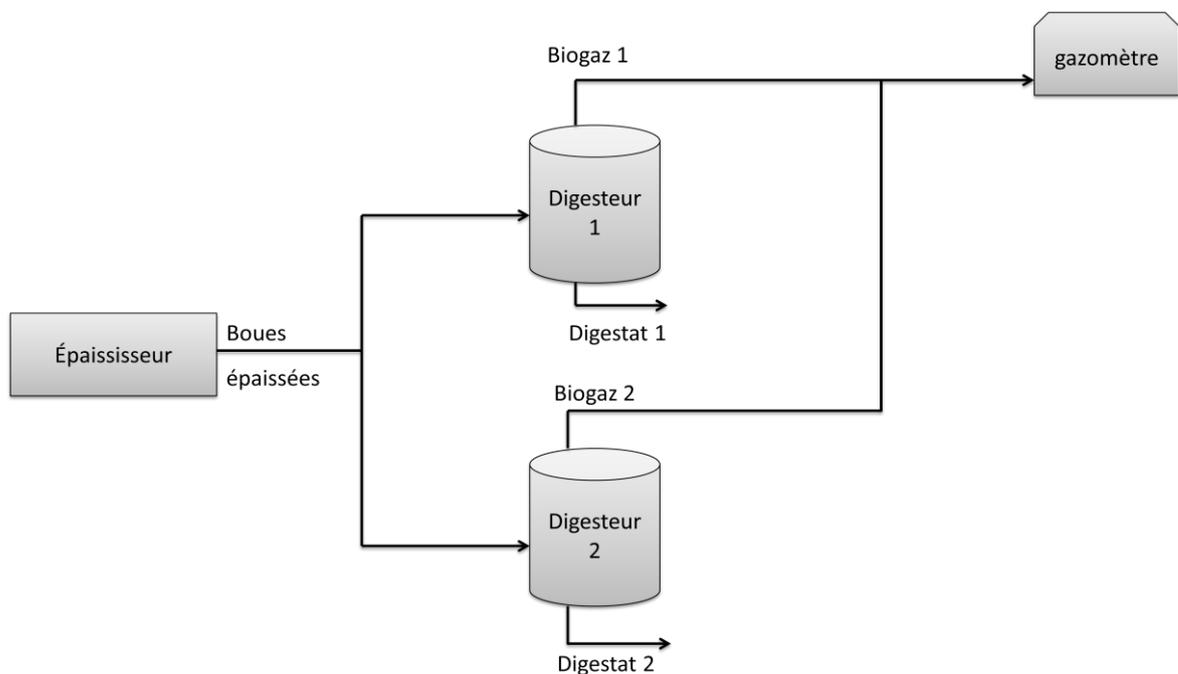


Figure II.2 : Schéma présente la partie de la digestion anaérobie dans la chaîne de traitement des eaux usées

II.3.1.2 Choix du procédé de digestion anaérobie

II.3.1.2.1 Caractérisation du substrat

La première étape dans le choix de la digestion anaérobie passe par la définition des caractéristiques de l'effluent à traiter qui va conditionner le choix de la technique. Dans notre cas il s'agit de boues de stations d'épuration. Nous avons donc affaire à un substrat relativement liquide, avec une charge organique importante et produit en continu puisqu'issu directement de la production de boues de la STEP de BENI MERED.

Les boues alimentant le digesteur se sont les boues issus de traitement par épaissement, c'est la dernière étape de traitement des boues dans la STEP de Beni mered. C'est un passage obligatoire pour réduire à faible coût le volume des boues à traiter. Il agit comme un décanteur et réduit légèrement la teneur en eau. L'alimentation se fait depuis la vasque d'alimentation jusqu'au fond du digesteur par une conduite.

Le tableau (II.2) représente les caractéristiques des boues et de l'épaississeur de la STEP de Béni Mered.

Tableau II. 2. Donnés des boues et de l'épaississeur de STEP BENI MERED.

Désignation	Formule	Unité
Le volume de l'épaississeur V	$V = Q \cdot t_s = 1521$	m ³
temps de séjours t_s	$t_s (1 \text{ à } 15) = 3,3$	Jour
La surface horizontale	$S_H = V / H = 380$	m ²
La profondeur	$H = V/S = 4$	M
l'épaisseur maximale des boues (e)	entre 20 à 30	Cm
La longueur L	(20 à 30)	M
La concentration de boues activées épaissies	30	g/l
Vitesse ascensionnelle	0,15	m/h
Débit total	40	m ³ / h
Masse des boues concentrées	14034	kg/j

Nombre de pompes installées	3	/
Nombre de pompes en secours	1	/
Débit unitaire pompes d'extraction	20	m ³ /h
Temps de fonctionnement unitaire	11,7	H



Figure II.3 L'épaississeur de la STEP de BENI MERED

II.3.1.2.2 Choix du procédé

D'après les caractéristiques précédentes, nous pouvons donc effectuer le choix de la technique. Tout d'abord, nous allons effectuer une méthanisation en voie liquide, compte tenu de la faible siccité des boues à introduire dans le digesteur. En effet, la voie liquide est privilégiée lorsqu'on a un substrat avec une siccité inférieure à 10%. Ensuite nous choisissons un procédé en continu en liaison avec la production de boues. Le choix du procédé s'est donc naturellement orienté vers un digesteur continu.

Un seul type de méthanisation est possible dans le digesteur continu, la température de cette technique est celle de la méthanisation mésophile avec une température d'environ 35°C qui est la plus utilisée et la plus stable. Nous avons donc opté pour la digestion de type mésophile, permettant de plus une économie d'énergie pour chauffer le digesteur.

II.3.1.2.3 Conditions opératoires

Lors de la mise en service du digesteur, il est nécessaire de contrôler les différents paramètres qui conditionnent la digestion anaérobie. Ces paramètres sont le pH, l'alcalinité, les acides gras volatils, la DCO, les nutriments et le débit de biogaz [29].

Le pH

Le pH est le paramètre principal qui conditionne la digestion. Dans littérature il est en général conseillé de garder un pH autour de la neutralité (entre 6.5 et 8.5). En effet, le pH peut inhiber les bactéries méthanogènes essentielles à la production du biogaz. Ainsi le suivi du pH, qui est fortement lié à la production d'acides gras volatils (AGV), va permettre de réguler le digesteur et éventuellement d'ajuster le pH [29].

L'alcalinité

L'alcalinité est le second paramètre important, très lié au pH puisqu'il constitue la représentation du pouvoir tampon du digesteur, donc sa capacité à maintenir un pH stable. Il est dépendant en majeure partie de la concentration en bicarbonates. Des mesures par titrage à l'acide chlorhydrique souvent automatisées sont généralement utilisées pour définir l'alcalinité [29].

Les acides gras volatils

Les acides gras volatils sont les intermédiaires de la digestion anaérobie qui influencent le plus le processus. Ils sont produits au cours de l'acidogénèse. L'accumulation d'AGV entraîne une baisse du pH qui inhibe les bactéries méthanogènes censées les transformer en méthane, la digestion donc est déséquilibrée. La mesure en continu de ces AGV par mesure chromatographique, titrimétrique ou spectrométrique permet de prévenir les dysfonctionnements de ce type [29].

L'hydrogène

L'hydrogène fait partie des paramètres de stabilité les plus importants pour la digestion anaérobie. La mesure de la pression partielle de l'hydrogène peut se faire dans la phase liquide ou dans le biogaz. Il doit être maintenu à faible concentration pour assurer le fonctionnement du digesteur [29].

La DCO

Cette mesure est représentative de la matière organique présente dans le digesteur. Lorsqu'on mesure la DCO à l'intérieur et en sortie du digesteur, on peut suivre son taux d'abattement [29].

Les nutriments

Le suivi des nutriments est essentiel pour maintenir une biomasse constante et permettre une croissance des micro-organismes tout au long de la digestion. La composition moyenne en micro-éléments est estimée à partir de mesures et l'on peut avoir un ajustement si besoin [29].

Débit de biogaz

Le suivi du débit de biogaz ainsi que sa composition en méthane notamment, permet d'avoir une idée sur l'état de fonctionnement du digesteur. La mesure peut être faite par CPG ou par absorption infrarouge [29].

II.3.1.3 Calcul du volume nécessaire des boues

$$V_e = Q \times \text{TRH} \quad [27]$$

V_e : Volume nécessaire [m^3]

Q : Débit journalier [m^3/j]

TRH : Temps de rétention hydraulique (ou temps de séjour moyen des boues) de digesteur [J]

II.3.1.4 Géométrie du digesteur [27]

Tableau II.3. Représente dimensionnement d'un digesteur

Désignation	Formule	unité
Le temps de séjour du digesteur t_s	$t_s = 175.10^{-0.03.T}$	jour
Le volume utile V_e	$V_d = Q.t_s$	m^3

Volume d'un digesteur $V_{D1} = V_{D2}$	$V_d/2$	m^3
Le diamètre du digesteur d_d	$D_d = (4.V_d / \pi.h)^{0.5}$	m
La hauteur h_d	h_d	m
La surface horizontal S_h	$S_h = \pi d^2/4$	m^2

II.3.2. BILAN ENERGETIQUE

II.3.2.1 Production de méthane (P_{CH4})

$$P_{CH4} = \text{quantité de MO} \times B_0 \text{ [27]}$$

- Quantité de MO total.
- Quantité de MO d'un digesteur : Quantité de MO total /2.
- B_0 : La constante de potentiel de production de gaz.

II.3.2.2 Energie totale E_t disponible annuellement

E_t est l'énergie produite lors de la digestion, elle calculée comme suit :

$$E_t = P_{CH4} \times PCI \text{ [27]}$$

E_t : énergie totale [KWh/j].

P_{CH4} : production de méthane.

PCI : pouvoir calorifique inférieur.

II.3.2.3. Energie valorisable E_v annuellement

E_v est l'énergie récupérable, elle représente 95% de l'énergie totale.

$$E_v = E_t \times X\% \text{ [27]}$$

E_v : Energie valorisable annuellement [kWh/an].

X% : pourcentage d'énergie valorisable qui correspond à l'énergie potentiellement disponible à partir du biogaz, il est égal à 95%.

II.3.2.4 Energie nécessaire au chauffage E_{chauff} du digesteur

E_{chauff} est l'énergie nécessaire pour le chauffage du digesteur pour son fonctionnement.

$$E_{\text{chauff}} = (E_v \times A) / B \quad [27]$$

E_{chauff} : l'énergie nécessaire au chauffage [kw/j].

A : Les besoins en chaleur lors de la digestion des boues biologiques de l'énergie valorisable égale 30%.

B : le rendement global de transformation énergétique égale 90%.

II.3.2.5 Energie restante E_{rest} disponible

E_{rest} est l'énergie qui reste et qui peut être valorisée et réutilisée dans la STEP

$$E_{\text{rest}} = E_v - E_{\text{chauff}} \quad [27]$$

II.3.2.6 Production journalière de biogaz (G)

On a P_{CH_4} représente 65% de G.

$$G = P_{\text{CH}_4} \cdot 100/65$$

II.3.2.7 Rendement technologique G_p

Le rendement technologique représente la quantité du biogaz produite par chaque 1 m³ du volume de digesteur.

$$G_p = G / V_d \quad [27].$$

G : Production journalière de biogaz [m³/j]

V_d : volume de digesteur [m³]

II.4 Stockage et valorisation du biogaz (Gazomètre)

SUEZ propose des solutions de gestion du biogaz avec le gazomètre à double membrane TECON* et le système de valorisation du gaz Méthanise.

Stockage de biogaz sur mesure TECON pour les stations d'épuration des eaux usées et les installations de récupération d'énergie - Le gazomètre TECON peut être monté au sol, généralement sous la forme d'un $\frac{3}{4}$ de sphère, ou bien monté sur le dessus d'un digesteur anaérobie ou même d'un réservoir, il fonctionne comme un couvercle de réservoir durable et un réservoir de stockage. [25]



Figure II.4 : Gazomètre [25]

CHAPITRE III
RESULTATS ET DISCUSSION

III. Dimensionnement de l'installation

III.1 Dimensionnement du digesteur

III.1.1 Calcul du volume nécessaire des boues

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

- $Q = 40 \text{ m}^3 / \text{h} = 960 \text{ m}^3 / \text{j}$
- $\text{TRH} = 16 \text{ jour}$

$$\text{AN) } V_e = 960 \cdot 16 = 15360 \text{ m}^3$$

III.1.2 Géométrie du digesteur

Deux digesteurs cylindriques mésophiles de même volume ont été proposés pour la STEP de BENI MERED pour la valorisation de la quantité totale des boues:

$$V_{D1} = V_{D2}$$

$$d_{D1} = d_{D2}$$

$$h_{D1} = h_{D2}$$

$$\text{Avec } V_D = V_{D1} + V_{D2}, \text{ donc } V_{D1} = V_{D2} = V_D / 2$$

$$\text{AN) } V_D = 15400 / 2 = 7700 \text{ m}^3$$

On proposé un rapport diamètre sur hauteur égal à 2.

$$h/d=2 \text{ donc } h = 2d \quad h = h_1 + h_2$$

h : La hauteur.

h_1 : hauteur au-dessus du sol.

h_2 : profondeur.

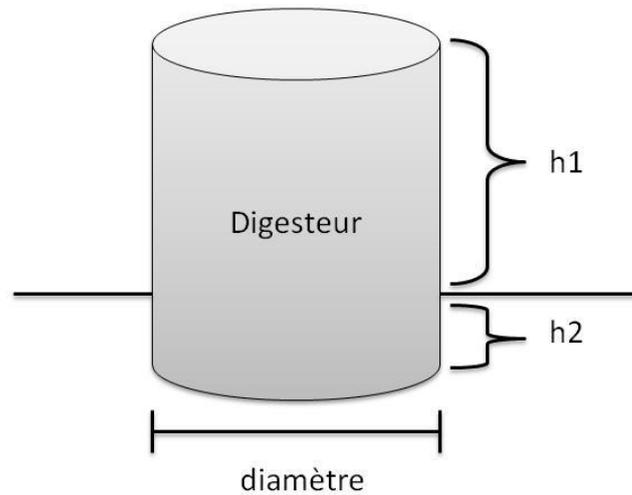


Figure III.1 : représente la géométrie de digesteur

Tableau (III.1) : les résultats de dimensionnement de digesteur

Désignation	Formule	Unité
Le temps de séjour du digesteur t_s	$t_s = 175.10^{(-0,03.T)} = 16$	Jour
Le volume utile V_e	$V_d = Q. t_s = 15400$	m^3
Volume d'un digesteur $V_{D1} = V_{D2}$	7700	m^3
Le diamètre du digesteur d_d	$d_d = (4.V_d / \pi.h)^{0.5} = 17$	m
La hauteur h	$h_d = 2d_d = 34$	m
h_1	27	m
h_2	7	m
La surface horizontale S_h	$S_h = \pi.d^2 / 4 = 227$	m^2

III.2 Bilan énergétique

III.2.1 Production de méthane

$$P_{CH_4} = \text{quantité de MO} \times B_0$$

- Quantité des boues de la STEP de BENI MERED : 14034 kg/ jour.
- Quantité des boues qui entre dans un seul digesteur 7017 kg/ jour.
- Pourcentage de MO dans les boues de la STEP de BENI MERED : 80%.
- B_0 : constante de potentiel de production de gaz = 0.5.

AN) Quantité de la matière organique dans un seul digesteur = $7017 \times 0.8 = 5613,6$ kg

AN) $P_{CH_4} = 5613,6 * 0.5 = 2806,8 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{j}$

III.2.2 Energie totale E_t disponible annuellement

$$E_t = P_{CH_4} \times PCI$$

E_t : énergie totale [kwh/j]

P_{CH_4} : production du méthane (65%)

PCI : pouvoir calorifique inferieur 6,46

- 1 m³ de biogaz = 9,94 kw énergie.
- PCI de $P_{CH_4} = 6,46$ kw énergie.

AN) $E_t = 2806,8. 6,46 = 18131,928 \text{ kW/j}$

III.2.3 Energie valorisable E_v annuellement

$$E_v = E_t \times X\%$$

AN) $E_v = 18131.928 \times (95/100) = 17225.3316 \text{ kw/j}$

III.2.4 Energie nécessaire au chauffage E_{chauff} du digesteur

$$E_{\text{chauff}} = (E_v \times A)/B$$

AN) $E_{\text{chauff}} = 17225.3316 \times (0.3/0.9) = 5741.7772 \text{ kw/j}$

III.2.5 Energie restante E_{rest} disponible

$$E_{\text{rest}} = E_v - E_{\text{chauff}}$$

AN) $E_{\text{rest}} = 17225.3316 - 5741.7772 = 11483.5544 \text{ kw/j}$

III.2.6 Production journalière de biogaz

On a P_{CH_4} représente 65% de G

$$G = P_{\text{CH}_4} \times 100/65$$

Donc : $G = 4318.1538 \text{ m}^3 / \text{j}$

L'énergie totale produite est environ 18131.93 kW/jour, 17225.33 kw/jour est une énergie valorisable, 5741.78 kw/jour est utilisée pour chauffer le digesteur pour son fonctionnement. 11483.55 kw/jour est une énergie restante qui peut être utilisée dans le fonctionnement des ouvrages de la STEP de Beni Mered sachant que la STEP consomme environ 5000 kW/jour pour son fonctionnement.

III.2.7 Rendement technologique

$$G_p = G / V_d$$

AN) $G_p = 4318.1538 / 7700 = 0.5607 = 56.07\%$

- Masse volumique des boues = 35g/L

$$35 \text{ g MS} \longrightarrow 1 \text{ L}$$

$$35 \text{ kg} \longrightarrow 1 \text{ m}^3$$

$$X \longrightarrow 7700 \text{ m}^3$$

X : la masse des boues dans un digesteur

$$X = 7700 \times 35 = \mathbf{269500 \text{ kg}}$$

$$269500 \text{ kg} \longrightarrow 4318.1538 \text{ m}^3 \text{ de biogaz}$$

$$1000 \text{ kg} \longrightarrow G_T$$

G_T : quantité biogaz par 1 tonne des boues

$$G_T = 4318.1538 \times 1000 / 269500 = \mathbf{16.02 \text{ m}^3}$$

$$P_{CH_4} = 16.02 \times 0.65 = \mathbf{10.41 \text{ m}^3}$$

III.3 Résultats de calcul de dimensionnement d'un digesteur

Le but de cette partie est de voir l'influence de différentes températures dans le cas d'un digesteur continu mésophile sur le temps de séjour et par la suite sur le dimensionnement du digesteur.

Le calcul est fait à l'aide du logiciel Excel. Les différentes équations de temps de séjour, volume, diamètre, hauteur, et de surface ont été introduite dans le logiciel. Par ailleurs, la température est variée entre 25 et 35 °C, et le débit des boues est constant.

Le Tableau (III.2) présente les résultats de calcul des différents paramètres

T (°C)	t_s (jour)	V_d (m ³)	Q (m ³ /jour)	$d_{\text{digesteur}}$ (m)	h (m)	$S_{\text{horizontale}}$ (m ²)
25	31,11989	29875,09	960	20,55253	41,10506	331,5891
26	29,04277	27881,06	960	20,08932	40,17864	316,811
27	27,10429	26020,12	960	19,63655	39,27311	302,6915
28	25,2952	24283,39	960	19,19399	38,38798	289,2013
29	23,60685	22662,58	960	18,7614	37,5228	276,3123
30	22,03119	21149,95	960	18,33856	36,67712	263,9977
31	20,56071	19738,28	960	17,92525	35,8505	252,232
32	19,18837	18420,83	960	17,52126	35,04252	240,9907
33	17,90763	17191,32	960	17,12637	34,25274	230,2503
34	16,71237	16043,88	960	16,74038	33,48076	219,9886
35	15,59689	14973,02	960	16,36309	32,72618	210,1843
36	14,55587	13973,63	960	15,9943	31,9886	200,8169

37	13,58432	13040,95	960	15,63383	31,26765	191,867
38	12,67763	12170,52	960	15,28148	30,56295	183,3159
39	11,83145	11358,19	960	14,93707	29,87413	175,146
40	11,04175	10600,08	960	14,60042	29,20084	167,3402

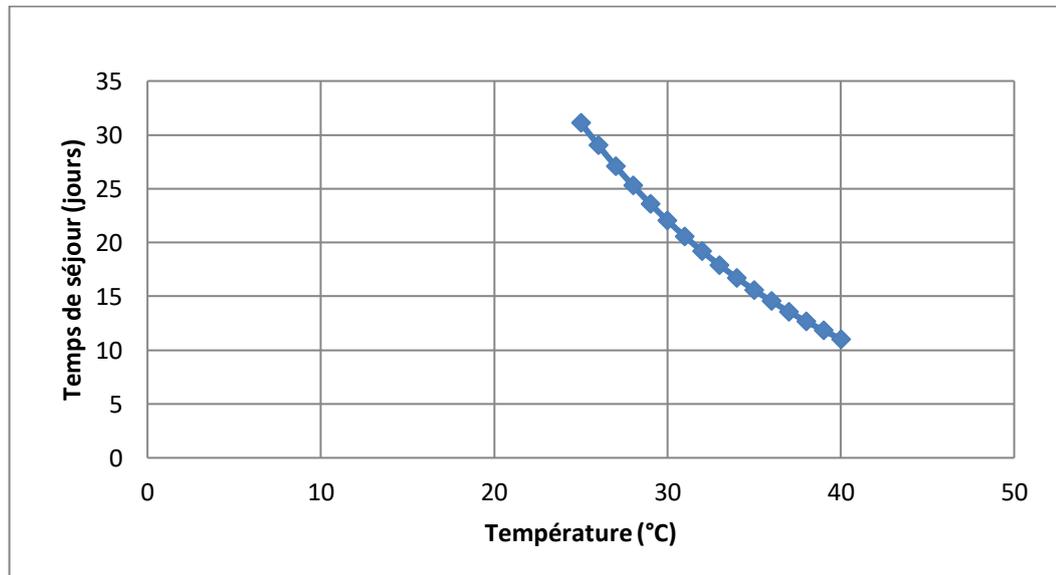


Figure III.2 Relation entre la température et le temps de séjour

D'après les résultats de calcul montrés dans le tableau (III.2), et d'après la figure (III.2) on remarque que la température à un effet direct sur le temps de séjour du digesteur, plus on augmente la température, plus le temps de séjour diminue.

CONCLUSION

Afin d'intégrer la digestion anaérobie des boues dans la filière de traitement de la STEP de Beni Mered pour qu'elle se transforme en une station à une énergie positive, une étude de dimensionnement d'un digesteur mésophile discontinue et une évaluation de la production du biogaz a été réalisée.

Deux digesteurs de mêmes caractéristiques géométriques ont été proposées les deux digesteurs ont le même volume qui égale 7700 m^3 , un diamètre de 17 m, une hauteur de 27 m, une profondeur de 7 m et une surface horizontale de 227 m^2 . Chaque digesteur est alimenté avec 7017 kg/jour des boues.

Le processus s'est déroulé sous des conditions opératoires normales de pression et de température entre $32-35^\circ\text{C}$, cela a permis de produire une quantité de $4318.15 \text{ m}^3/\text{jour}$ de biogaz à partir d'un seul digesteur avec un rendement technologique de 56,07%.

Les résultats des bilans énergétiques de chaque digesteur ont montré que l'énergie totale produite est environ 18131.93 kw/jour , 17225.33 kw/jour est une énergie valorisable, 5741.78 kw/jour est utilisée pour chauffer le digesteur pour son fonctionnement. 11483.55 kw/jour est une énergie restante qui peut être utilisée dans le fonctionnement des ouvrages de la STEP de Beni Mered sachant que la STEP consomme environ 5000 kw/jour pour son fonctionnement.

L'utilisation de la digestion anaérobie comme procédé renouvelable pour la production du biogaz peut s'argumenter par plusieurs avantages tel que : la réduction des odeurs et de la charge pathogène des substrats ; la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la production d'énergie renouvelable.

Références bibliographiques

- [1] C. Bliefert & R. Perraud: «Chimie de l'environnement : Air, Eau, Sols, Déchets». Edition de boeck
- [2] Zeghoud M. 2014., Etude de système d'épuration des eaux usées urbaines par lagunage naturel de village de Méghibramémoire master d'hydraulique Université D'el –Oued, p 16-17-21.
- [3] BOURENANE Ikram Chahrazad, ZAOUIA Imane <<Etude du fonctionnement de la station d'épuration (STEP) de Ain-Beida à boues activée et son impact sur l'environnement>>Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi Année : 2017-2018
- [4] Mlle.LONGOU Souad - Mlle.SOUANE Fatima <<PREPARATION ET TRAITEMENT DES BOUES RESIDUAIRES. APPLICATION A L'ADSORPTION DES NITRATES A PARTIR DES EAUX>> UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA 2018/2019
- [5] MURILLO, M, 2004 ; Caractérisation de l'Effet d'un Traitement au Peroxyde d'Hydrogène sur une Boue -Application la Réduction de la Production de Boue', Thèse de doctorat, INSA Toulouse.
- [6] JARDE,E 2002: -composition organique de boues résiduaires de stations d'épuration lorraines : caractérisation moléculaire et effets de la biodégradation
- [7] DUDKOWSKI,A,2000: -L'épandage agricole des boues de stations d'épuration d'eaux usées urbaines. Courrier de l'Environnement de l'INRA, pp. 134-135
- [8] AMADOU,H,2007: -Modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines. Thèses de doctorat, Université Louis Pasteur.
- [9] ECHAB,A1998: -Réutilisation des boues de stations d'épuration des eaux usées en agriculture : Impact des métaux lourds. Thèse 3e Cycle, Univ. Cadi Ayyad, Fac. Sci. Semlalia, Marrakech, Maroc, p. 80-83 (141 p.)
- [10] TAUZIN,C, JUSTE,C,1986: -Effet de l'application à long terme de diverses matières fertilisantes sur l'enrichissement en métaux lourds des parcelles. Rapport du contrat 4084/93. Ministère de l'environnement, France.
- [11] SUH,Y .J. AND. ROUSSAUX, P, 2002: -An LCA of Alternative Waste Water Sludge Treatment Scenarios', Resources, Conservation and Recycling, Vol. 35, pp. 191 –200.
- [12] RADA A ;1996: -Étude de la contamination métallique des sols de la zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech (Maroc) : contribution du fond

géochimique et des apports anthropogéniques dans le transfert du cadmium dans un système sol-plante. Thèse Doct. État. Univ. Cadi Ayyad, Fac. Sci., Semlalia, Marrakech, Maroc, 153 p.

[13] ADEME, 2001 b ; Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture, Ademe édition, Paris, pp. 59

[14] SEDKI, A, 1995 ; Étude écotoxicologique de la contamination de deux chaînes alimentaires terrestres dans la palmeraie périurbaine de la zone d'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech. Thèse Doct. État, Univ. Cadi Ayyad, Fac. Sci.Semlalia, Marrakech, Maroc. 140p.

[15] ADEME, 1999 : -Situation du recyclage agricole des boues d'épuration urbaines en Europe et dans divers autres pays du monde, Ademe édition, Paris, pp.159.

[16] Rahmani Sidali Messad Ali Amir<< Etude de valorisation des Boues issues des STEPSCas de la STEP Beni Mered à Blida>>UNIVERSIT DJILALI BOUNAAMA KHEMIS MILIANA 2019/2020

[17] JOCTEUR, MONROZIER, L 2001 : -Conséquences de l'anthropisation des sols. Les boues: quels risques? Colloque Marseille. 5 avril 2001. Mouvement National de Lutte pour l'Environnement éd

[18] HUE, N.V, 1995: -Sewage sludge. In Soil amendments and environmental quality, Chp 6, CRC Press. p. 199-247

[19] TALEB M,MESSIKH H, 2017:Etude de la production de biogaz dans la station d'épuration de Baraki. Mémoire master 2 Génie de l'environnement université des sciences et de la technologie Houari Boumediene (U.S.T.H.B) 2017.

[20] EL-FADEL, M., KHOURY, R., 2000. Modeling Settlement in MSW Landfills: a Critical Review. Critical Reviews in Environ. Sci. Technol. 30, 3, 327-361.

[21] MOUSSAOUIS, 2012:Etude sur la fermentation méthanique des boues activées de la station d'épuration de Boumerdes.Mémoire MASTER 2.Spécialité : Biochimie appliquée, Université M'Hamed bouguerra de boumerdes:

[22] Philippe NJAMPOU<< DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION DE BIOMETHANISATION>>institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement année 2010 2011.

[23] REVERDY Anne-Laure, BAUDEZ Jean-Christophe, DIEUDE-FAUVEL Emilie <<Ladigestion anaérobie des boues de stations d'épuration urbaines>> Centre de Clermont-Ferrand Site de Recherche et Développement de Montoldre année 2011.

[24] HÉDUIT M. La filière biogaz dans les pays en développement. Québec: IEPF & ACCT, 1993, 82 p.

[25] <https://www.suezwaterhandbook.fr>.

[26] données de la STEP de BENI MERED.

[27] Office International de l'Eau. Caractérisation des eaux usées.DFE/CNFME/L:\utilisat\JP\F07\DOCPDA~1\Caractérisation des EU.doc\05/04/2005.

[28] ADEME, 2001 a : -Les boues chaulées des stations d'épuration municipales: production, qualité et valeur agronomique, Ademe édition, Paris, pp.224.

[29] <https://hmf.enseiht.fr>